

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA VARIACIÓN DE
COBERTURA NIVO-GLACIAR EN EL NEVADO CAYAMBE
MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT Y
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
AMBIENTAL**

CORNELIA ELIZABETH BRITO CHASILUISA
elizabeth_lukas20@yahoo.com

DIRECTOR: ING. REMIGIO GALÁRRAGA SÁNCHEZ, M.Sc., Ph.D.
remigio.galárraga@epn.edu.ec

Quito, Noviembre 2014

DECLARACIÓN

Yo CORNELIA ELIZABETH BRITO CHASILUISA, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

En la ciudad de Quito, a los 14 días del mes de Noviembre de 2014.

CORNELIA ELIZABETH BRITO CHASILUISA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cornelia Elizabeth Brito Chasiluisa bajo mi supervisión.

Ing. REMIGIO GALÁRRAGA SÁNCHEZ, M.Sc., Ph.D.
DIRECTOR DEL PROYECTO.

AGRADECIMIENTOS

Al haber finalizado el presente trabajo, agradezco ante todo a mi madre Margot, a mis hermanos (ustedes cinco) y a mis abuelos quienes me han dado su apoyo incondicional y compañía en esta etapa de mi vida. A los amigos y compañeros que cerca o a la distancia confiaron en mí y me alentaron (U, O, I, E, A).

En segundo lugar, a la Escuela Politécnica Nacional (EPN) por los conocimientos que me fueron impartidos durante mi formación profesional. Al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN por permitirme acceder al Laboratorio de Aerofotogrametría y Sensores Remotos (LAFSER). Al Laboratorio Mixto Internacional (LMI) GREAT-ICE y al Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia por el financiamiento recibido para el proyecto.

En tercer lugar, quiero agradecer al Dr. Remigio Galárraga y al Dr. David Serrano por su guía, información y apoyo brindado en la elaboración de mi tesis. Al Ing. Marlon Calispa por toda su ayuda, el tiempo y la paciencia para contestar todas mis dudas. Al Ing. José Iñiguez por la información proporcionada. Al Ing. Carlos Ponce por responder a mis cuestiones. A Elvia, Ricardo y Don Víctor por su respaldo.

Finalmente, a todas personas quienes compartieron conmigo sus aventuras, sus conocimientos y su experiencia, no solo profesional, inspirándome y enseñándome lo que tiene verdadero valor e importancia.

Y a ti.

DEDICATORIA

A Margot, Esteban y Sabina.
A la memoria de lo que formó,
forma o dejará de formar
parte de un ecosistema por
inspirar curiosidad. Y a mí.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS.....	X
SIGLAS	XI
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XV
PRESENTACIÓN.....	XVII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. PROBLEMÁTICA.....	2
1.3. HIPÓTESIS.....	3
1.4. OBJETIVO	3
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	4
CAPÍTULO 2	6
MARCO CONCEPTUAL.....	6
2.1. GLACIAR	6
2.1.1. TIPOS DE GLACIARES	7
2.1.2. DINÁMICA DEL GLACIAR	8
2.1.3. RETROCESO GLACIAR	9
2.2. TELEDETECCIÓN ESPACIAL	11
2.2.1. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	12
2.2.2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	14
2.2.3. SIGNATURA ESPECTRAL	16

2.2.4. IMAGEN SATELITAL	17
2.2.5. PRE-PROCESAMIENTO	19
2.2.5.1. Corrección geométrica	20
2.2.5.2. Corrección radiométrica	20
2.2.6. PROCESAMIENTO	21
2.2.6.1. Composición de color	21
2.2.6.2. Índice de normalización diferencial de nieve (NDSI).....	22
2.2.6.3. Clasificación digital	23
CAPÍTULO 3	25
DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	25
3.1. DISTRIBUCIÓN DE GLACIARES EN EL ECUADOR	25
3.2. ZONA DE ESTUDIO.....	26
CAPÍTULO 4	33
INFORMACIÓN DISPONIBLE Y METODOLOGÍA	33
4.1. INFORMACIÓN DISPONIBLE	33
4.2. METODOLOGÍA	36
4.2.1. PRE-PROCESAMIENTO	37
4.2.1.1. Corrección geométrica.....	37
4.2.1.2. Corrección atmosférica	40
4.2.2. PROCESAMIENTO	41
4.2.2.1. Índice de normalización diferencial de nieve (NDSI).....	41
4.2.2.2. Clasificación no supervisada, vectorización y delimitación	43
CAPÍTULO 5	49
ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
5.1. RESULTADOS OBTENIDOS POR TELEDETECCIÓN.....	49
5.1.1. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE	49
5.1.2. SUPERFICIES DE LOS CONTORNOS	
GLACIARES Y TASA DE RETROCESO.....	51
5.2. DISCUSIÓN	53
5.2.1. RESULTADOS DE OTROS ESTUDIOS	
EN LOS GLACIARES TROPICALES DE ECUADOR	53
5.2.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	
EN EL NEVADO CAYAMBE (1979-2009).....	57

CAPÍTULO 6	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
6.1. CONCLUSIONES	61
6.2. RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS	70
ANEXO N° 1	71
FOTOGRAFÍAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	71
ANEXO N°2.....	76
IMÁGENES SATELITALES LANDSAT Y FOTOGRAFÍAS AÉREAS.....	76
ANEXO N°3.....	81
MAPA DE RESULTADOS DEL RETROCESO GLACIAR DEL NEVADO CAYAMBE.....	81

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: FORMACIÓN DEL HIELO GLACIAR.....	7
FIGURA 2.2: ZONAS DE UN GLACIAR.....	9
FIGURA 2.3: ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE TELEDETECCIÓN.....	12
FIGURA 2.4. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO	13
FIGURA 2.5: COMPORTAMIENTO DEL FLUJO INCIDENTE.....	14
FIGURA 2.6: ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	14
FIGURA 2.7: FIRMA ESPECTRAL DE LA NIEVE Y EL AGUA.....	16
FIGURA 3.1: DISTRIBUCIÓN DE GLACIARES EN EL ECUADOR.....	25
FIGURA 3.2: MAPA DE UBICACIÓN DEL NEVADO CAYAMBE	27
FIGURA 3.3: QUEBRADAS Y RÍOS	30
FIGURA 4.1: IMAGEN SATELITAL LANDSAT, AÑO 1991.....	35
FIGURA 4.2: DISTRIBUCIÓN DE LOS GCP	40
FIGURA 4.3: CLASIFICACIÓN DE LOS RANGOS DE NDSI	42
FIGURA 4.4: CLASIFICACIONES OBTENIDAS.....	44
FIGURA 4.5: CONTORNOS GLACIARES (PERÍODO 1979-2009)	46
FIGURA 4.6: ZONAS DEL GLACIAR DEL NEVADO CAYAMBE (TOTAL: 4).....	47
FIGURA 4.7: LENGUAS GLACIARES (TOTAL: 19).....	48
FIGURA 5.1: A) ALTA NUBOSIDAD SOBRE EL GLACIAR, B) SUPERFICIE NIVAL > SUPERFICIE GLACIAR.....	49
FIGURA 5.2: BANDEADO SOBRE IMÁGENES SATELITALES.....	50
FIGURA 5.3: ACUMULACIÓN DE NIEVE EN LA PARTE NOR-OCCIDENTAL ..	51
FIGURA 5.4: TENDENCIA DEL RETROCESO GLACIAR DEL NEVADO CAYAMBE.....	57
FIGURA 5.5: RECESIÓN POR ZONAS Y LENGUAS GLACIARES	59

LISTA DE TABLAS

TABLA 3.1. ALTAS MONTAÑAS DEL ECUADOR Y ALTITUDES.....	26
TABLA 4.1: CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES LANDSAT.....	34
TABLA 4.2: IMÁGENES SATELITALES LANDSAT USADAS EN EL ANÁLISIS.	36
TABLA 4.3: INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL.	38
TABLA 4.4: TABLA DE PUNTOS DE CONTROL (GCP)	39
TABLA 4.5: ND MÍNIMOS DETERMINADOS PARA APLICAR DOS.....	41
TABLA 5.1: SUPERFICIE Y % DE RETROCESO GLACIAR (1979-2009)	52
TABLA 5.2: SUPERFICIE Y PORCENTAJE DE RETROCESO DE A) LAS ZONAS Y B) LAS LENGUAS GLACIARES (1979-2009).....	53
TABLA 5.3: ERROR RELATIVO ESTIMADO PARA EL CALCULO DE SUPERFICIES GLACIARES DEL NEVADO CAYAMBE (1979-2009).....	56

SIGLAS

AECI	Agencia Española de Cooperación Internacional
ALOS	Advanced Land Observation Satellite
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CAN	Secretaria General de la Comunidad Andina
DOS	Dark Object Substraction
ENVI	Environment for Visualizing Images
ERDAS	Earth Resources Data Analysis Systems
ETM+	Enhaced Thematic Mapper Plus
EVF	ENVI Vector File
GCP	Ground Control Point
IGM	Instituto Geográfico Militar
ILWIS	Integrated Land and Water Information System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
LANDSAT	Land Satellite
L1T	Level Standard Terrain Correction 1
METEOSAT	Meteorological Satellite
MSS	Multi Spectral Scanner
ND	Número Digital
NDSI	Normalized Difference Snow Index
OLI	Operational Land Imager
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RADARSAT	Radar Satellite
RECAY	Reserva Ecológica Cayambe-Coca
RGB	Red, Green, Blue
RMSE	Root Mean Square Error
SHP	Shapefile
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre

TIROS	Television and InfraRed Observation Satellite
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey

RESUMEN

Los ecosistemas de alta montaña abarcan elementos hidrológicos tales como los glaciares que son importantes por su aporte y regulación hídrica. Sin embargo, los mismos sufren rápidos procesos de transformación y deterioro como el retroceso glaciar que puede ser atribuible al cambio climático. La falta de información para la toma de decisiones adecuadas sobre el uso, manejo y conservación de estos recursos naturales, requiere de un análisis que permita obtener información base sobre el estado de los glaciares del Ecuador, en este caso de estudio: el glaciar del nevado Cayambe

A través del uso de técnicas de percepción remota (teledetección) se pueden medir las variaciones tempo-espaciales de las superficies glaciares, cuantificación que se puede realizar mediante el procesamiento de imágenes satelitales. En este caso se obtuvieron las superficies glaciares del nevado Cayambe procesando en Sistemas de Información Geográfica (SIG) seis imágenes satelitales de la plataforma LANDSAT del período 1979-2009 y dos fotografías aéreas del año 2009.

Se escogieron las imágenes satelitales en donde se visualizó mejor el glaciar teniendo en cuenta la nubosidad, el nivel de procesamiento geométrico, fecha de toma (meses de menos precipitación). El tratamiento digital que se realizó fue: corrección geométrica (año 1979), corrección atmosférica, cálculo del Índice de Normalización Diferencial de Nieve (NDSI, por sus siglas en inglés), clasificación no supervisada, vectorización, digitalización (con la ayuda de fotografías aéreas para el 2009), cálculo de superficies y del porcentaje de retroceso durante el período 1979-2009.

Se obtuvieron las siguientes superficies nivo-glaciares del nevado Cayambe: para el año 1979, de 20,64 km²; el año 1991 de 19,32 km²; el año 1999 de 17,94 km², el año 2002 de 16,51 km² y el año 2009 de 15,36 km². El porcentaje de retroceso nivo-glaciar durante 30 años (1979-2009) fue de 25,58% con una tasa promedio de

retroceso de 0,176 km²/año. Lo cual indica que la tendencia de reducción, al igual que en otros glaciares tropicales del Ecuador (Illiniza Sur, Antisana, Cotopaxi y Chimborazo) continúa aunque en este caso sea menor por la influencia de la vertiente Amazónica.

En el análisis, se delimitaron cuatro zonas y diecinueve lenguas glaciares donde las mayores tasas de retroceso fueron 0,02 km²/año (lenguas: 7, 9, 10, y 15) y 0,01 km²/año (lenguas: 1, 4, 8, 12, 13, 14, 17 y 19), dadas principalmente en la zona este del glaciar donde se calculó un porcentaje de retroceso de 30,97 % para el sureste y de 23,22 % para el noreste. Adicionalmente, los resultados obtenidos del NDSI están dentro del rango 0,4-0,95.

PALABRAS CLAVE: Nevado Cayambe, glaciar, retroceso glaciar, imágenes satelitales LANDSAT, teledetección.

ABSTRACT

The high mountain's ecosystems include hydrological elements such as glaciers that are important for their contribution and water regulation. However, they suffer fast processes of transformation and deterioration as glacial retreat which can be attributed to climate change. Lack of information for making appropriate decisions on the use, management and conservation of these natural resources, requires an analysis to obtain baseline information about the state of the glaciers of Ecuador, but in this case the Nevado Cayambe glacier.

Through the use of remote sensing techniques we can measure the temporal and spatial variations of the glacier surfaces, and this quantification can be performed by processing satellite images. In this case the glacial surface of Nevado Cayambe was obtained by processing in GIS software six satellite images of the LANDSAT platform for the period 1979-2009 and two aerial photographs of the year 2009.

The satellite images were chosen where the glacier is best visualized considering cloudiness, geometry processing level (L1T), and acquisition date (months of less precipitation). The digital treatment realized was: geometric correction (1979), atmospheric correction, calculation of the Normalized Difference Snow Index (NDSI), unsupervised classification, vectorization, digitization (with the help of aerial photographs for year 2009), determining of surfaces, and estimation of recession for the period 1979-2009.

The following nivo-glacier areas of Nevado Cayambe were obtained: for 1979 it was 20.64 km², for 1991 it was 19.32 km², for 1999 it was 17.94 km², for 2002 it was 16.51 km² and for 2009 it was 15.36 km². The percentage of glacial recession for 30 years (1979-2009) was 25.58% with a recession rate of 0.176 km²/year. It indicates that the reduction trend as in other tropical glaciers of Ecuador (Illiniza Sur, Antisana, Cotopaxi and Chimborazo) continues even in this case it is less because of the influence of the Amazon watershed.

In the analysis, four zones and nineteen glacier tongues were defined in which the highest rates of retreat were 0.02 km²/year (tongues: 7, 9, 10, and 15) and 0.01 km²/year (tongues: 1, 4, 8, 12, 13, 14, 17 and 19), mainly in the east of the glacier where a recession of 30.97% to the southeast, and 23.22% for the northeast were calculated. Furthermore, the results of NDSI are within the range 0.4 to 0.95.

KEYWORDS: Nevado Cayambe, glacier, glacial recession, LANDSAT satellite imagery, remote sensing.

PRESENTACIÓN

El objetivo del presente estudio fue determinar la variación superficial de la cobertura nivo-glaciar del nevado Cayambe, durante el período de 1979-2009, mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales LANDSAT usando un SIG. A continuación se presenta la estructura y contenido que permitió cumplir con este objetivo.

El Capítulo 1 contiene una introducción donde se presentan los antecedentes, problemática, hipótesis, objetivos y justificación del estudio. El Capítulo 2 presenta el marco conceptual resumido de la bibliografía consultada en el cual se basó para realizar el presente trabajo. En el mismo se encuentran conceptos generales sobre glaciares y teledetección. En el Capítulo 3 se describe la zona de estudio (nevado Cayambe).

En el Capítulo 4 se detalla la información disponible (imágenes satelitales LANDSAT, cartografía digital y fotografías aéreas) que fue procesada en SIG, además se explica la metodología que se siguió para el tratamiento digital y obtención de los contornos y superficies glaciares del nevado Cayambe. En el Capítulo 5 se presentan los resultados de las superficies, porcentaje y tasa de retroceso glaciar del período 1979-2009. También se muestra un análisis de la información disponible y de los resultados, se realiza una discusión con otros estudios que tienen relación con el objetivo de este trabajo y se analiza una lengua glaciar ubicada al sur-occidente del nevado Cayambe en la cual el retroceso en el período analizado es muy notorio.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas de este trabajo. Finalmente, se anexan fotografías de la zona de estudio, las imágenes satelitales LANDSAT y fotografías aéreas con las que se trabajó y un mapa de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Los ecosistemas de alta montaña abarcan elementos hidrológicos tales como los glaciares que brindan servicios ambientales. Sin embargo, los mismos sufren rápidos procesos de transformación y deterioro. La falta de información para la toma de decisiones adecuadas sobre el uso, manejo y conservación de estos recursos naturales (*Castaño y Hofstede, 2002*), requiere de un análisis que permita obtener información base sobre el estado de los glaciares del Ecuador, en este caso de estudio: el glaciar del nevado Cayambe.

A través de la historia, las expediciones científicas (realizadas por: Moritz Wagner, Reiss, Stübel, von Thielman, Whymper, Boussingault, La Condamine, Humbolt, Hans Meyer, Rafael Troya, Rudolph Reschreiter, Stefan Hastenrath) en los glaciares ecuatorianos, describen masas de hielo sobre montañas donde actualmente se puede observar solo roca (Corazón, Cotacachi, Guagua Pichincha, Sara Urcu, Sincholagua, Illiniza Norte). En otros casos, describen masas de hielo que en la actualidad han reducido su longitud, área y volumen (Altar, Antisana, Carihuayrazo, Cayambe, Chimborazo, Cotopaxi, Illiniza Sur) ascendiendo (ubicándose la línea de equilibrio glaciar a mayor altitud) y dejando como muestra morrenas. Este proceso se relaciona con la variación del clima, pasando los glaciares a ser los mejores indicadores del cambio climático (*Franco, 2007*).

Países como Perú, Bolivia, Ecuador y Colombia poseen el 95% de los glaciares tropicales del mundo, cubriendo una superficie estimada en la década de los años 70 de 2500 km², área que se ha ido reduciendo pero que aproximadamente se distribuye de la siguiente manera: el 71% en Perú, el 22% en Bolivia, el 4% en Ecuador y el 3% en Colombia. Estudios en los mismos reportan un retroceso, atribuible al calentamiento global (*IPCC, 2007*).

En la actualidad, Ecuador posee 7 casquetes glaciares en los siguientes nevados: Antisana, Cotopaxi, Chimborazo, Cayambe, Altar, Illiniza Sur y Carihuayrazo. Para el año 1997, se estimaba que los glaciares mencionados representaban una superficie total de 60 km² y para el año 2006 una menor a 50 km² (Cáceres, 2010). Los glaciares del Ecuador en 30 años (1976-2006), han perdido entre 30-50% de su superficie. Sin embargo, estudios más amplios se han realizado en los glaciares del Illiniza Sur (Febres, 2007), Antisana, Cotopaxi, Carihuayrazo y Chimborazo (Basantes, 2010; Cáceres, 2010; Collet, 2010; Calispa 2012), restando realizarlos en los demás glaciares, que son importantes por el aporte hídrico que representan a sus poblaciones aledañas (Francou et al, 2011).

1.2. PROBLEMÁTICA

El problema del retroceso glaciar empieza al definirse este como un elemento hidrológico, por los servicios que el agua brinda a poblaciones y a otros ecosistemas como el aporte y la regulación hídrica. Su pérdida podría representar la reducción de agua que proporciona para la población, pérdida de ecosistemas (ejemplo: el páramo que también es un almacenador de agua) pues, en épocas secas donde la temperatura es mayor, los glaciares suplen el aporte hídrico de las precipitaciones (Mena et al, 2008).

Para poder relacionar la evolución de los glaciares (fenómeno natural complejo) con el cambio climático es necesario observar sus cambios a través de métodos como pueden ser los de las ciencias geofísicas, basados en la cuantificación de sus características físicas, que en el presente caso de estudio se realizará mediante la cuantificación superficial del mismo. Estas mediciones se pueden realizar a partir de imágenes satelitales (por ejemplo aquellas de la plataforma LANDSAT), que permiten obtener información de sitios inaccesibles, de tiempos pasados y comparativa (García et al, 2009). Otros estudios se pueden realizar en base a: mediciones de la topografía glaciar, archivos documentales, relatos y fotografías antiguas dando indicaciones acerca del estado de los glaciares en tiempos pasados (Francou et al, 2013).

Para la zona del nevado Cayambe, se han seleccionado y descargado 92 imágenes satelitales LANDSAT del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) Earthexplorer (Coordenadas: Path: 10; Row: 60), desde la década de los años 70 hasta el año 2009 con las cuales se trabajará en este análisis cuantitativo sobre las superficies. Cada imagen cubre un área de 32400 km² del Ecuador, dentro de la cual se halla la zona de estudio del glaciar. A través del procesamiento de las imágenes satelitales LANDSAT, se obtendrán superficies comparables para analizar este fenómeno, resultado que permitirá aportar con información acerca de la variación superficial de la cobertura nivo-glaciar.

1.3. HIPÓTESIS

El análisis espacial y temporal de la variación de cobertura nivo-glaciar en el nevado Cayambe, procesando imágenes satelitales LANDSAT, permitirá determinar la variación superficial de la cobertura nivo-glaciar durante el período 1979-2009 determinándose su retroceso.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar la variación superficial de la cobertura nivo-glaciar del nevado Cayambe, durante el período de 1979-2009, utilizando imágenes satelitales LANDSAT y SIG.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información bibliográfica sobre glaciares y teledetección en el análisis de coberturas.
- Tratar de manera digital las imágenes satelitales escogidas utilizando SIG.

- Delimitar y calcular las superficies de los contornos nivo-glaciares del nevado Cayambe, empleando las imágenes satelitales tratadas y SIG.
- Calcular el porcentaje de variación de la cobertura nivo-glaciar, durante el período 1979-2009, del nevado Cayambe.

1.5. JUSTIFICACIÓN

El retroceso de la cobertura glaciar está ocurriendo significativamente a nivel global, por lo que es claro identificarlo en zonas más vulnerables como las de alta montaña (páramos, morrenas y glaciares), por ejemplo, en el glaciar del nevado Cayambe.

A escala regional, los bancos de nieve de montaña, los glaciares y los pequeños casquetes de hielo son importantes con respecto a la disponibilidad de agua dulce para los muchos ríos que proveen de agua para la agricultura, generación de energía, el riego, el consumo humano y el uso en la industria de ciudades principales (La Paz, Quito, Lima y otras grandes ciudades andinas). Siendo considerados gigantescos reservorios de agua (*CAN, PNUMA, AECI, 2008*). Los impactos regionales proyectados, en América Latina, por la desaparición de los glaciares provocarían la reducción de la disponibilidad de agua, del potencial hidroeléctrico y alterarían la estacionalidad de los flujos en regiones abastecidas de agua de nieve de las principales cordilleras (*IPCC, 2007*).

En el Ecuador, desde 1991 existe una red de monitoreo de los glaciares en la cordillera de los Andes en América del Sur, creada por el Institut de Recherche pour le Développement (IRD) y otras instituciones. Los estudios se encuentran concentrados sobre varios glaciares ubicados en Perú, Bolivia y Ecuador cuyo objetivo es estudiar la relación clima-glaciar, a través del estudio de la evolución y de la dinámica de los glaciares (*Collet, 2010*).

Muchos de estos estudios, en Ecuador, se han realizado mediante teledetección utilizando imágenes satelitales (LANDSAT, ASTER y ALOS), obteniendo retrocesos de los glaciares Cotopaxi 37% (1979-2007), Antisana 33% (1979-2007)

y Chimborazo 57% (1962-1997). Esto muestra que el uso de imágenes satelitales es una herramienta eficiente, al igual que la aerofotogrametría, permitiendo inventariar el estado de recesión de los glaciares (*Rabatel et al, 2013*).

La información sobre este fenómeno (retroceso glaciar) en el nevado Cayambe no ha sido profundizada, sin embargo existen información y herramientas de teledetección que permiten analizar desde el pasado a la actualidad estas variaciones y cuantificarlas (*Collet, 2010*). Los Sistemas de Información Geográfica facilitan la gestión y la representación de datos espaciales, que interactúan con atributos temporales (*García et al, 2009*). Con un análisis espacial y temporal utilizando imágenes satelitales LANDSAT se aportará con información al respecto.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL

2.1. GLACIAR

Un glaciar es aquel cuerpo que forma parte de la criosfera (superficie terrestre conformada por: glaciares, hielo y mares congelados) que en conjunto con las nubes y visto desde el espacio toma un color blanco (*Cortés, 2013*). Es la composición de una masa de hielo perenne, neviza y nieve originada en la superficie de la tierra por la recristalización de la nieve u otras formas de precipitación sólida, esta masa se observa al final de la temporada de deshielo, en el caso de los glaciares tropicales, después de la transición de la nieve cuando esta se derrite. Se incluyen todos los afluentes y alimentadores que contribuyen al hielo glaciar principal, además de todos los desechos cubiertos por hielo, excluyendo todos los expuestos sobre la tierra (*Racoviteanu, 2008*).

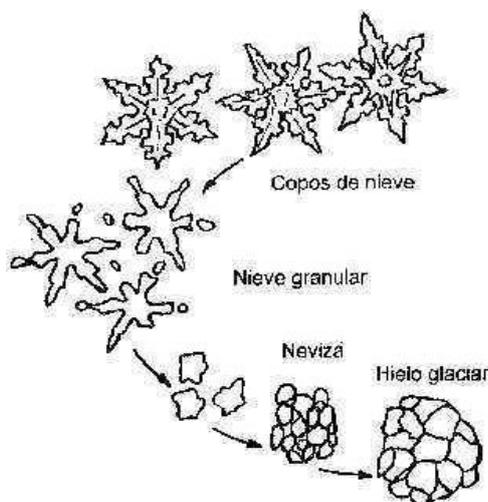
En el enfoque de los estudios glaciológicos, el glaciar es considerado como un objeto hidrológico cuya masa cambia en función de las características del clima (*Pasapera, 2012*), transformando el agua sólida (nieve, granizo o escarcha) en hielo y restituyéndola en forma de vapor (por evaporación o sublimación) o en forma líquida (*Cogley et al, 2011*).

Un glaciar es un extenso cuerpo de hielo donde el paso del agua y el aire está completamente interrumpido. Además, muestra pruebas de movimiento hacia abajo influenciado por la gravedad. Los glaciares se encuentran en donde la temperatura promedio es más baja que el punto de congelación del hielo (*Cortés, 2013*).

Otros términos a conocer para entender la diferencia y etapas de transformación del glaciar son nieve y neviza. La nieve es la acumulación de precipitaciones sólidas sobre un glaciar que aún no ha alcanzado la compactación suficiente para restringir la circulación de aire y agua de manera significativa. La neviza es la nieve que ha

sobrevivido al menos una temporada de la ablación (proceso donde existe pérdida de masa a causa de fusión) pero no se ha transformado en hielo glaciar, estructuralmente es la etapa metamórfica intermedia entre la nieve y el hielo, en la que el espacio de los poros está al menos parcialmente interconectado, permitiendo la circulación de aire y agua (Cogley *et al*, 2011). En la Figura 2.1 se puede observar un esquema de las diferentes fases de formación del hielo glaciar.

FIGURA 2.1
FORMACIÓN DEL HIELO GLACIAR



FUENTE: Rivera, 2014.

2.1.1. TIPOS DE GLACIARES

De acuerdo con la zona climática en que se encuentran y tomando en cuenta factores como la forma de radiación solar incidente y el comportamiento de la humedad transportada por la circulación de la atmósfera, los glaciares pueden ser:

- Glaciares tropicales,
- Glaciares de latitudes medias, y
- Glaciares polares.

Los glaciares del Ecuador son de tipo tropical, estos cumplen con tres cualidades que los definen como tales:

- El Ecuador se encuentra en la zona intertropical franja ubicada entre los Trópicos de Cáncer (Norte) y Capricornio (Sur) donde reciben la mayor cantidad de radiación solar a lo largo del año.
- La atmósfera tropical en cada altitud es continuamente homogénea, la variación diurna de la temperatura del aire es igual a la variación anual de la temperatura.
- La Zona Intertropical de Convergencia causa de uno a dos periodos de lluvia y junto con la interacción de las extensas lluvias de los bosques genera áreas que están siempre húmedas (*Cortés, 2013*).

Para que un glaciar pueda existir en una región tropical debe tener una gran altura y suficiente humedad. Los Andes ecuatorianos cumplen estas características por la altura de la cordillera y la humedad de la Amazonía (*Montero, 2010*).

2.1.2. DINÁMICA DEL GLACIAR

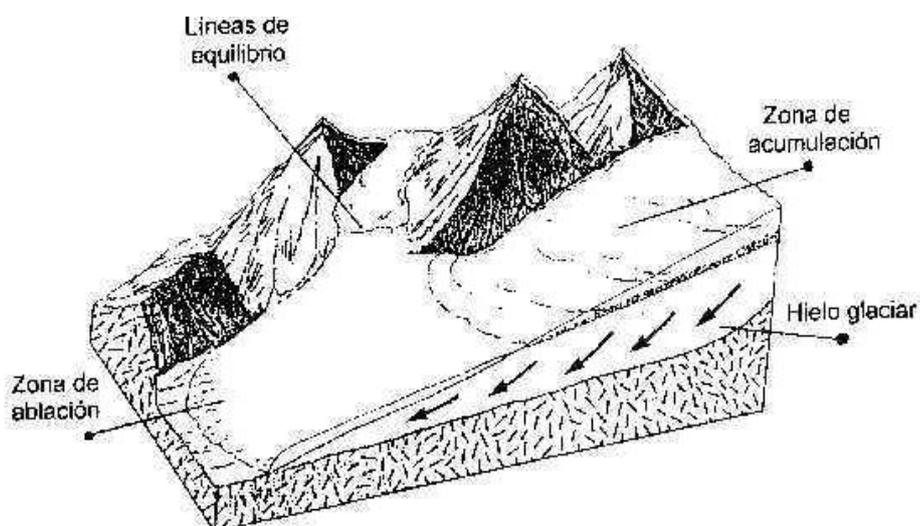
Un glaciar se compone de dos zonas, a saber, la de acumulación y la de ablación. La zona de acumulación se halla en la parte superior del glaciar donde se almacenan las precipitaciones sólidas. Aquí la acumulación es mayor que la ablación, hasta un nivel altimétrico denominado como línea de equilibrio del glaciar, por ser una curva irregular marcada en el glaciar, en la cual el balance de masa entre acumulación y ablación se acerca a 0. Después de esta línea se halla la zona de ablación que se sitúa en la parte baja del glaciar donde la acumulación es menor que la ablación (*Francoy y Pouyaud, 2004*).

Conocidas estas zonas se tiene que un glaciar es un sistema dinámico que, debido a que tiene cierto grado de plasticidad por las características de su material (nieve, hielo, agua) se deforma por su propio peso como un flujo de hielo, transfiriendo un exceso de masa desde la parte superior, donde se forma esta masa por las precipitaciones sólidas (zona de acumulación), hacia la parte inferior (zona de ablación) donde poco a poco desaparece por ablación o procesos de fusión, este sistema dinámico dependerá de (*Francoy y Pouyaud, 2004*):

- Exceso de masa a evacuar y de las variaciones de la masa,
- Longitud del glaciar,
- Temperatura del hielo,
- Morfología general del sustrato (pendiente, ancho, regularidad), y
- Cantidad de agua a nivel del sustrato.

En la Figura 2.2 se muestran las zonas de un glaciar.

FIGURA 2.2
ZONAS DE UN GLACIAR



FUENTE: Rivera, 2014.

2.1.3. RETROCESO GLACIAR

Las diversas masas de hielo responden de forma diferente a los cambios climáticos pero su tendencia común es de retroceso que significa que los glaciares adelgazan y pierden masa en la parte frontal de los mismos. El retroceso del glaciar es el ascenso de la línea inferior de las nieves persistentes de alta montaña cada vez a mayor altitud, muchas veces hasta desaparecer a consecuencia del deshielo o fusión glaciar. Actualmente, los glaciares cubren aproximadamente el 10 % de la superficie terrestre, sin considerar el agua subterránea, representan el 80% del

agua dulce en el mundo. La tendencia recesional relacionada al aumento de temperaturas, predice que para el 2100 se podría perder la mitad del volumen de los glaciares ubicados en las montañas de todo el planeta (*Cortés, 2013*).

Este retroceso se le atribuye al cambio climático. El cambio climático, según el *IPCC (2007)*, se define como la “variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (decenios o más). Se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras”.

Una manera de identificar el retroceso glaciar en una zona es la presencia de morrenas. Los glaciares pueden considerarse ríos muy grandes de hielo que se mueven y transportan todo tipo de tierra y rocas que se acumulan. Una morrena es ese material (suelo y roca) dejado por un glaciar que retrocedió. Los glaciares moldean el paisaje en un proceso llamado glaciación. La glaciación puede afectar a la tierra, las rocas y el agua en una zona durante miles de años, el resultado de este proceso puede dar origen a las morrenas siendo estas a menudo antiguas. Las morrenas, según el sitio donde se halle depositado el material cercano al glaciar que ha retrocedido y que depende de la dinámica del glaciar y de su morfología, pueden ser de varios tipos: 1) morrenas laterales: se forman a lo largo de los lados de un glaciar, 2) morrenas mediales: se forman entre dos glaciares que se encuentran, 3) morrenas supra-glaciares: se ubican sobre la superficie del glaciar, 4) morrenas de fondo: se forman en el fondo del glaciar aparecen como láminas de terreno cubiertas de vegetación; y, 5) morrenas terminales: se forman al frente de lo que fuera el glaciar indicando la forma en que se movía (*Cogley et al, 2011*).

Para estudiar esta variación de la cobertura glaciar existen varias metodologías una de ellas es la teledetección espacial.

2.2. TELEDETECCIÓN ESPACIAL

La teledetección espacial es la técnica que adquiere información de la superficie terrestre o de elementos ubicados sobre la misma, desde sensores remotos instalados en plataformas espaciales que se encuentran a cierta distancia sobre la superficie de la tierra, sin mantener contacto directo con los mismos. Siendo necesario que entre el elemento en análisis y el sensor remoto exista una interacción energética de un haz natural (teledetección pasiva) o artificial (teledetección activa) que permita la reflexión y emisión de la señal sobre la superficie (*Chuvienco, 1990; Collet, 2010; Ponce, 2008*).

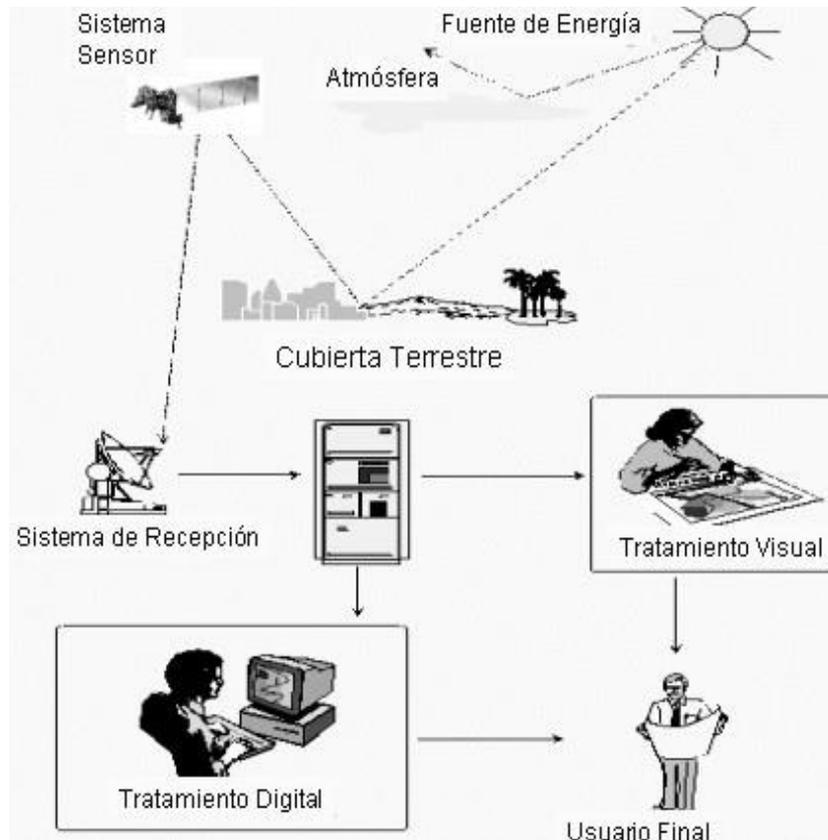
Los elementos que constituyen un sistema de teledetección espacial son los siguientes:

- Fuente de energía: es el origen del flujo energético, radiación electromagnética, sobre la cubierta que detecta el sensor, en este caso: el sol.
- Cubierta terrestre: es el conjunto de suelo, agua, construcciones humanas, vegetación o glaciares, que reciben la señal energética del sol y la reflejan o emiten. Parte de la señal original se dispersa y es absorbida por la atmósfera.
- Sistema sensor: se compone del sensor y plataforma espacial, tiene la función de captar, codificar, grabar y enviar, al sistema de recepción, la energía proveniente de la cubierta.
- Sistema de recepción y procesamiento: recibe la información sobre la energía almacenada en el sensor y la guarda en un formato apropiado como imágenes con oportunas correcciones para su distribución.
- Intérprete: analiza las imágenes digitales para extraer información temática o cuantitativa facilitando la evaluación del problema en estudio.
- Usuario final: analiza el documento obtenido tras la interpretación para entender las consecuencias que se podrían derivar y ayudar a resolver el problema (*Chuvienco, 1990; Collet, 2010; Ponce, 2008*).

La Figura 2.3 muestra un sistema de teledetección y los elementos que conforman este sistema:

FIGURA 2.3

ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL



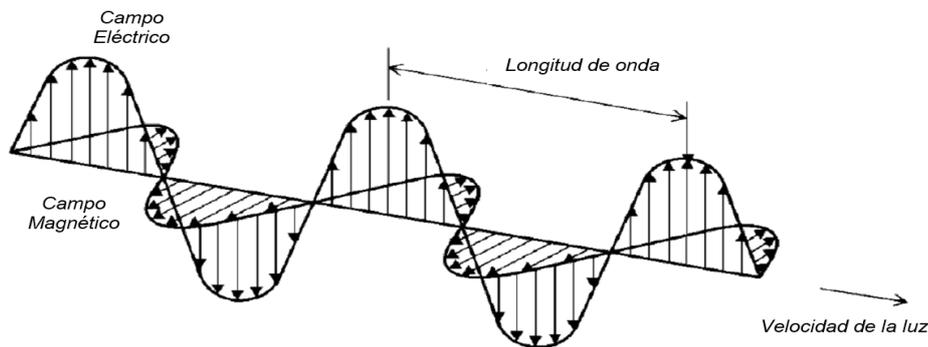
FUENTE: Palese y Cogliati, 2014.

2.2.1. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La radiación es uno de los procesos por el cual se transfiere la energía térmica. Según la Ley de Stefan Boltzman todo cuerpo con una temperatura mayor al cero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$) radia energía y ésta se incrementa con la temperatura. La radiación electromagnética se transmite de un lugar a otro en forma de ondas a la velocidad de la luz constituida de dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético, como se puede observar en la Figura 2.4. Este flujo se caracteriza por dos elementos: la longitud de onda (distancia entre dos picos sucesivos de una onda que puede medir de micrómetros

a kilómetros) y la frecuencia (es el tiempo que transcurre entre el paso de dos picos de una onda medida en ciclos por segundo o Hertzios). La energía radiante de un fotón es directamente proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la longitud de onda por lo que conocido el valor de uno de estos elementos se puede conocer el contenido energético (*Chuvienco, 1990; Collet, 2010; Ponce, 2008*).

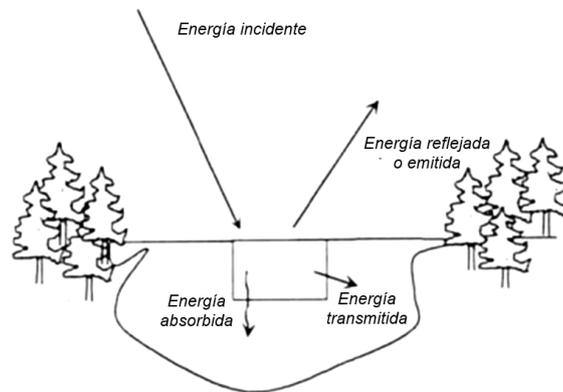
FIGURA 2.4
CAMPO ELECTROMAGNÉTICO



FUENTE: Modificado de Butler et al, 1988.

Otros terminos relacionados con la radiación, energía o flujo incidente (Figura 2.5.) sobre la superficie son: radiancia espectral, emisividad, reflectividad, absortividad y transmisividad. Según la superficie analizada estos términos suelen variar a determinada longitud de onda, y se representan como en tanto por ciento. La radiancia espectral es el total de energía radiada en una determinada longitud de onda detectada por el sensor. La emisividad es el valor de emitancia que tiene una superficie frente a la que ofrecería un cuerpo negro o emisor perfecto. Un cuerpo negro absorbe y emite toda la energía recibida a longitudes de onda corta, diferente a un cuerpo blanco que no absorben nada de la energía incidente sino que la refleja por completo, y un cuerpo gris absorbe y emite en forma constante en distintas longitudes de onda. En la naturaleza, lo más frecuente es que los cuerpos sean radiadores selectivos, es decir, su emisividad varia con la longitud de onda. La reflectividad, la absortividad y la transmisividad son respectivamente el flujo: reflejado, absorbido y transmitido por una superficie del total de flujo incidente o energía recibida (*Chuvienco, 1990*).

FIGURA 2.5
COMPORTAMIENTO DEL FLUJO INCIDENTE

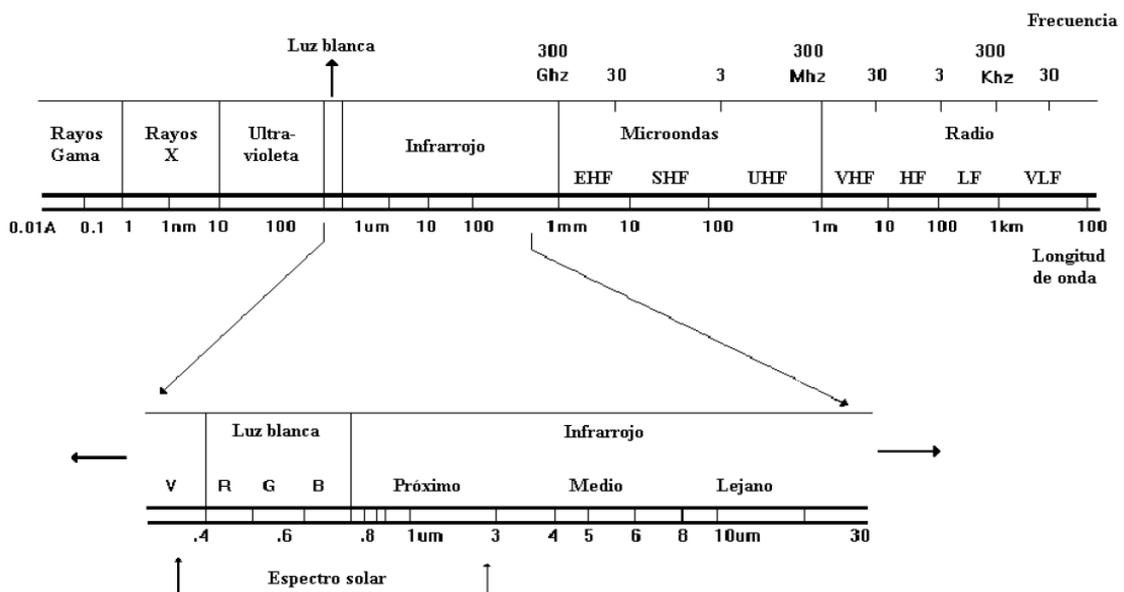


FUENTE: Modificado de Chuvieco, 1990.

2.2.2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Las longitudes de onda pueden ser cortas (rayos gamma, rayos X) y largas (microondas, radar, etc). En la teledeteccion es muy común establecer regiones o bandas donde la radiación electromagnética manifieste un comportamiento similar basándose en la longitud de onda y la frecuencia. Estas bandas se denominan como espectro electromagnético (Figura 2.6).

FIGURA 2.6
ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO



FUENTE: Ponce, 2008.

De estas bandas espectrales, las empleadas en teledetección, con sus respectivos intervalos de longitud de onda, son: espectro visible (0,4-0,7 micrómetros- μm), infrarrojo: próximo (0,7-1,3 μm), medio (1,3-8 μm) y térmico (8-14 μm), y microondas (a partir de 1mm).

El espectro visible es la única radiación electromagnética que el ojo humano puede percibir, se compone de tres bandas de los colores primarios: rojo (R-red), verde (G-green) y azul (B-blue), cuya composición da como resultado el color real. Entre otras características: penetran en el agua, tienen un gran efecto de dispersión atmosférica y en esta región la radiación solar es máxima por lo cual trabajan durante el día.

El infrarrojo próximo se utiliza mucho por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad. El infrarrojo medio es la región en donde existen procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre, al igual que en el infrarrojo próximo existe una alta reflectancia de la vegetación y permite obtener imágenes en condiciones nocturnas. El infrarrojo térmico permite detectar el calor procedente de las distintas cubiertas, la energía total que recibe el sensor es el resultado de la emitancia de la superficie en función de su temperatura. Las microondas atraviesan las nubes y permiten la obtención de imágenes tanto en el día como en la noche. Estas ondas son capturadas por sensores activos (*Chuvienco, 1990; Collet, 2010; Ponce, 2008*).

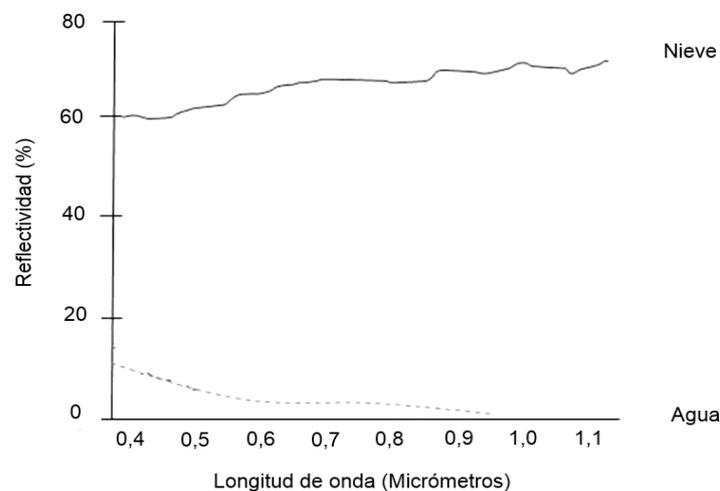
Dentro del estudio de glaciares el espectro visible y el infrarrojo próximo y medio se utilizan por capturar la reflectancia espectral de la superficie y para discriminar entre nieve de hielo, y hielo de otros materiales. Por ejemplo, la reflectividad es mayor para la nieve fresca que para la helada. Además, la nieve sucia muestra los valores más bajos de reflectividad. También permiten clasificar la nieve en función a la estacionalidad. En la región del infrarrojo próximo se puede diferenciar la nieve de las nubes. La región del infrarrojo térmico es utilizada para medidas de temperatura superficial, para identificar lagunas, glaciares cubiertos y estimar el espesor del hielo en el mar. Las microondas son utilizadas porque dentro de las mismas se

puede discriminar: la nieve y el hielo del agua y de la roca, el hielo nuevo del hielo antiguo en el mar. Se puede distinguir la nieve de los humedales y permite medir el tamaño de grano, densidad masa y sustratos (Basantes, 2013).

2.2.3. FIRMA ESPECTRAL

El comportamiento de las superficies es distinto en cada banda del espectro, esto permite realizar una discriminación entre superficies y obtener las llamadas firmas espectrales. Por ejemplo: la reflectividad de la nieve dentro del espectro visible es alta y constante reflejándose la mayor parte de la energía incidente, pero a longitudes largas como en el infrarrojo esta reflectividad disminuye. En cambio el agua absorbe en gran porcentaje esta energía resultando en un bajo porcentaje de reflectividad en el espectro visible (Figura 2.7). En el infrarrojo térmico la nieve tiene un valor de emisividad bajo contrario al agua cuyo valor de emisividad será alto (Chuvienco, 1990).

FIGURA 2.7
FIRMA ESPECTRAL DE LA NIEVE Y EL AGUA



FUENTE: Modificado de Chuvienco, 1990.

Los valores del flujo capturado pueden variar dependiendo de:

- El ángulo de iluminación solar o de incidencia que está relacionado con la fecha y hora de captura.

- Modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación (rugosidad del terreno, pendiente u orientación de laderas).
- Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética por la cobertura de nubes, la composición de gases principalmente del anhídrido carbónico, ozono y vapor de agua, y partículas atmosféricas en suspensión porque absorben la energía, dispersan determinados flujos y tienen su propia emitancia modificando la radiación original entre la cubierta y el sensor en determinadas bandas del espectro.
- Variaciones de la cubierta: asociaciones con otras superficies, homogeneidad, grado de cobertura del suelo, diámetro de los cristales de nieve, grado de compactación de la nieve, la impureza de la nieve o el hielo, etc.
- Ángulo de observación relacionado con: el ángulo de reflexión de la cobertura, la órbita del satélite (en el caso del satélite LANDSAT la órbita es polar) y las características del sensor (*Chuvienco, 1990*).

2.2.4. IMAGEN SATELITAL

La radiación electromagnética, como se explicó anteriormente, es captada por un sensor que se encuentra en una plataforma espacial a varios kilómetros de la superficie terrestre. La plataforma espacial se orienta a un sitio en una determinada hora y durante un rango de tiempo, siguiendo una trayectoria, rastrea o escanea una franja de terreno, y lo vuelve a realizar cada cierto período durante su tiempo de vida útil.

Los sensores dentro de su sistema detectan estas señales y las localizan en distintas bandas, como en el espectro electromagnético, traduciéndolas en un rango de valores de escala de grises. En el caso de LANDSAT, dependiendo del sensor, el rango está entre 0 (negro) a 64 (blanco) para el sensor MSS; de 0 a 255 para los sensores TM y +ETM; y, finalmente de 0 a 4096 para los sensores TIRS y OLI. Cada valor se denomina nivel o número digital (ND) y le corresponde a un pixel.

La imagen satelital es una agrupación de píxeles. Un píxel es la unidad mínima o el área mínima indivisible que se puede visualizar dentro de la imagen, cada uno de estos tendrán un número digital y localización espacial o coordenadas. Cada píxel encierra un área de la superficie que puede contener una cobertura homogénea o heterogénea, por lo tanto el número digital es un valor promedio de estas coberturas.

Existen distintas plataformas satelitales destinadas a diferentes objetivos y pueden ser clasificadas según su órbita. Los satélites de órbita geoestacionaria están a una altura de 35.000 km de la Tierra y giran alrededor de su eje, están destinados a la obtención de datos meteorológicos y climáticos. Dentro de esta clasificación se menciona a TIROS y METEOSAT. Los satélites de órbita polar pasan cerca de los polos a alturas de más de 400 a 900 km, y la información que recolectan está destinada al estudio de los recursos naturales. Entre ellos podemos mencionar a: LANDSAT, SPOT, RADARSAT, ALOS, entre otros.

El detalle de las imágenes satelitales dependerá de las resoluciones que presenten los sensores, éstas son:

- La resolución espacial está ligada al tamaño del píxel. Si éste es menor el detalle de la superficie observada será mayor y está relacionada con la escala de trabajo. Es muy importante en el análisis de cambios de cobertura porque solamente podrán discriminarse áreas mayores al tamaño del píxel.
- La resolución espectral es el número de bandas o el rango de longitudes de onda en los que el sensor capta la energía de la superficie, entre más bandas presenta un sensor se facilitará la caracterización espectral de las distintas coberturas.
- La resolución temporal es el período que le toma al sensor captar la imagen satelital de un mismo espacio geográfico, está relacionada con: la altura, la velocidad y la inclinación de la plataforma, al igual que el ángulo de observación y ancho de barrido del sensor. Para la detección de cambios de cobertura se deben tener en cuenta dos factores: la rapidez con que se produce el fenómeno

(puede ser horas o varios años) y la duración de los efectos del fenómeno, por lo tanto la resolución temporal del satélite es un factor muy importante.

- La resolución radiométrica es la capacidad que tiene un sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral. Como se explicó antes, estas variaciones se traducen en números digitales, útiles en la clasificación digital.

Toda esta información captada por el sensor pasa a un sistema de recepción para procesar los datos y guardarlos en un formato digital de imagen con sus respectivos metadatos. Los metadatos de la imagen son información de la misma para entender las limitaciones de su uso. Conocidas estas limitaciones se procederá al preprocesamiento y procesamiento de las imágenes. Estos tratamientos tendrán un análisis visual y digital bajo el uso de SIG.

Un SIG es un sistema de información compuesto por equipos (hardware), paquetes o programas (software) y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelar y representar datos georreferenciados, orientado hacia una finalidad específica. Los SIG y la teledetección están estrechamente relacionados por procesar información con un componente espacial (*Chuvienco, 1990*). Existen varios software comerciales o libres con versiones distintas (ENVI, IDRISI, ERDAS o ILWIS), especializados en el manejo de datos multidimensionales y su visualización, se diferencian de otros programas por contener funciones adaptadas al trabajo con información territorial o geográfica.

2.2.5. PRE-PROCESAMIENTO

El pre-procesamiento consiste en todas las correcciones previas a la interpretación que se realicen a las imágenes satelitales de distintos sensores para corregir distorsiones originadas por la plataforma, la rotación terrestre, el sensor o la atmósfera. Los receptores realizan estas correcciones en algunos casos y en otros el detalle de la imagen es suficiente en función del objetivo del estudio. Estas correcciones permiten determinar las coordenadas geográficas y comparar con una misma unidad de medida. Determinarán la fiabilidad de los resultados del procesamiento siendo necesario realizar una corrección geométrica y radiométrica.

2.2.5.1. Corrección geométrica

Es el cambio de posición que ocupan los píxeles de la imagen lo que permite corregir errores sistemáticos u otros de ajuste (*Chuvienco, 1990*). Es necesario para poder comparar con una misma unidad de medida entre áreas de distintos años, por lo tanto, todas las imágenes deben ajustarse.

La precisión de ajuste debe ser superior a 0,2 píxeles e inferior a 1 píxel para asegurar un error inferior al 10% en la comparación. Sin esta corrección geométrica de las imágenes, las superficies obtenidas supondrían cambios donde no existen. Para realizar el ajuste geométrico se debe tener una serie de puntos de control que se pueden obtener de información cartográfica base o de otra imagen que tenga una buena precisión geométrica. A partir de la información de referencia se toman puntos entre ésta y la imagen a la que se le realiza el ajuste, sobre rasgos comunes como elementos hidrológicos, caminos, casas, etc., esto dependerá de la resolución de la imagen (*Ponce, 2008*).

2.2.5.2. Corrección radiométrica

Es la técnica donde se modifican los números digitales originales para corregir distorsiones provocadas por la interacción con la atmósfera (principalmente por la presencia de partículas que afectan a la señal registrada) o problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor y asignarles el valor ideal del mismo rango espectral que deberían tener. En el caso del bandeo o "stripping" este se da por el mal funcionamiento del sensor y afecta el valor de los píxeles en una o más bandas espectrales y aparecen sobre la imagen satelital (*Collet, 2010*). Según las anomalías específicas detectadas sobre las imágenes satelitales se puede realizar: una restauración de líneas o píxeles perdidos, una corrección del bandeo de la imagen, una corrección atmosférica o una conversión de números digitales a parámetros físicos (*Chuvienco, 1990*).

En este caso, como el objetivo comprende una zona altamente reflectiva como es la nieve y el glaciar, se decidió realizar una corrección atmosférica aplicando el

Metodo de Chávez (1996) más conocido como Dark Object Substraction (DOS) que consiste en la corrección del histograma, de las imágenes satelitales, por sus valores mínimos o determinando los mismos desplazando cada banda de la imagen, considerando que los cuerpos con mayor absortividad, por ejemplo el agua o sombras, tienen una radiancia espectral muy próxima a cero, la cual varía según el espectro y se ve afectada por la interacción de la atmósfera. Este valor mínimo se debe restar del valor original situando el valor en el origen del histograma en cero y los demás píxeles se ajustan por la resta de este valor corrigiéndose la interacción atmosférica que afecta estos valores en cada banda (*Chavez, 1996*).

2.2.6. PROCESAMIENTO

Realizadas las correcciones descritas anteriormente, las imágenes satelitales de distintas fechas quedan ajustadas y sus valores digitales originales quedan homogeneizados para ser procesadas. El procesamiento se define como todas las técnicas aplicadas que permiten obtener resultados mediante la transformación de los datos de las imágenes satelitales estudiadas, satisfaciendo un objetivo para su posterior interpretación.

La técnica más adecuada será aquella que permita evadir los errores como omisión (carencia de información) y comisión (falsa alarma), disminuyéndolos en gran medida obteniendo resultados satisfactorios (*Ponce, 2008*). Se debe mencionar que en este caso de estudio, no se aplicaron realces o filtros a las imágenes debido a que la cobertura analizada, compuesta de glaciar y nieve, presenta una gran reflectancia uniforme en todas las bandas del espectro electromagnético. Al realizarse una clasificación digital, la aplicación de los mismos no es conveniente por cuanto su aplicación modifica la información original de los números digitales creándose una nueva imagen de salida, mejoran el análisis visual y digital en muchos casos.

2.2.6.1. Composición de color

Dentro de todo el proceso de la obtención de datos es muy importante el análisis

visual, la composición de color es la mezcla de tres distintas bandas de una imagen satelital a las cuales se les aplica cada uno de los tres colores primarios (R, G, B). La composición de estos colores se obtiene por dos procesos: aditivo (la suma de dos colores primarios obtiene un color complementario: cian, magenta o amarillo y la suma de los tres colores complementarios dan como resultado el blanco) y subtractivo (resulta de la absorción de la luz: roja, verde o azul, por parte de los colores complementarios y la mezcla de los tres se visualiza como negro). Lo más frecuente es aplicar al color rojo a una banda del infrarrojo próximo, al verde o al rojo la del infrarrojo medio, y el azul a una banda del visible (rojo o verde) (*Chuvienco, 1990*). Esta mezcla será seleccionada según un criterio y orden oportuno, lo que permite visualizar imágenes de los distintos espectros (bandas) y finalmente discriminar superficies de manera visual. Dentro de esta composición también se puede aplicar una banda artificial obtenida tras el cálculo de un índice (por ejemplo el NDSI-ver el acápite siguiente).

2.2.6.2. Índice de normalización diferencial de nieve (NDSI)

Para mapear o estimar la cobertura nival o glaciaria es necesario distinguir la misma de otras coberturas y de las nubes, y compensar los efectos de la atmósfera y de la superficie del terreno. El NDSI, por sus siglas en inglés, es la comparación de la información espectral de una banda frente a otra y su resultado permite obtener esta discriminación en forma de otra banda. En este caso la comparación se realiza entre una banda del espectro visible (Banda 2) y una del infrarrojo medio (Banda 5). En el espectro visible la nieve es altamente reflectiva (la banda 1 puede usarse para distinguir nieve en áreas con sombras), en el infrarrojo cercano es más absorbente, y dentro del rango 1,55 a 1,75 micrómetros (infrarrojo medio) existe una discriminación automática entre la nieve y las nubes manifestándose las nubes más brillantes que la nieve. Tomando en cuenta los valores de reflectancia aparente (R_p) de cada banda el cálculo del índice, ver ecuación (1), se realiza de la siguiente manera (*Dozier, 1989*):

$$NDSI = \frac{R_p \text{ Banda 2} - R_p \text{ Banda 5}}{R_p \text{ Banda 2} + R_p \text{ Banda 5}} \quad (1)$$

Si el resultado, de cada pixel, es mayor que el umbral de 0,4 significa que el área de ese pixel pertenece a una cobertura glaciaria o de nieve (*Dozier, 1989*). Se debe dar una previa conversión de números digitales a reflectividades, aunque algunos autores emplean directamente los números digitales de la imagen si no se pretende conceder un valor físico a los resultados, la valoración será relativa pero se mantendrá el principio del cálculo (*Chuvienco, 1990*).

2.2.6.3. Clasificación digital

La clasificación digital es el proceso de asignación de píxeles a clases o categorías según el valor de sus números digitales, que permite una interpretación. Esta clasificación como resultado es una nueva imagen donde cada uno de los píxeles originales se define por un número digital que identifica cada clase. Las clases pueden describir distintos tipos de cubierta o intervalos de una misma categoría. Las categorías no estarán definidas por un único número digital sino por una serie de números digitales generalmente próximos entre sí. El resultado de las clases son regiones sobre un mapa o una imagen que se presentan como un mosaico de parcelas uniformes cada una identificada por un color (*Chuvienco, 1990; Campbell, 1987*).

La clasificación digital puede ser supervisada o no supervisada. En la clasificación supervisada, el intérprete guía completamente la clasificación mediante la identificación de áreas que han sido reconocidas en campo y pertenecen a una categoría. La clasificación no supervisada es una identificación de grupos de píxeles mediante el uso de la información espectral del sensor en cada banda, esta clasificación se realiza utilizando un clasificador el cual sigue una serie de fases y permite obtener las distintas categorías según las instrucciones del intérprete.

El proceso de la clasificación no supervisada se da en cinco fases, de la siguiente manera (*Chuvienco, 1990*):

- (1) Se señalan una serie de centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el usuario.

- (2) Se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase más próximo.
- (3) Se calculan de nuevo los centros de clase, teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se hayan incorporado en la fase anterior.
- (4) Se vuelven a asignar todos los píxeles de la imagen al centro más cercano, el cual, debido al desplazamiento registrado anteriormente, no tiene por qué coincidir con la anterior asignación realizada en la fase (2).
- (5) Se vuelven a calcular los centros de clase, teniendo en cuenta las nuevas incorporaciones, y se retorna a la fase (4).

Después de la clasificación digital se puede realizar una reclasificación para agrupar categorías que pertenezcan a la clase de interés del estudio.

CAPÍTULO 3

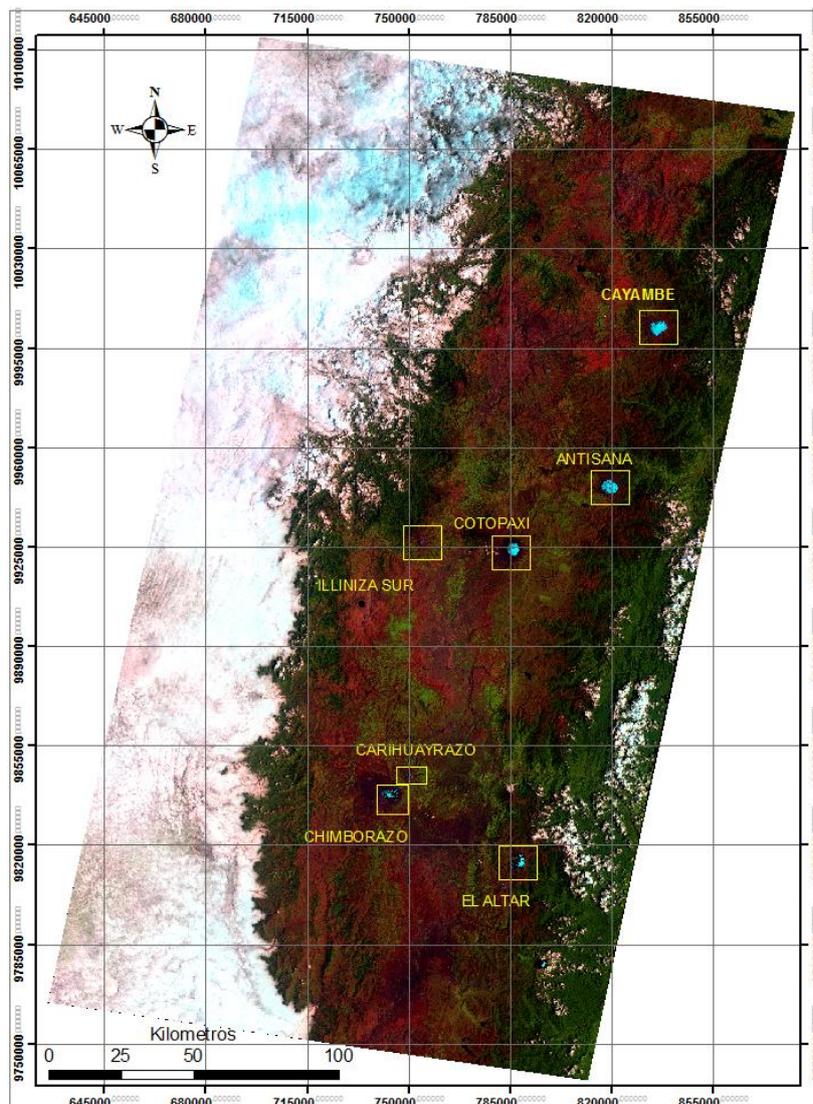
DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. DISTRIBUCIÓN DE GLACIARES EN EL ECUADOR

Actualmente, en Ecuador existen siete nevados cubiertos de glaciares cuya distribución se puede observar en la Figura 3.1:

FIGURA 3.1

DISTRIBUCIÓN DE GLACIARES EN EL ECUADOR



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

La Cordillera de los Andes es un sistema montañoso de América del Sur que se extiende entre los 11° de latitud Norte y los 60° de latitud Sur, tiene una extensión de alrededor de 7500 km y una altitud media del relieve de 4000 m.s.n.m. La Cordillera de los Andes se subdivide en las siguientes regiones: los Andes Septentrionales, los Andes Centrales y los Andes del Sur (Úbeda, 2011). La Cordillera de los Andes atraviesa el Ecuador de Norte a Sur y está representada por dos cadenas montañosas: la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental. Sobre la Cordillera Occidental se tienen tres casquetes glaciares: Illiniza Sur, Carihuayrazo y Chimborazo y sobre la Cordillera Oriental se ubican cuatro casquetes glaciares: Cayambe, Antisana, Cotopaxi y Altar (Jaramillo, 2012). De estos siete glaciares se ha escogido al nevado Cayambe para realizar el análisis de su retroceso.

3.2. ZONA DE ESTUDIO

El nevado Cayambe (Latitud: 00°1,72' Norte y Longitud 77°59,13' Oeste) se ubica en la Cordillera Oriental (Cordillera Real de los Andes Ecuatorianos) en el sector Norte del Ecuador a 60 km al Nor-Oriente de la ciudad de Quito y a 15 km al Oriente de la ciudad de Cayambe. Su altitud es de 5790 m.s.n.m., siendo la tercera montaña más alta del Ecuador (Samaniego et al, 2004). En la siguiente tabla se muestran las alturas de las consideradas altas montañas en Ecuador:

TABLA 3.1

ALTAS MONTAÑAS DEL ECUADOR Y ALTITUDES

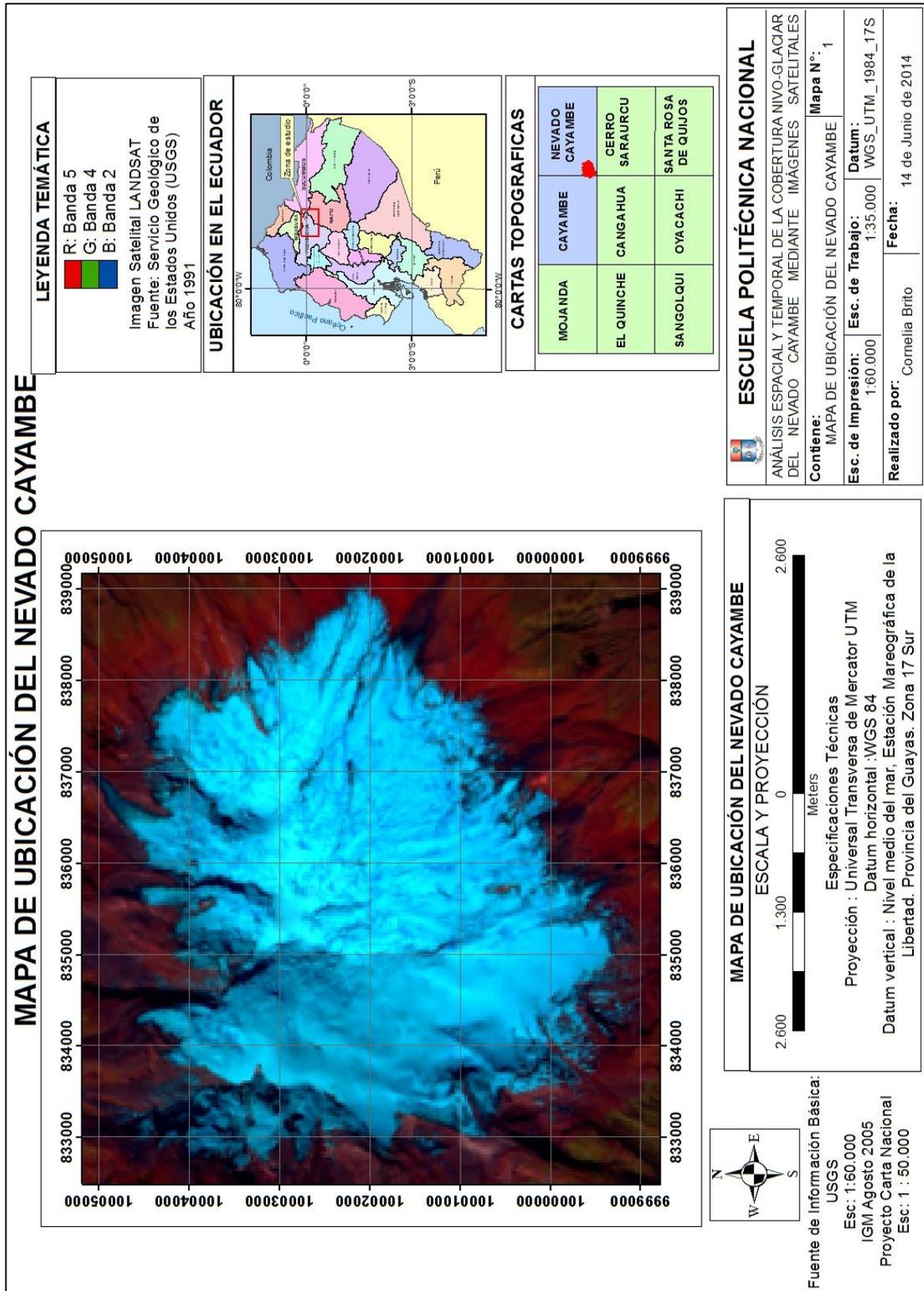
Nevados de Ecuador	Altitud (m.s.n.m)
Chimborazo	6310
Cotopaxi	5897
Cayambe	5790
Antisana	5758
Illiniza Sur	5263
Carihuayrazo	5020
Altar	5404

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

La Figura 3.2 muestra el Mapa de ubicación del nevado Cayambe.

FIGURA 3.2

MAPA DE UBICACIÓN DEL NEVADO CAYAMBE



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

El glaciar en estudio incluye la zona denominada "Glaciar Hermoso", el Bicentenario, el Ecuador y la arista Axis Mundi, el punto más alto de la tierra bajo la línea ecuatorial (4660m; ϕ 0° 00' 00", λ 47° 59' 40,9") (Montero, 2010).

Según Valencia (2014), en la zona de estudio de la cuenca del Río Blanco que se origina desde el glaciar del nevado Cayambe, existen dos estaciones lluviosas la primera entre marzo y abril, y la segunda entre octubre, noviembre y diciembre. Los caudales medidos por el autor durante el verano, que va de junio a septiembre en los cuales se producen menores niveles de precipitación, son elevados explicando que puede deberse a un trasvase hacia la cuenca que analizó. Esta información es confirmada por la Fundación Antisana (1998) que realiza una descripción de la Reserva Ecológica Cayambe- Coca, dentro de la cual se halla el nevado Cayambe en la parte occidental, mencionando que "durante la época denominada "seca", hay crecidas por la presencia de precipitaciones anormales en toda la región. Los caudales máximos se registran en los meses de junio y julio, para los ríos que se encuentran en regiones de alta montaña los caudales son casi constantes durante todo el año".

En cuanto a la caracterización de temperatura, Valencia (2014) menciona que los datos son muy escasos para realizar una interpolación que permita caracterizar la zona. Sin embargo, en la reserva se describen dos zonas climáticas: la zona de clima tropical mega-térmico muy húmedo y la zona de clima ecuatorial de alta montaña que se halla sobre los 3000 m.s.n.m. a la cual pertenece el nevado Cayambe donde las temperaturas máximas no sobrepasan los 20°C y las mínimas generalmente son menores a 0°C, con una humedad relativa de 80% (Fundación Antisana, 1998).

Estas condiciones se deben a la influencia de la vertiente este o Amazónica donde se da el efecto de barrera producido cuando las masas cargadas de gran humedad provenientes de la cuenca Amazónica chocan con la cordillera produciendo una descarga de una gran cantidad de humedad sobre los flancos, lo que da origen a precipitaciones que en este flanco (este) ocurren a menor altitud y mayor

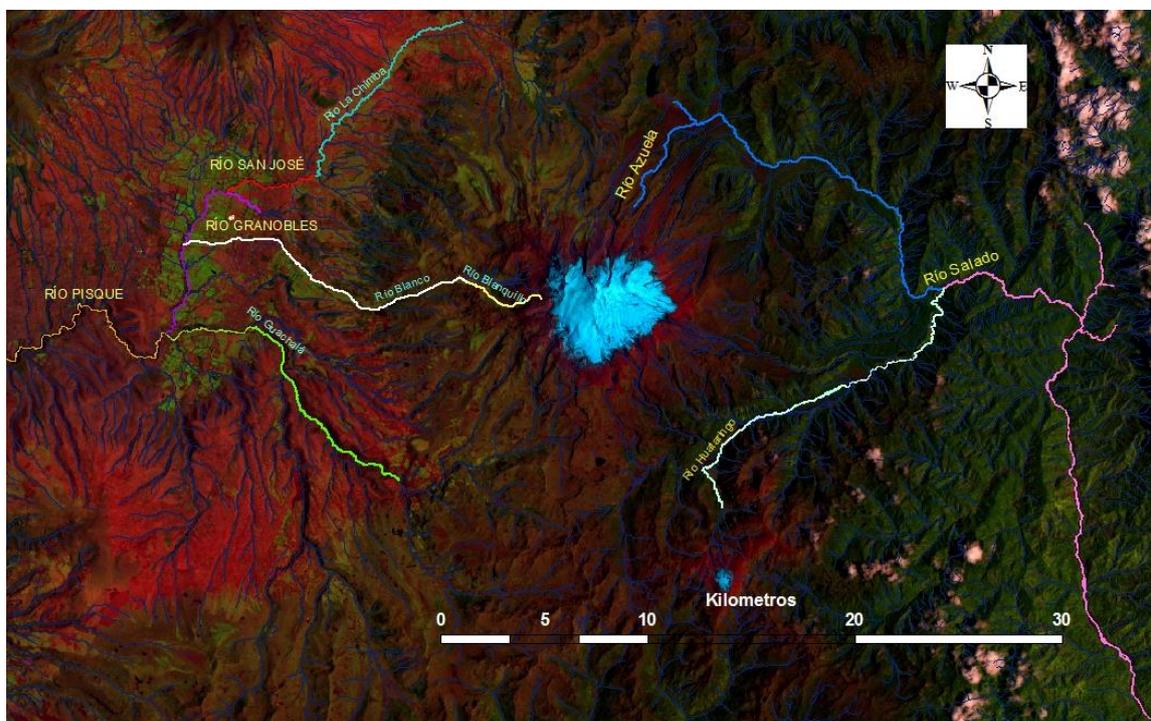
intensidad, este valor de humedad es mayor que el observado en el lado oeste influenciado por la vertiente Pacífica que es más seca (Cáceres, 2010).

El nevado Cayambe es uno de tres edificios sucesivos, se lo considera el edificio más joven o volcán potencialmente activo, de un complejo volcánico que se halla sobre una base aproximadamente rectangular de 24 km de Este a Oeste por 18 km de Norte a Sur, ubicada a una altura de 2800-3000 m.s.n.m. en la parte occidental y 3400-3800 m.s.n.m. en la parte oriental. La parte occidental de este complejo se caracteriza por pendientes suaves y valles profundos debido a la erosión glacial y su parte oriental tiene pendientes más acentuadas y su topografía es más accidentada. El nevado Cayambe está incluido en la parte oriental y es caracterizado como un estrato volcán compuesto por un complejo de domos en la cumbre. Observado desde el occidente, tiene la forma de un cono con pendientes fuertes y termina en una cima de forma plana (5790 m.s.n.m.), en cambio, observado desde el Norte se trata de un volcán compuesto de varias cumbres (Samaniego et al, 2004).

El nevado Cayambe se encuentra drenado por dos sistemas fluviales diferentes dirigidos hacia el Occidente con el río Pisque y hacia el Oriente con el río Salado. El río La Chimba, se forma de quebradas de la parte Nor-Occidental, luego toma los nombres de San José y posteriormente Granobles. La parte Sur-Occidental del volcán está limitada por el río Guachalá, que recibe los aportes de los numerosos drenajes del sector en especial del río Monjas. Entre los valles de la parte occidental destaca el profundo valle del río Blanco que desciende directamente de la cumbre del Nevado, atraviesa la ciudad de Cayambe y desemboca en el río San José, que a partir de ese punto se llama Granobles. La unión de los ríos Granobles y Guachalá ocurre al Sur de la planicie de Cayambe, originando el río Pisque que posteriormente forma el río Guayllabamba. Las quebradas de la parte Norte y Nor-Oriental del Nevado, forman el río Azuela y las quebradas de la parte Sur-Oriental forman el río Huataringo. La unión de estos dos drenajes dan origen al río Salado, que se dirige hacia la Amazonía para formar posteriormente el río Coca (Samaniego et al, 2004).

Las actividades productivas (agrícolas y ganaderas) que realiza la población de la ciudad de Cayambe y sus alrededores requieren del consumo de agua, por ello es importante el estudio del glaciar del nevado Cayambe que aporta, como está descrito, a ríos que alimentan a la población (por ejemplo el río Blanco). La Figura 3.3 muestra las distintas quebradas y los ríos de la parte Oriental y Occidental de la zona de estudio, elaborada con información cartográfica digital del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM).

FIGURA 3.3
QUEBRADAS Y RÍOS, ZONAS ORIENTAL Y OCCIDENTAL, NEVADO CAYAMBE



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

El nevado Cayambe se encuentra dentro de la RECA Y donde la clasificación vegetal dentro de la cordillera oriental se puede destacar por: Bosque Siempreverde Piemontano (600-1300 m.s.n.m.) (Sector Estribaciones de la Cordillera Oriental), Bosque Siempreverde Montano Bajo (1300-2000 m.s.n.m.), Bosque Siempreverde Montano Alto (3000-3500 m.s.n.m.), Bosque de Neblina Montano (3400-4000 m.s.n.m.), Páramo de Pajonal y Páramo Pantanoso (valles planos y profundos) (Sector Norte y Centro de la Cordillera Oriental), Matorral Húmedo Montano Alto

(Sector de las Cordilleras Amazónicas). Entre la fauna se pueden encontrar mamíferos como: osos de anteojos, lobos y zorros de páramo, pumas, gato andino, ciervo enano, una variedad de roedores de paramo y conejos de páramo; aves destacándose el cóndor andino, anfibios y réptiles (Coloma, 2007).

Para determinar las clases de coberturas que existen en la zona de estudio y realizar una posterior discriminación de las mismas en las imágenes satelitales, se realizaron visitas de campo donde se observaron varias formaciones vegetales destacándose: *Polylepis*, pajonales, musgos, almohadillas de paramo, helechos, senecios distribuidos en su mayoría sobre arenales o cercanos a rocas sobre las cuales existen líquenes. Cerca de la Laguna de San Marcos, ubicada al sector Norte del nevado Cayambe, que actualmente forma parte de una presa que desemboca en el Río Azuela como un sistema de riego para la ciudad de Cayambe, se visualizaron plantas llamadas “orejuelas”.

En general, alrededor del nevado Cayambe existen: arenales, montañas de rocas con zonas cubiertas de nieve y/o neviza, morrenas: terminales, laterales que son rocas, suelo o coberturas de vegetación, y en la parte Sur-occidental del nevado Cayambe cerca del glaciar se pueden hallar formaciones de lagunas (suelen estar congeladas). El glaciar muestra grietas, es abrupto y ciertas zonas son de difícil acceso, en las partes bajas del glaciar existen penitentes que son formaciones de hielo paralelas inclinadas hacia el Norte, muchos tienen una forma casi cónica, entre estos dependiendo de la hora del día se forman sombras. El glaciar tiene una coloración blanca y celeste; y cuando está cubierto por nieve, existe mucha reflectividad al interactuar con los rayos solares. Además, sobre la zona de estudio hay una constante incidencia de nubosidad, lo que muchas veces impidió la visibilidad completa del nevado Cayambe. En el Anexo 1 se presentan fotografías tomadas en la zona de estudio de las distintas coberturas descritas.

En cuanto a fauna, en la zona Sur-Occidental, se observaron cóndores, zorros de páramo, madrigueras de conejos, excrementos de ciervos enanos. Al lado Nor-Oriental se visitó un área donde se hallan osos de anteojos y en la parte Occidental existen haciendas por lo que también se observó ganado, caballos y rebaños.

También se visitó la ciudad de Cayambe donde la producción de los habitantes está relacionada con la elaboración de productos lácteos, la producción de rosas y productos agrícolas. Se pueden observar invernaderos y otro tipo de cobertura vegetal diferente a la nativa por los distintos sembríos entre los que se destacan: papas, habas, ocas, mellocos, trigo, etc. Además, existen plantaciones de eucalipto que han reemplazado a la vegetación nativa, por ejemplo en el área Occidental del río Blanco cerca de la ciudad de Cayambe.

CAPÍTULO 4

INFORMACIÓN DISPONIBLE Y METODOLOGÍA

4.1. INFORMACIÓN DISPONIBLE

Las imágenes satelitales que fueron utilizadas para el análisis pertenecen a la plataforma LANDSAT, la cual provee una serie de imágenes satelitales desde 1972 y tiene como misión la observación terrestre. LANDSAT es el nombre de una serie de 8 satélites de órbita casi polar (de Norte a Sur). El primer satélite de esta serie fue lanzado en 1972, el segundo en 1975, el tercero en 1978, el cuarto en 1982, el quinto en 1984, el sexto en 1993 (pero fallo en su lanzamiento), el séptimo en 1999 y el octavo en 2013 (*Pons, 2012*).

La altitud de observación y resolución temporal en los tres primeros satélites (LANDSAT 1-3) era de alrededor de 917 km y revisitaba cualquier punto de la Tierra cada 18 días realizando una órbita completa alrededor de la Tierra cada 103 minutos y su horario de paso por el Ecuador era a las 9:30 AM. Los siguientes satélites (LANDSAT 4-8) tienen una altitud de observación de 705 km, su tiempo de revisita es cada 16 días realizando una órbita completa cada 98,9 minutos, su paso por Ecuador es a las 10:00 AM (*Pons, 2012*).

Los satélites LANDSAT, dependiendo de su año de lanzamiento, capturan las imágenes mediante distintos sensores que llevaban a bordo como el MSS (Multi Spectral Scanner), TM (Thematic Mapper), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor), los satélites LANDSAT 1-5 llevaban a bordo el sensor MSS, LANDSAT 4-5 el sensor TM, LANDSAT 7 el ETM+ y el último LANDSAT 8 lleva a bordo dos sensores OLI y TIRS (*Pons, 2012; USGS Earthexplorer*). A continuación la Tabla 4.1 muestra las características de los sensores de LANDSAT como: el ancho de barrido, el tamaño de escena capturada y sus resoluciones:

TABLA 4.1
CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES LANDSAT

Sensor	Resolución espectral (micrómetros)	Resolución espacial (m)	Resolución radiométrica (Bits)	Ancho de Barrido (km)	Tamaño de Escena (km)
MSS	Banda 4: 0.50-0.60 Banda 5: 0.60-0.70 Banda 6: 0.70-0.80 Banda 7: 0.80-1.10	80	6	180	180 x 170
TM	Banda 1: 0.45-0.52 Banda 2: 0.52-0.60 Banda 3: 0.63-0.69 Banda 4: 0.76-0.90 Banda 5: 1.55-1.75 Banda 6: 10.4-12.5 Banda 7: 2.08-2.35	30 y 120 (la termal o Banda 6)	8	185	170 x 183
ETM+	Banda 1: 0.450-0.515 Banda 2: 0.525-0.605 Banda 3: 0.630-0.690 Banda 4: 0.760-0.900 Banda 5: 1.550-1.750 Banda 6: 10.40-12.50 Banda 7: 2.080-2.350 Banda 8: 0.520-0.920	30, 15 (la pancromática o Banda 8) y 60 (la termal o banda 6)			
OLI	Banda 1: 0.43-0.45 Banda 2: 0.45-0.51 Banda 3: 0.53-0.59 Banda 4: 0.64-0.67 Banda 5: 0.85-0.88 Banda 6: 1.57-1.65 Banda 7: 2.11-2.29 Banda 8: 0.50-0.68 Banda 9: 1.36-1.38	30 y 15 (la pancromática o Banda 8)	12		
TIRS	Banda 10: 10.60-11.19 Banda 11: 11.50-12.51	Adquiridas a 100 y se remuestrean a 30			

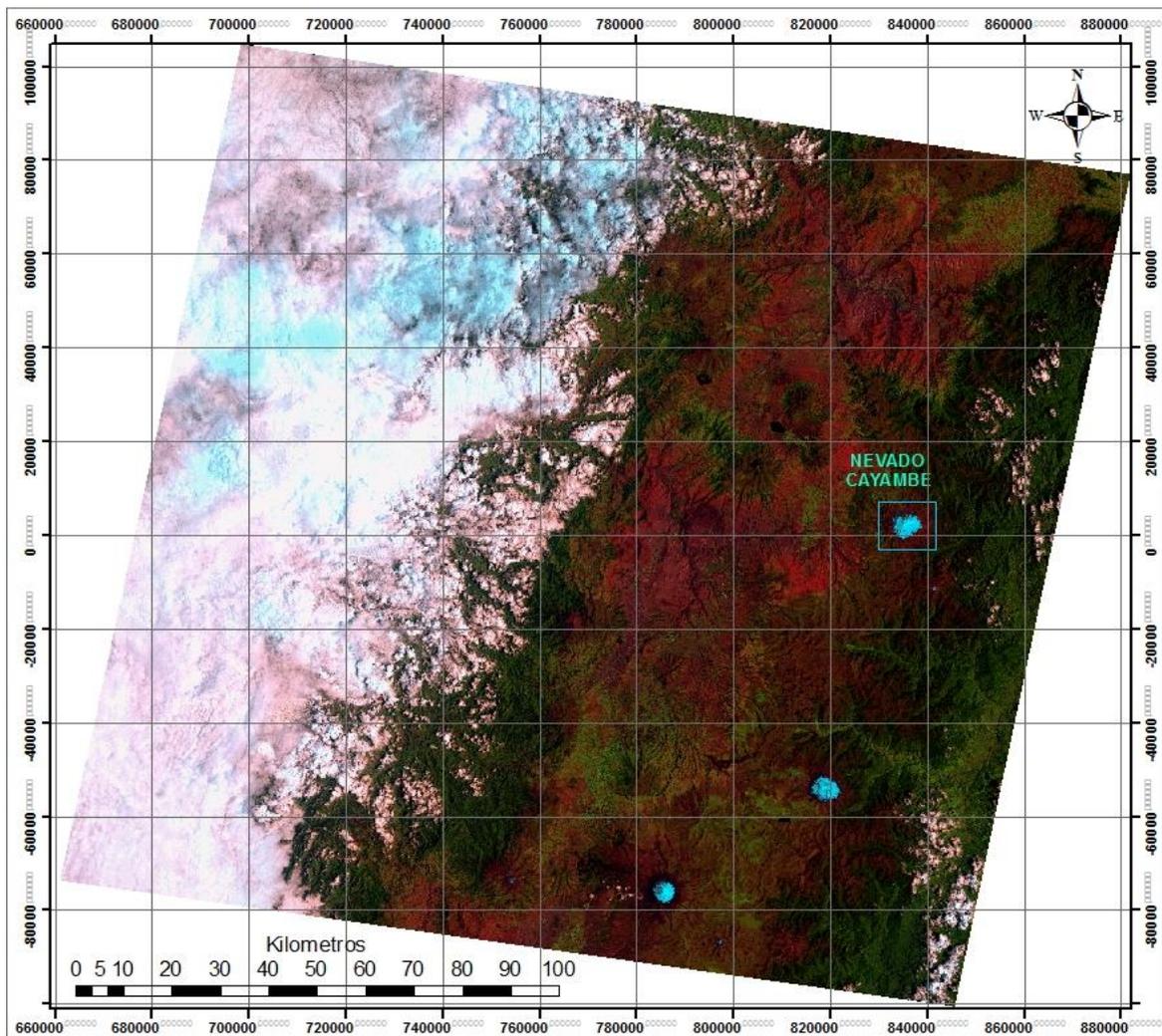
FUENTE: USGS Earthexplorer, 2013.

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Para cuantificar la variación de superficie nivo-glaciar del nevado Cayambe, se utilizaron imágenes satelitales LANDSAT, que fueron descargadas del sitio web

EarthExplorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Coordenadas: Path: 10; Row: 60); cada escena cubre un área mayor a 30.000 km² del Ecuador, dentro de la cual se halla la zona del nevado Cayambe en el cuadrante superior derecho de cada imagen descargada, como se puede observar en la Figura 4.1.

FIGURA 4.1
IMAGEN SATELITAL LANDSAT, AÑO 1991



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

De un total de 92 imágenes satelitales Landsat (período 1977-2009) que el Laboratorio de Aerofotogrametría y Sensores Remotos (LafSER) de la Escuela Politécnica Nacional descargó, se escogieron seis imágenes (debido a las condiciones climáticas de la zona de estudio, la nubosidad, entre otras) de los años

1979, 1991, 1999, 2002 y 2009 (2 imágenes) de los sensores: MSS, TM y ETM+, según los siguientes factores: fecha de toma (los meses con menor precipitación de agosto a abril), cobertura de nubes (%) sobre el área de estudio, nivel de procesamiento geométrico y superficie glaciar visible (%) las que se presentan en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2

IMÁGENES SATELITALES LANDSAT USADAS EN EL ANÁLISIS

Identificador Escena Landsat	Nivel de procesamiento o geométrico	Fecha de adquisición	Nubosidad cuadrante superior derecho (%)	Datum/Zona UTM /Orientación
LM20100601979035AAA05	-	04/02/1979	50	-
LT50100601991288XXX02	L1T	15/10/1991	0	WGS84 17 N
LE70100601999318EDC00	L1T	14/11/1999	9,70	WGS84 17 N
LE70100602002102EDC00	L1T	12/04/2002	22,23	WGS84 17 N
LE70100602009137EDC00	L1T	17/05/2009	46,01	WGS84 17 N
LE70100602009249ASN00	L1T	06/09/2009	18,01	WGS84 17 N

FUENTE: USGS EarthExplorer, 2013.

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Además, con la ayuda de dos fotografías aéreas del año 2009 y dos imágenes satelitales Landsat del mismo año se pudo realizar la digitalización del contorno glaciar para este año. En el Anexo 2, se pueden observar las escenas de las imágenes satelitales Landsat utilizadas para el análisis en una composición de color 542 para 1991-2009 y de 654 para el año de 1979 y las dos fotografías aéreas del año 2009 (RC-30 R-111 COLOR, L-12: 5825, 5826).

4.2. METODOLOGÍA

Para el presente estudio se realizó una recopilación y revisión de información bibliográfica sobre los principios básicos de la teledetección y de casos de estudio donde se han realizado análisis, de cambios de coberturas vegetal o glaciar, mediante el uso de imágenes satelitales (*Basantes, 2010; Calispa, 2012; Collet, 2010; GEOPLADES, 2009; Pasapera, 2012; y Ponce, 2008*). Las metodologías revisadas establecen un tratamiento digital general para las imágenes aplicándose

en este análisis, por lo que, las imágenes satelitales Landsat pasaron por el siguiente pre-procesamiento y procesamiento: corrección geométrica (esto se aplicó únicamente la imagen satelital del año 1979), corrección atmosférica, cálculo del NDSI (Índice de Normalización Diferencial de Nieve), clasificación no supervisada, vectorización, cálculo de las áreas y del porcentaje de retroceso. Para el tratamiento de las imágenes satelitales se utilizaron los programas: ENVI y otro software SIG.

Se debe aclarar que, para las imágenes satelitales del año 2009 se efectuó el mismo procedimiento pero, por el bandeo presente en las mismas, se escogió la clasificación no supervisada directa para una posterior vectorización y digitalización del contorno glaciar, trabajándose con sus valores digitales originales con los que se obtuvieron mejores resultados. Sin embargo, se presentan los resultados de los números digitales mínimos utilizados para realizar la corrección atmosférica y NDSI calculados que fueron determinados para procesar las imágenes como todas las demás.

4.2.1. PRE-PROCESAMIENTO

4.2.1.1. Corrección geométrica

Las imágenes satelitales Landsat de los años: 1991, 1999, 2002 y 2009, tienen un nivel de procesamiento geométrico Standard Terrain Correction (Level 1T- L1T), es decir un nivel de corrección geométrica, realizada desde la plataforma de recolección, en donde se ha usado puntos de control sobre el terreno y un modelo de elevación digital. Es decir que, las imágenes descargadas de esos años, están ajustadas o corregidas geoméricamente.

Para comprobar el nivel de procesamiento se revisaron los metadatos de las imágenes y se re-proyectó la información cartográfica digital (Tabla 4.3) descargada del Geoportal del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM), que originalmente tenía el datum WGS84 17S al datum de las imágenes satelitales WGS84 17N, al sobreponer las curvas de nivel, ríos, cotas, etc, se verificó que coincidían y se

ajustaban sobre la zona de estudio, por lo que no se realizó una corrección geométrica de esas imágenes.

TABLA 4.3
INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL

Cartas Topográficas	Escala/Formato
CANGAHUA_8417S	1:50.000 / SHP
CAYAMBE_8417S	1:50.000 / SHP
CERRO_SARAURCU_8417S	1:50.000 / SHP
NEVADO_CAYAMBE_8417S	1:50.000 / SHP

FUENTE: Geoportal del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM), 2013.

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

La imagen satelital del año 1979 no tenía este nivel de corrección por lo que se la georreferenció a partir de una imagen satelital Landsat (1991) con un nivel de procesamiento L1T. La imagen del año 1979 tiene un tamaño de pixel de 80 metros por tratarse del sensor MSS y la que se utilizó como base tenía un tamaño de pixel de 30 metros.

El ajuste geométrico de la imagen del año 1979 se realizó en el programa ENVI escogiendo las opciones: Map-Registration-Select GCPs: Image to Image, después se escogió como “Base Image” la imagen georreferenciada y como “Warp Image” la imagen del año 1979. A continuación, se procedió a seleccionar e introducir los puntos de control (GCP-Ground Control Points) con la opción “Add Point” basándose en rasgos comunes, entre las dos imágenes, como uniones de ríos, lagunas, caminos, etc, (al momento de escoger los puntos de control las imágenes tenían una composición de color de 1979: 654 y 1991: 432). El RMSE se pudo observar seleccionando “Show List” que muestra la tabla de valores de los puntos de control que se guardó dirigiéndose a File-SaveGCPs to ASCII.

En la Tabla 4.4 se muestran los GCP y el RMSE obtenidos.

TABLA 4.4

TABLA DE PUNTOS DE CONTROL (GCP)

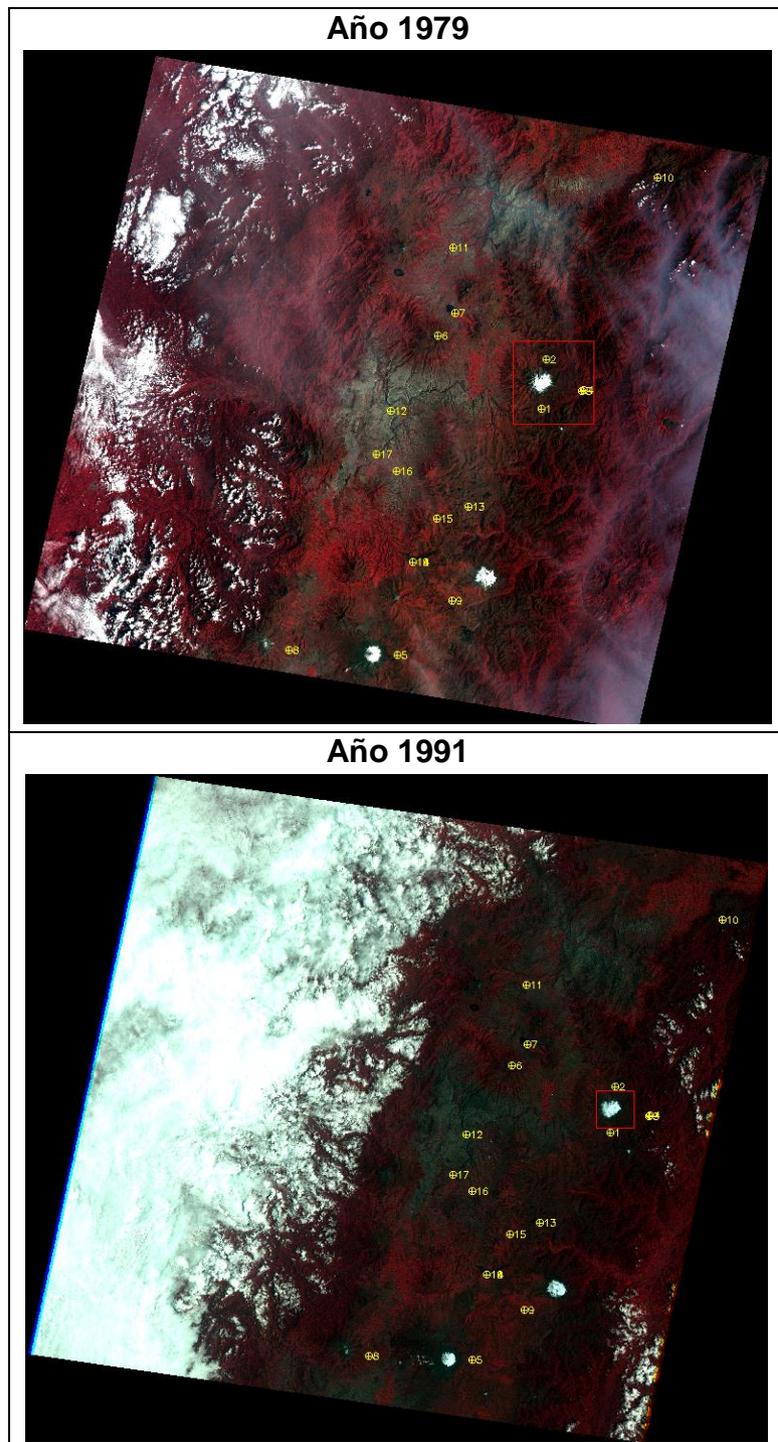
Punto	Base X	Base Y	Warp X	Warp Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
1	6012,00	3721,00	2598,00	1729,00	2598,51	1728,74	0,51	-0,26	0,57
2	6061,67	3246,17	2623,00	1492,00	2622,87	1490,95	-0,13	-1,05	1,05
3	6410,00	3550,00	2798,00	1643,00	2798,00	1643,63	0,00	0,63	0,63
4	6426,00	3541,00	2806,00	1639,00	2806,02	1639,15	0,02	0,15	0,15
5	4598,00	6076,00	1891,00	2906,00	1891,76	2905,95	0,76	-0,05	0,76
6	5000,00	3022,00	2090,00	1377,00	2089,91	1377,27	-0,09	0,27	0,29
7	5164,00	2810,00	2172,00	1271,00	2171,94	1271,32	-0,06	0,32	0,32
8	3532,33	6032,33	1357,00	2882,00	1356,96	2882,24	-0,04	0,24	0,24
9	5130,00	5558,00	2159,00	2647,00	2158,11	2647,46	-0,89	0,46	1,00
10	7162,00	1515,00	3173,00	625,000	3172,88	624,980	-0,12	-0,02	0,13
11	5148,00	2189,00	2163,00	960,000	2163,19	960,300	0,19	0,30	0,35
12	4530,00	3741,33	1855,00	1737,00	1854,92	1736,83	-0,08	-0,17	0,19
13	5292,67	4654,00	2238,57	2194,86	2238,67	2194,99	0,10	0,13	0,16
14	4747,33	5185,67	1965,86	2460,57	1965,65	2460,38	-0,21	-0,19	0,28
15	4982,33	4775,67	2082,86	2255,43	2083,09	2255,44	0,23	0,01	0,23
16	4591,00	4322,00	1886,00	2028,00	1886,21	2027,67	0,21	-0,33	0,39
17	4391,00	4159,00	1785,86	1946,00	1785,66	1945,76	-0,2	-0,24	0,31
18	4747,33	5185,67	1965,86	2460,57	1965,65	2460,38	-0,21	-0,19	0,28
Total RMSE									0,49

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Para registrar la imagen georreferenciada se seleccionó la opción, Options-WarpFile (as Image to Map) en este paso se ingresó la imagen del año 1979, en la siguiente pantalla se escribieron todos los parámetros de la imagen como: el tamaño del pixel, proyección, método de ajuste, etc. Finalizado este proceso se introdujo un nombre de salida de la imagen para guardarla. El ajuste geométrico se realizó con un total de 18 puntos de control (GCP) obteniéndose un RMSE de 0,49 precisión que es válida (*Chuvienco, 1990*), quedando corregida geoméricamente.

En la Figura 4.2 se muestra la distribución de los GCP sobre la imagen de 1979 y la de 1991.

FIGURA 4.2
DISTRIBUCIÓN DE LOS GCP



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

4.2.1.2. Corrección atmosférica

A continuación, se aplicó el método de Chávez (1996) que consiste en la

Sustracción de Cuerpos Oscuros (Dark Object Subtraction-DOS). Para ello se revisó el histograma de los números digitales y cada banda de las imágenes satelitales a corregir determinándose para cada banda para la aplicación del método. Los valores más bajos muchas veces pertenecen a sombras o a cuerpos de agua que se visualizan en las imágenes satelitales. Este método se utilizó para corregir la disminución del contraste en la imagen satelital y la degradación de los contornos, generadas por la dispersión de partículas sobre la atmósfera. En la Tabla 4.5 se muestran los valores mínimos de número digital determinados para cada imagen satelital.

TABLA 4.5
NÚMEROS DIGITALES MÍNIMOS DETERMINADOS PARA APLICAR DOS

Año	ND mínimo						
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
1979	-	-	-	9	10	7	3
1991	59	26	20	25	17	-	5
1999	52	32	21	18	11	-	9
2002	46	34	23	16	15	-	12
2009/05/17	34	20	19	15	9	-	6
2009/09/06	33	22	16	16	11	-	8

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Después de determinar el número digital mínimo en cada banda, en el software ENVI se realizó la corrección dirigiéndose a: Basic Tools – Preprocessing - General Purpose Utilities - Dark Object Subtract, se ingresó el número digital mínimo para cada banda y una dirección de salida para guardar la imagen, los datos corregidos se pueden observar desplegando el histograma de los números digitales.

4.2.2. PROCESAMIENTO

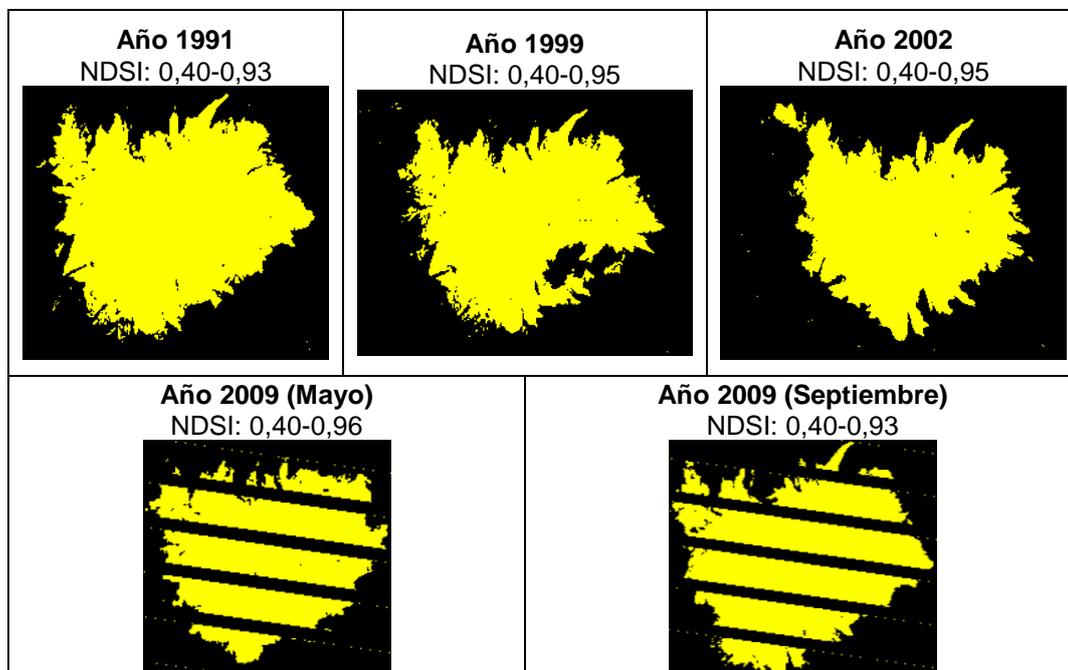
4.2.2.1. Índice de Normalización Diferencial de Nieve (NDSI)

Para el cálculo del Índice de Normalización Diferencial de Nieve (NDSI), se realizó una comparación de la información espectral de una banda frente otra, en este caso para la cobertura nivo-glaciar se operaron las bandas 5 y 2 pertenecientes al

espectro visible e infrarrojo medio, respectivamente. En el programa ENVI, primero se transformaron los números digitales de las bandas a operarse en valores de reflectividad esto se lo puede realizar en: Basic Tools-Preprocessing-Calibration Utilities-Landsat Calibration, aquí se escogieron las bandas que se van a operar. Después se procedió a realizar la operación de la siguiente manera: Basic Tools-Band Math- Formula: “(float (B2) - float (B5))/(float (B5) + float (B2))”, se seleccionaron las bandas y como resultado se tuvo otra banda que muestra los valores del NDSI calculado. El índice pudo ser calculado en los años 1991, 1999 y 2002 debido a su resolución espectral y que a diferencia del año 2009 no tienen el problema del bandeo. Los valores de NDSI se encuentran dentro del rango de 0,40 a 0,95 delimitando la cubierta nivo-glaciar. En el año 1999 en el lado sur-oriental existían nubes sobre el glaciar dando un resultado distinto en los valores del NDSI, en la Figura 4.3 se muestran las delimitaciones automáticas obtenidas del NDSI:

FIGURA 4.3

CLASIFICACIÓN DE LOS RANGOS DE NDSI



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

La banda del NDSI en este análisis sirvió para obtener una delimitación de la cobertura nivo-glaciar, a partir de la misma no se obtuvieron los contornos glaciares,

sino que esta banda fue incorporada como una séptima banda para obtener una mejor clasificación digital en el procesamiento. Mediante una clasificación "Density Slice" se separó la cobertura nivo-glaciar determinándose el rango que encierra a la misma, esto se realizó sobreponiendo la clasificación obtenida sobre cada imagen satelital que tenía una composición de color (combinación de bandas en RGB) 542, siendo esta una de las combinaciones más usadas en el estudio de glaciares. Después de verificar los valores que se ajustaban a la cobertura nivo-glaciar y teniendo en cuenta lo que Collet (2010) y Basantes (2010) describen en sus trabajos al calcular el NDSI; el rango que se ajustó a esta delimitación perteneció a los valores mayores que 0,40 y dando una idea de la geometría del glaciar para una posterior digitalización.

4.2.2.2. Clasificación no supervisada, vectorización y delimitación manual

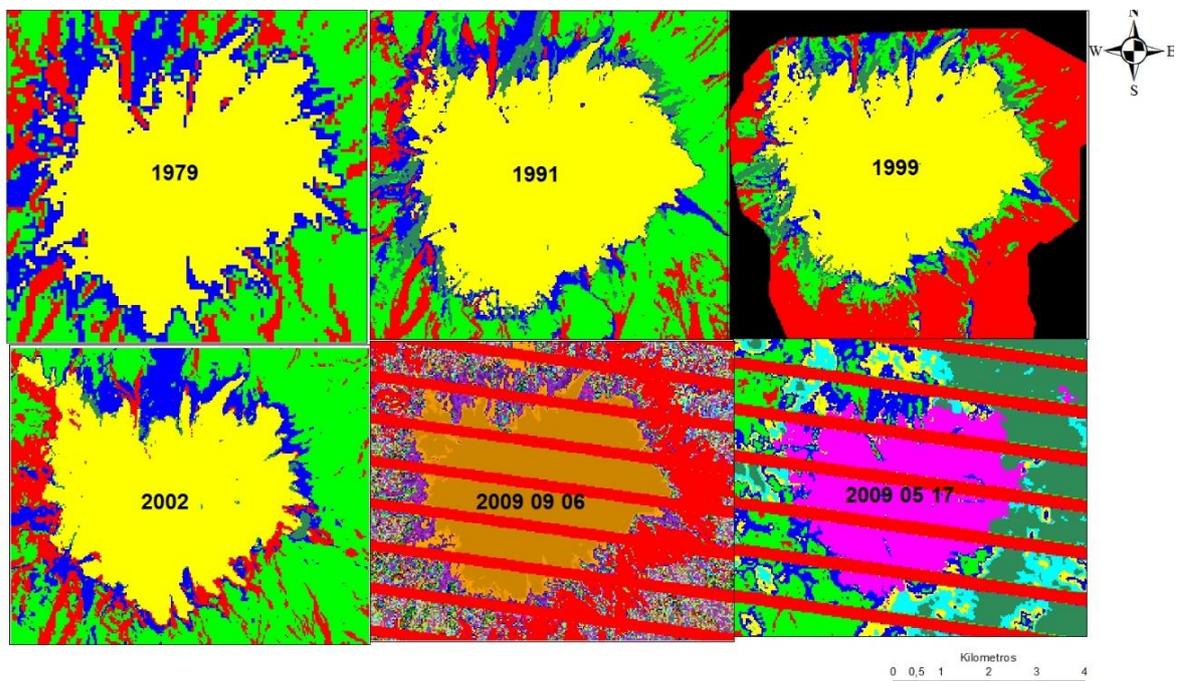
Después de haber realizado las respectivas correcciones y obtenidos los valores del NDSI, se procedió a:

- Incorporar la banda del NDSI de los años 1991, 1999 y 2002 a cada una de las respectivas imágenes satelitales mediante la opción "layer stacking" del programa ENVI que permite formar un grupo de bandas, en el caso de los años 1979 y 2009 no se realizó este paso.
- Trazar un polígono cuadrado para cortar las imágenes satelitales en una zona común y reducir el área a clasificar, para ello se utilizó información cartográfica digital del índice de cartas topográficas escogiéndose las pertenecientes a Cayambe y Nevado Cayambe.
- Trazar polígonos sobre nubes cercanas a la cobertura nivo-glaciar para evitar confusiones entre las clases de coberturas, porque muchas veces las nubes se clasifican como nieve o glaciar por tener una respuesta espectral similar, a este proceso se lo denomina enmascarar nubes pues se cubren las mismas y después se las extrae de la imagen, para que al momento de la clasificación digital no sean tomadas en cuenta.

A partir de los polígonos, trazados en SIG, se cortaron las imágenes satelitales y se realizó una clasificación no supervisada de todas las bandas. Se debe mencionar que durante el procesamiento no se utilizó la banda del pancromático por tener diferente resolución espacial. Se escogió una clasificación no supervisada por la resolución espectral de las imágenes satelitales (número de bandas del espectro electromagnético) porque permite realizar una mejor discriminación automática de clases aprovechando la información de los números digitales. Además, garantiza que las áreas de distintas categorías no se superpongan (Basantes, 2013).

Esta clasificación no supervisada se realizó en el programa ENVI utilizando las opciones Classification-Unsurpevised-IsoData. Se modificaron los parámetros como número de clases (en la zona de estudio se observaron arenales, glaciar, nieve, nubes, vegetación de paramo, entre otras), iteraciones, y también se realizaron pruebas para determinar la clasificación que se ajustaba mejor a la cobertura nivo-glaciar. En la Figura 4.4 se muestran las clasificaciones obtenidas.

FIGURA 4.4
CLASIFICACIONES OBTENIDAS



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Tras realizar la clasificación, se obtuvieron las clases que caracterizaban las coberturas por un color diferente, para determinar cuál pertenecía a la cobertura nivo-glaciar se procedió a:

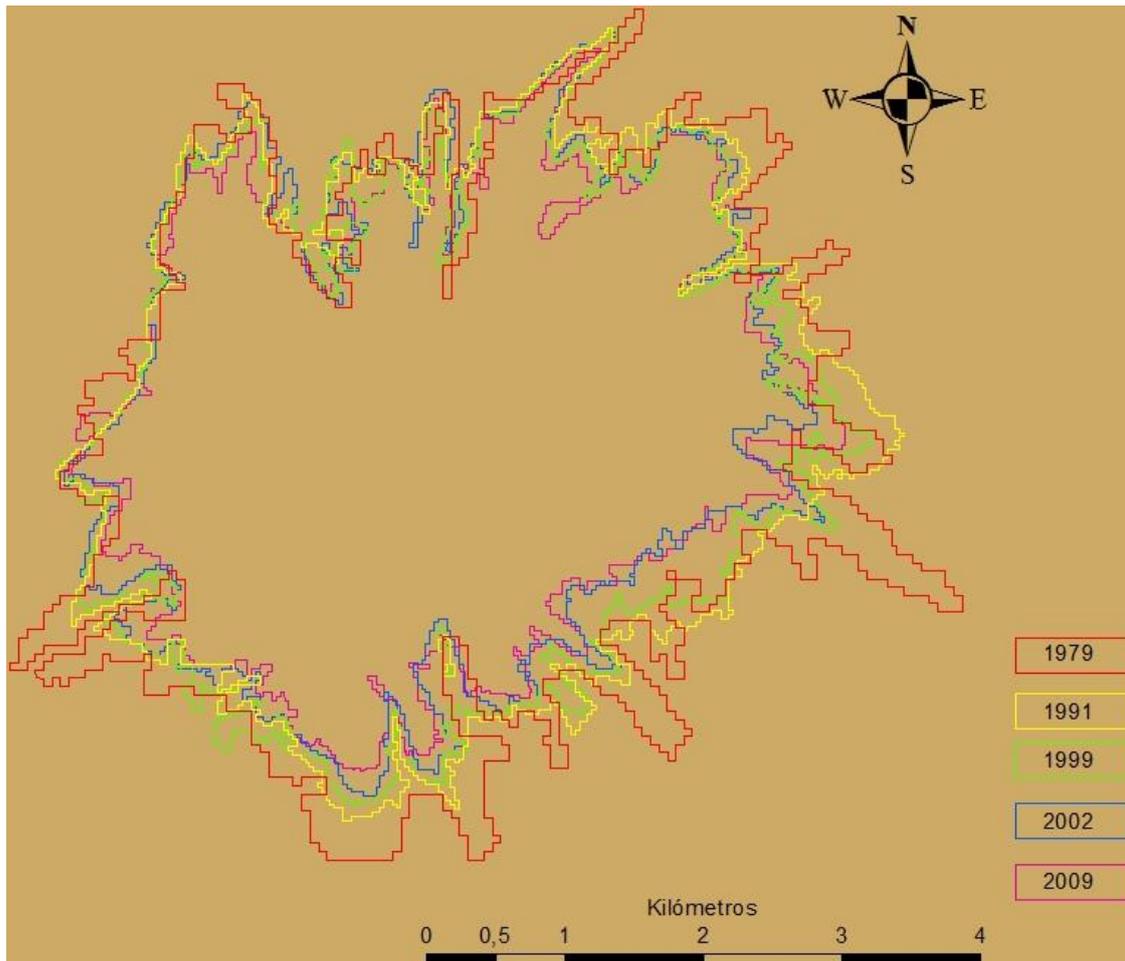
- Realizar una composición de bandas con las imágenes satelitales de la siguiente manera para el año 1979: 654, y para los años 1991, 1999, 2002 y 2009: 542, esta composición permitió visualizar la cobertura nivo-glaciar y discriminarla del resto de coberturas presentes en las imágenes.
- Sobreponer cada una de las clases a las imágenes satelitales para determinar las pertenecientes a la cobertura deseada.
- Unir las categorías que pertenecían y se ajustaban a la cobertura nivo-glaciar mediante una reclasificación.

Posterior a la reclasificación, con el programa ENVI se escogió y guardó en un formato raster las clasificaciones, para obtener el contorno nivo-glaciar de cada año, se vectorizaron los rasters, es decir se cambió a un formato vector mediante la opción Vector-Raster to Vector, que es el formato EVF. Después se exportaron del formato EVF a SHP para poder delimitar de manera manual, en un programa SIG, los contornos que fueron obtenidos automáticamente. En esta delimitación se usaron nuevamente las imágenes satelitales como base para determinar de manera visual la cobertura y ajustar los contornos anteriormente exportados.

En cuanto a la delimitación manual realizada, para la imagen de 1979 se realizaron tres combinaciones de bandas distintas para determinar el contorno nivo-glaciar, y la que permitió una mejor visualización fue la 654. Mientras que, las otras combinaciones (745 y 476) también fueron utilizadas, para visualizar y discriminar entre el glaciar y otras coberturas. Los contornos vectoriales obtenidos de las dos imágenes del año 2009 resultaron en superficies separadas debido al bandeo, a pesar de esto se notó que el mismo afectaba a distintas zonas, pero con el análisis visual de las dos fotografías aéreas del mismo año se pudo tener una continuidad en la delimitación manual del contorno nivo-glaciar.

Después, se calcularon todas las superficies de los contornos en el programa SIG. A continuación, en la Figura 4.5 se pueden observar los contornos obtenidos tras el procesamiento.

FIGURA 4.5
CONTORNOS GLACIARES (PERÍODO 1979-2009)



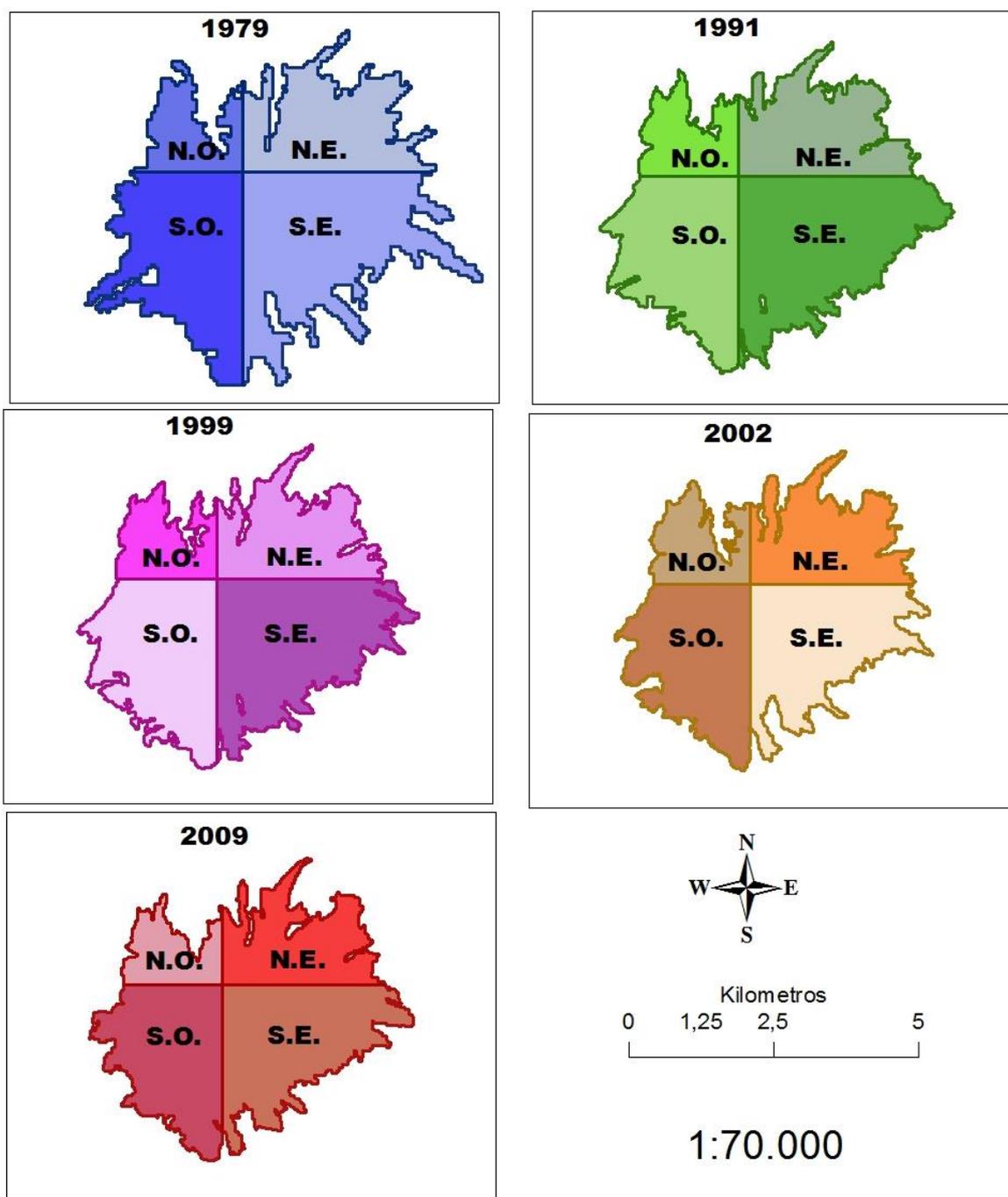
ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Además, se delimitaron cuatro zonas cuyo punto central fue la cota superior del nevado Cayambe. Finalmente, se trazaron 19 lenguas glaciares para lo cual se determinaron como puntos de origen las dos elevaciones superiores del nevado Cayambe, de 5790 m.s.n.m. y la otra de 5477 m.s.n.m., se utilizó un modelo digital de elevaciones para determinar su forma, realizado a partir de curvas de nivel y cotas, y una fotografía aérea del año 1999 (Gallegos, 2014) tratada digitalmente.

En las figuras 4.6 y 4.7 se pueden observar: las zonas y lenguas glaciares delimitadas.

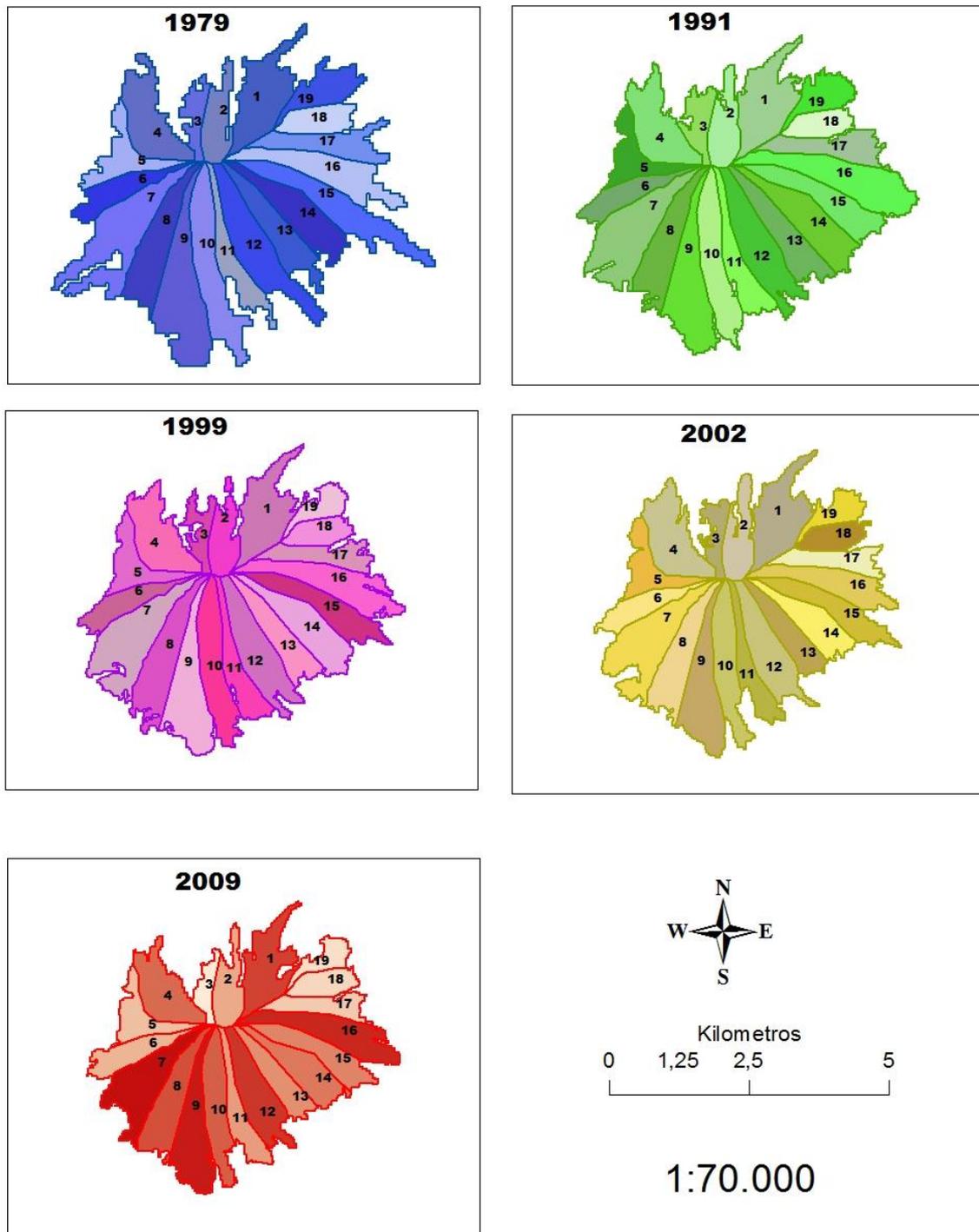
FIGURA 4.6

ZONAS DEL GLACIAR DEL NEVADO CAYAMBE (TOTAL: 4)



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

FIGURA 4.7
LENGUAS GLACIARES (TOTAL: 19)



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

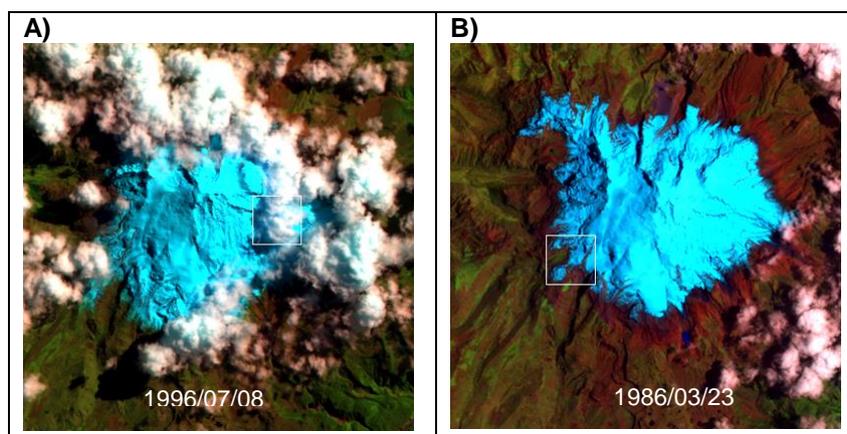
5.1. RESULTADOS OBTENIDOS POR TELEDETECCIÓN

5.1.1. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

La zona de estudio, por su ubicación, está influenciada por el régimen climático de la cuenca Amazónica que afecta al régimen de precipitaciones (*Calispa, 2012*), razón por la cual la superficie glaciar del nevado Cayambe, en la mayoría de las imágenes satelitales LANDSAT, se halla cubierta en gran porcentaje por nubes, las mismas que cubrían los márgenes glaciares, lo cual no permite digitalizar la superficie. Existe un reducido número de imágenes en las que se puede ver completamente el glaciar libre de nubes, a pesar de esto, entre muchas de las mismas se podía notar que la cobertura de nieve era mayor que la superficie glaciar. En la Figura 5.1 se puede observar un ejemplo de lo descrito anteriormente.

FIGURA 5.1

A) ALTA NUBOSIDAD SOBRE EL GLACIAR, B) SUPERFICIE NIVAL > SUPERFICIE GLACIAR



FUENTE: USGS Earthexplorer, 2013.

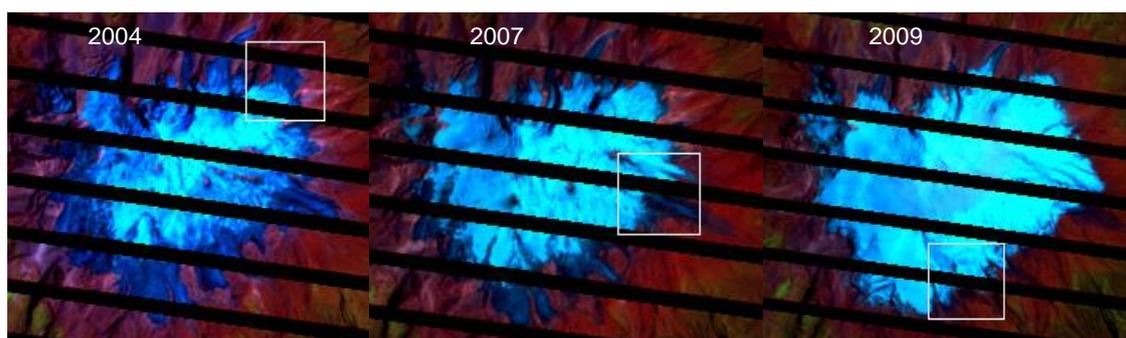
ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Las imágenes utilizadas fueron tomadas durante los meses más lluviosos, sin embargo dos de estas imágenes (las de los años 2002 y 2009) pudieron ser utilizadas en el proceso por no verse tan afectadas por la nieve.

A partir de los años 2003 a 2009 (se descargaron imágenes hasta ese año), las imágenes satelitales LANDSAT capturadas por el sensor ETM+ presentan un problema de bandeo, la zona de estudio no es una excepción y se puede observar un bandeo sobre la superficie glaciar como se muestra en la Figura 5.2, sin embargo, se pudieron incorporar dos imágenes del año 2009 porque, como se explicó en el cuarto capítulo, el bandeo no afectaba a las mismas zonas y se tenían dos fotografías aéreas de este año para realizar la digitalización.

FIGURA 5.2

BANDEADO SOBRE IMÁGENES SATELITALES



FUENTE: USGS Earthexplorer, 2013.

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

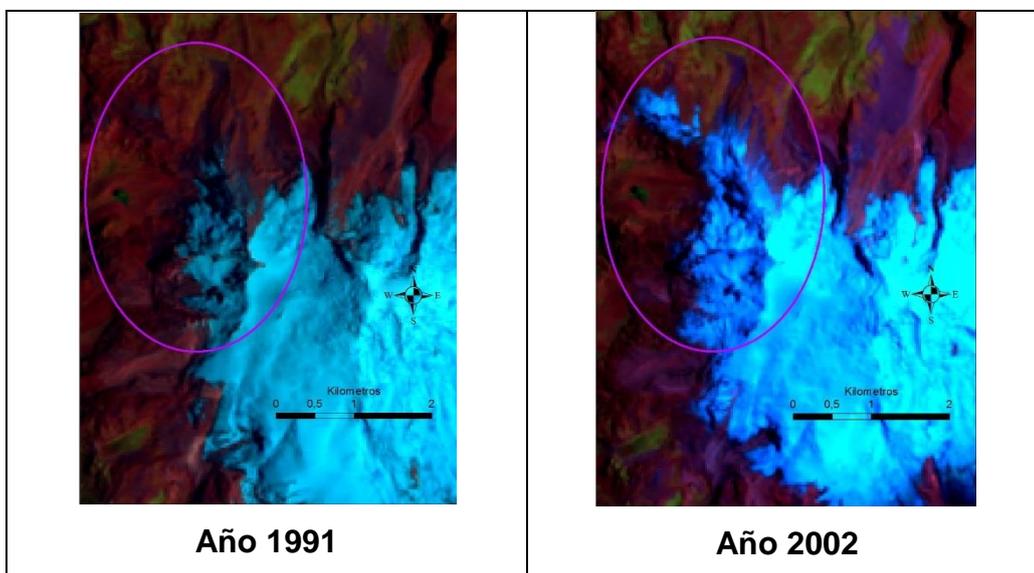
Por las razones señaladas en el anterior capítulo, se trabajó con un reducido número de imágenes en las que se podía observar el glaciar en su totalidad.

De la bibliografía consultada y tras un análisis visual de las imágenes, se tiene que, si se identifican campos de nieve dentro de la zona de estudio los mismos deberían ser excluidos del análisis del glaciar (*Racoviteanu, 2008*). Debido a la acumulación de nieve en la parte Noroeste del nevado Cayambe y a la resolución espacial, que por su detalle no permitió una buena discriminación entre glaciar y nieve en esta parte, se decidió no incluirla para no afectar los resultados de las superficies. En

otras zonas fue posible discriminar la nieve y sombras (formadas sobre el glaciar por nubes, niebla o entre grietas) del glaciar.

En la Figura 5.3 se puede observar una comparación de la acumulación de nieve en esta zona de los años 1991 y 2002, en estas figuras se puede notar, de manera visual, el retroceso del glaciar que se tiene del año 1991 al 2002 pero en la zona Noroeste en el año 2002 se visualiza como la nieve se extiende sobre el terreno alejándose del límite glaciar.

FIGURA 5.3
ACUMULACIÓN DE NIEVE EN LA PARTE NOR-OCCIDENTAL



FUENTE: USGS Earthexplorer, 2013.

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

La imagen del año 1979 no tiene un rango amplio de resolución espectral debido a las características de su sensor, sin embargo, la combinación de sus bandas, como se mencionó, permitió la discriminación y digitalización del contorno glaciar.

5.1.2. SUPERFICIES DE LOS CONTORNOS NIVO-GLACIARES Y TASA DE RETROCESO

Los resultados de las superficies obtenidos para los distintos años analizados y el porcentaje de retroceso se muestran en la Tabla 5.1:

TABLA 5.1**SUPERFICIE Y PORCENTAJE DE RETROCESO GLACIAR (1979-2009)**

Año	Superficie glaciar (km²)	Porcentaje de retroceso
1979	20,64	-
1991	19,32	6,40
1999	17,94	13,08
2002	16,51	20,01
2009	15,36	25,58

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Mediante el uso de las imágenes satelitales LANDSAT, durante un período de 30 años (1979-2009) analizados, se ha obtenido un retroceso glaciar del 25,58%. A partir de estos resultados, se estima una tasa de recesión glaciar anual de 0,853 %/año (0,176 km²/año). Notándose la reducción del glaciar del nevado Cayambe.

En el Anexo 3 se encuentra el mapa con los contornos y superficies nivo-glaciares obtenidos después de la digitalización y cálculo.

A partir de fotografías aéreas pertenecientes a los años 1978 y 1999, las cuales fueron tratadas digitalmente, en el análisis de variación de la cobertura nivo-glaciar del nevado Cayambe de Gallegos (2014), los resultados muestran una recesión de 25,53 %. Las fotografías aéreas tienen un mayor detalle a comparación de las imágenes satelitales. Sin embargo, ambas permiten el análisis de cambios de cobertura, en el estudio antes mencionado se ha tomado en cuenta la parte noroeste que en este proceso no se pudo incluir, pero los datos presentados confirman la reducción de la superficie nivo-glaciar.

También se presentan en las tablas 5.2 A) y 5.2 B), las superficies y los porcentajes de retroceso obtenidos de las cuatro zonas y las diecinueve lenguas glaciares trazadas para determinar cual han sufrido una mayor recesión.

TABLA 5.2

SUPERFICIE Y PORCENTAJE DE RETROCESO DE A) LAS ZONAS Y B) LAS LENGUAS GLACIARES (1979-2009)

A)

Año	Superficies de las zonas (km2)			
	SO	SE	NO	NE
1979	6,19	7,82	1,99	4,64
1991	5,48	7,37	2,09	4,38
1999	5,49	6,63	1,97	3,86
2002	5,11	5,38	2,06	3,96
2009	4,71	5,40	1,69	3,56
% de Retroceso	23,96	30,97	14,88	23,22

B)

Año	Superficies de las lenguas glaciares 1-10 (km2)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1979	1,31	0,71	0,40	1,21	0,76	0,66	1,80	1,19	1,81	1,49
1991	1,33	0,72	0,51	1,17	0,68	0,65	1,60	1,10	1,45	1,26
1999	1,20	0,64	0,41	1,12	0,70	0,65	1,56	1,22	1,37	1,20
2002	1,25	0,73	0,42	1,21	0,68	0,60	1,47	1,08	1,26	1,05
2009	1,04	0,64	0,32	0,99	0,63	0,63	1,21	1,02	1,15	1,00
% de retroceso	20,10	9,39	21,52	17,80	17,51	3,75	32,83	14,30	36,69	32,72
Tasa de retroceso (%/año)	0,7	0,3	0,7	0,6	0,6	0,1	1,1	0,5	1,2	1,1
Tasa de retroceso (km2/año)	0,0087	0,0022	0,0029	0,0072	0,0045	0,0008	0,0197	0,0057	0,0222	0,0163

Año	Superficies de las lenguas glaciares 11-19 (km2)								
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1979	0,77	1,47	0,99	1,11	1,43	1,27	0,89	0,62	0,72
1991	0,79	1,35	1,00	1,18	1,04	1,53	0,83	0,52	0,61
1999	0,75	1,27	0,87	1,12	0,99	1,25	0,67	0,51	0,44
2002	0,67	1,12	0,71	0,84	0,89	0,94	0,63	0,50	0,45
2009	0,65	1,07	0,68	0,87	0,84	1,14	0,59	0,51	0,38
% de retroceso	16,34	27,66	31,16	21,95	41,66	10,69	34,10	17,91	46,84
Tasa de retroceso (%/año)	0,5	0,9	1,0	0,7	1,4	0,4	1,1	0,6	1,6
Tasa de retroceso (km2/año)	0,0042	0,0136	0,0103	0,0081	0,0199	0,0045	0,0101	0,0037	0,0113

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

5.2. DISCUSIÓN

5.2.1. RESULTADOS DE OTROS ESTUDIOS EN LOS GLACIARES TROPICALES DE ECUADOR

En el Ecuador existen estudios sobre la reducción de glaciares tropicales como: Illiniza Sur (*Febres, 2007*), Antisana, Cotopaxi y Chimborazo (*Basantes, 2010*; *Cáceres, 2010*; *Collet, 2010*; *Calispa 2012*).

Febres (2007) usando fotografías aéreas, estudió el retroceso del glaciar del nevado Illiniza Sur para el período 1956-2000 obteniendo un retroceso de la cobertura nivo-glaciar del 41%. En el estudio de Basantes (2010), en el Antisana, concluye que el glaciar 12 “Los Crespos” perdió el 30% y 15 (a, ß) el 40% de su superficie total, en el período de 1956-2007.

En el inventario de tres casquetes glaciares (Cotopaxi, Chimborazo y Antisana) realizado por Cáceres (2010), la reducción es de: en el Cotopaxi es del 42% para el período de 1976-2006, en el Chimborazo es del 59,8% para el período de 1962-1997 y para 1997-2006 el porcentaje promedio de reducción es del 20,2% y en el caso el Antisana de 1956-1997 es del 50,8% con una proyección de 1997-2006 del 22,5%. Collet (2010) en su estudio de los glaciares del Cotopaxi y Antisana como tasa aproximada de reducción de los dos glaciares reporta un porcentaje en el orden de 38-40% de retroceso glaciar para el período de 1979-2007, datos que son confirmados en el estudio de Calispa (2012) para el período de 1979-2007 mostrando una reducción del 42% para el Cotopaxi y del 39% para el Antisana.

Además, Cáceres (2010) en su estudio realiza una proyección al año 2006 de la reducción glaciar promedio de los casquetes glaciares en Ecuador, basándose en los resultados que obtuvo en los casquetes de su análisis, obteniendo un área total de todos los glaciares (Illiniza, Carihuayrazo, Chimborazo, Cayambe, Antisana, Cotopaxi y Altar) de 60,6 km², con un posible error de 4,6% en esta estimación, lo que significa un orden de reducción entre 30-50% en los glaciares tropicales del Ecuador en el período de 1976-2006 (*Franco et al, 2011*).

Análisis de la variación glaciar mediante imágenes satelitales entre 1979-2007 en el Antisana y el Cotopaxi muestran que en la segunda parte del período, aproximadamente a partir de 1990 (especialmente en el Antisana 12 y 15) el retroceso glaciar se vio incrementado pero que durante 2000-2008 estos tuvieron un pequeño avance que dan como resultado un balance de masa positivo (*Rabatel et al, 2013*).

Los autores de los estudios mencionados han utilizado técnicas de teledetección y fotogrametría para obtener las superficies glaciares, sumando a sus estudios datos climatológicos y en muchos de los casos, técnicas de monitoreo del glaciar (balance de masa), atribuyendo la reducción glaciar al cambio climático dado en Ecuador durante sus períodos de estudio o a la configuración espacial del glaciar.

En cuanto a la metodología aplicada, Collet (2010) evalúa la precisión del método mediante el cálculo del error de la superficie glaciar (ver ecuación 2) relacionado con la resolución espacial (m) del sensor y el perímetro (m) del contorno glaciar (total, lengua o zona glaciar), después calcula el error relativo (ver ecuación 3) en función del error calculado anteriormente (km²) y la superficie (km²) del contorno glaciar (sea esta total, de la lengua o de la zona glaciar). Propone entonces el cálculo de la siguiente manera:

$$\epsilon_{Si} = \frac{1}{2} * P_i * TP_i / 1000000 \quad (2)$$

Donde,

ϵ_{Si} = error de la superficie de la superficie del glaciar del año i, en km².

P_i = perímetro del glaciar del año i, en m.

TP_i = tamaño del pixel de la imagen utilizada del año i, en m.

Y,

$$\sigma_{Si} = \epsilon_{Si} / St_{oti} \quad (3)$$

Donde,

σ_{Si} = error relativo de la superficie del año i, en %.

St_{oti} = superficie total del glaciar del año i, en km² (Collet, 2010).

Sus resultados muestran errores relativos, para un pixel de 80 m, de 24 % y, para un pixel de 30 m, de 5-15 %, concluyendo que los mismos son satisfactorios para la resolución que presentan las imágenes satelitales.

Estos errores fueron calculados de la misma manera y se presentan a continuación en la tabla 5.3.

TABLA 5.3

ERROR RELATIVO ESTIMADO PARA EL CALCULO DE SUPERFICIES GLACIARES DEL NEVADO CAYAMBE (1979-2009)

A) ERROR RELATIVO: CORTORNOS GLACIARES

Años	1979	1991	1999	2002	2009
Error relativo (%) contornos glaciares	12,5	3,8	4,9	4,7	4,5
Error relativo promedio (pixel: 80m) =	12,5 %				
Error relativo promedio (pixel: 30m) =	4,5%				

B) ERROR RELATIVO: ZONAS GLACIARES

Zonas	Error relativo (%)				
	1979	1991	1999	2002	2009
Suroeste	12,8	4,3	4,9	4,4	4,6
Sureste	15,5	4,3	5,3	5,5	5,2
Noroeste	26,5	8,2	10,5	9,8	8,9
Noeste	19,3	6,8	8,2	7,8	8,4
Error relativo promedio (pixel: 80m) =	18,5%				
Error relativo promedio (pixel: 30m) =	6,7%				

C) ERROR RELATIVO: LENGUAS GLACIARES

Años	Error relativo (%) de las lenguas glaciares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1979	26,0	32,3	52,4	23,8	39,7	34,8	29,7	23,7	20,5	24,9
1991	9,7	12,1	15,7	8,7	14,3	13,5	8,7	10,8	9,0	9,3
1999	10,6	13,7	25,5	9,0	13,4	13,9	9,7	11,1	9,8	9,6
2002	10,2	13,8	21,6	8,6	14,4	13,8	9,8	10,4	9,4	10,5
2009	13,4	12,9	18,1	9,1	15,4	13,8	9,8	10,2	10,4	10,9
Años	Error relativo (%) de las lenguas glaciares									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1979	43,4	23,2	29,3	25,4	30,1	26,5	34,3	24,8	34,6	
1991	13,4	9,2	10,2	8,7	10,2	8,2	12,9	10,3	13,5	
1999	14,3	9,2	10,5	9,1	11,5	12,0	14,7	10,9	17,4	
2002	15,6	9,2	11,0	10,5	12,1	11,2	14,0	11,2	15,9	
2009	15,2	9,3	11,4	10,4	11,5	10,4	14,4	10,5	17,3	
Error relativo promedio (pixel: 80m) =	30,5%									
Error relativo promedio (pixel: 30m) =	12,0%									

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Los resultados promedio del error relativo para un pixel de 80 m (año 1979) están alrededor de 12-30 %, para un pixel de 30 m (años 1991-2009) están dentro de 4-12 % los cuales podemos decir que como en el estudio del Collet (2010) son válidos para la metodología utilizada.

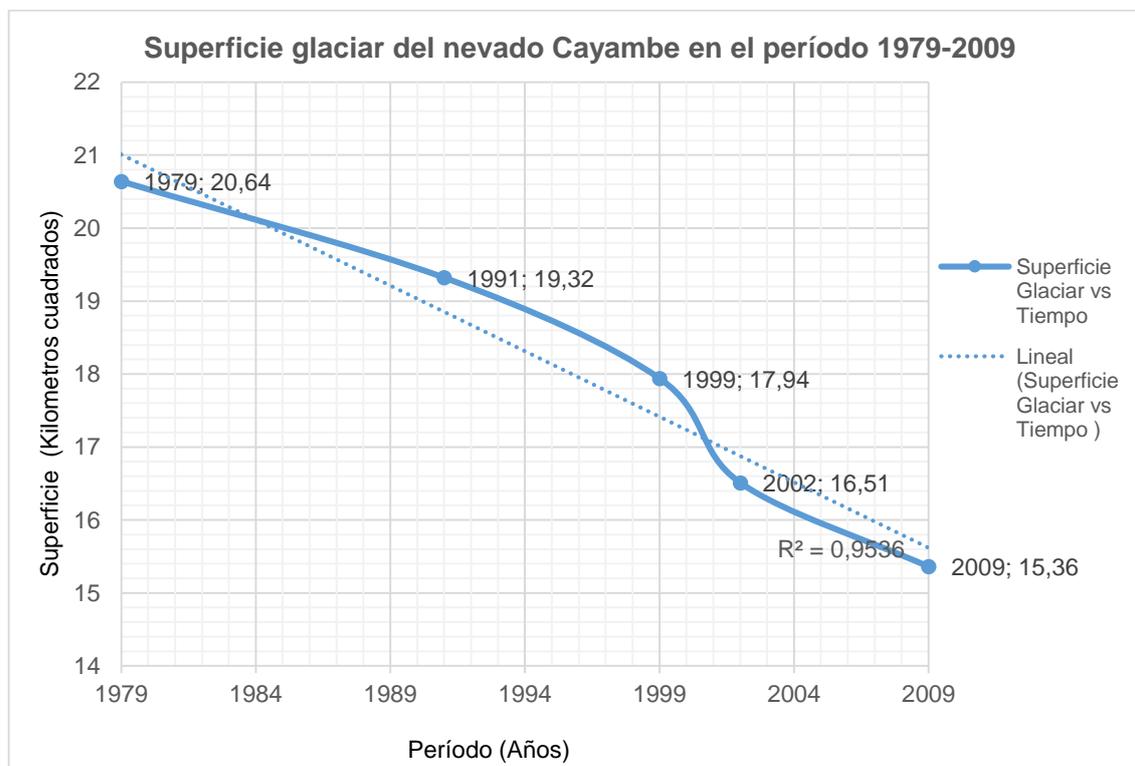
5.2.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL NEVADO CAYAMBE (1979-2009)

El retroceso que se ha obtenido de la cobertura nivo-glaciar del nevado Cayambe, es del 25,58% (entre 1979-2009), y teniendo en cuenta los estudios revisados, confirma la tendencia de reducción como en el caso de los otros glaciares, la cual puede atribuirse al cambio climático.

En la Figura 5.4 se puede observar la tendencia del retroceso glaciar del nevado Cayambe.

FIGURA 5.4

TENDENCIA DEL RETROCESO GLACIAR DEL NEVADO CAYAMBE



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

El nevado Cayambe aporta a varios de los recursos hídricos en sus alrededores, lo cual fue ya descrito en el tercer capítulo, por lo cual es importante también un estudio por zonas o lenguas glaciares sobre su recesión.

La reducción existente afectaría a este aporte hídrico que es directo del glaciar, posiblemente aumentando su flujo en un principio por el derretimiento del glaciar hasta cesar definitivamente.

En la tendencia de reducción observada en la gráfica, puede notarse que ésta se acelera de 1999 a 2009, sin embargo se debe tener en cuenta que, se trata de una serie con pocos puntos y el tratamiento digital del año 2009 fue distinto especialmente en la delimitación manual realizada con imágenes de diferente detalle.

En este análisis no se han contemplado datos climatológicos para determinar el cambio climático dentro de la zona de estudio pero, en base a la información espectral que capturan los sensores de la plataforma LANDSAT, se puede notar la variación de la cobertura nivo-glaciar del nevado Cayambe en el período de 1979-2009.

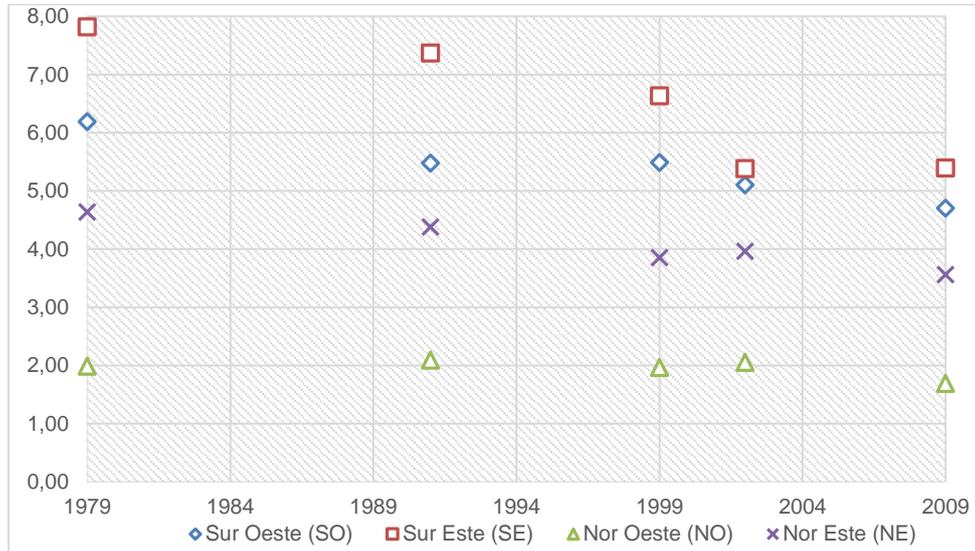
De los resultados presentados por Collet (2010) y Calispa (2012), quienes utilizaron imágenes satelitales (LANDSAT y ASTER) en sus estudios, se puede afirmar que, por la fuerte influencia de la vertiente Amazónica que tiene el nevado Cayambe, por su ubicación y a diferencia del retroceso sufrido en el Cotopaxi y Antisana (1979-2007), el porcentaje de reducción (1979-2009) en el nevado Cayambe es mucho menor. Esto se puede afirmar ya que en la zona existen varias precipitaciones, alta humedad y nubosidad.

En cuanto a las zonas y lenguas glaciares delimitadas se presenta como varían sus respectivas superficies en las figuras 5.5 A) y B).

FIGURA 5.5

RECESIÓN POR ZONAS Y LENGUAS GLACIARES DEL NEVADO CAYAMBE

A) RECESIÓN NIVO-GLACIAR POR ZONAS (Superficie (km2) vs Años)



B) RECESIÓN NIVO-GLACIAR POR LENGUAS (Superficie (km2) vs Años)



ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

Los datos obtenidos sobre las superficies de las cuatro zonas delimitadas presentados en la tabla 5.2 A) muestran que entre 1979-2009; la zona suroeste del Nevado ha retrocedido un 23,96% (0,80 %/año), la zona sureste un 30,97% (1,03 %/año), la zona noroeste un 14,88% (0,50 %/año), y la zona noreste un 23,22% (0,77 %/año). De estos resultados se puede decir que la zona este del glaciar es la que mayor recesión ha tenido durante los 30 años analizados principalmente la zona sureste, continuando con la zona suroeste donde se halla el río Blanco que recibe aporte hídrico del glaciar (*Valencia, 2014*), en tercer lugar está la zona noreste, y finalmente la zona noroeste cuyas superficies en los años 1991 y 2002 fueron mayores que las del año 1979 debido a la acumulación de nieve en la misma.

En cuanto a los resultados de las diecinueve lenguas glaciares delimitadas presentados en la tabla 5.2 B), los porcentajes de retroceso estimados se encuentran entre 4-46 %. Cuatro lenguas glaciares (9, 7, 10 y 15) ubicadas al sur del glaciar presentan una tasa de retroceso estimada de 0,02 km²/año que es la el valor mayor en comparación a las demás lenguas del glaciar y es similar para estas lenguas. En segundo lugar se registra una tasa de recesión de 0,01 km²/año de ocho lenguas glaciares, 2 pertenecientes al oeste (4 y 8), y seis de la zona este (1, 12, 13, 14, 17 y 19). El tercer valor es de 0,005 km²/año de recesión perteneciente a la lengua 16 al sureste del glaciar. Una tasa de 0,004 km²/año fue calculada para tres lenguas glaciares dos del este (11 y 18) y una del noroeste (5). Finalmente, los valores de 0,003 km²/año, 0,002 km²/año, y 0,001 km²/año pertenecen a las lenguas 3, 2 y 6 respectivamente (6 y 3 ubicadas al oeste; y 2 al noreste).

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Aprovechando la información capturada por los sensores de la plataforma LANDSAT y mediante el procesamiento de imágenes satelitales con el manejo de programas de Sistemas de Información Geográfica, se pudieron obtener las superficies glaciares del nevado Cayambe para los años 1979, 1991, 1999, 2002 y 2009. Para el año 1979 la superficie obtenida fue de 20,64 km², después de 12 años (1991) ésta se reduce a 19,32 km², continuando con la misma tendencia en un período de 8 años (1999) a 17,94 km². A partir del cual, se puede evidenciar un aceleramiento de su retroceso en los siguientes 10 años obteniéndose para el año 2002 un área de 16,51 km² y para el año 2009 un área de 15,36 km².

Durante este período de 30 años (1979-2009) se estima un porcentaje de reducción del glaciar, en el nevado Cayambe, alrededor del 25,58%, con una tasa de retroceso anual de 0,853 %/año (0,176 km²/año). Comparando estos resultados con el retroceso que otros glaciares tropicales en Ecuador han presentado en el período 1976-2006, la tendencia de reducción es similar. Sin embargo, esta recesión, a diferencia de los otros glaciares, es menor posiblemente por la influencia de la vertiente amazónica en la zona del nevado Cayambe. A pesar de no haberse tomado en cuenta en este estudio un área ubicada al Nor-occidente del nevado Cayambe por la acumulación de nieve que se da en la misma (por ejemplo en el año 2002), se pudo notar que la tendencia es la misma al igual que en todo el casquete glaciar.

En el análisis se delimitó, desde la cota más alta del nevado 5790 m.s.n.m. hasta su contacto morrénico, diecinueve lenguas glaciares donde las mayores tasas de retroceso fueron 0,02 km²/año (lenguas: 7, 9, 10, y 15) y 0,01 km²/año (lenguas: 1, 4, 8, 12, 13, 14, 17 y 19), dadas principalmente en la zona este del glaciar donde

se calculó un porcentaje de retroceso de 30,97 % para el sureste y de 23,22 % para el noreste. En la lengua 7 la reducción fue muy notoria al visualizar las imágenes satelitales. Estos resultados aportan a la información sobre el nevado Cayambe acerca de su estado y aporta una idea sobre el comportamiento en cuanto a variación glaciaria en el futuro.

Esta reducción en el glaciar del nevado Cayambe puede atribuírsele, como en estudios realizados para los glaciares: Illiniza Sur; Chimborazo; Antisana; y, Cotopaxi y dependiendo de los factores físicos que influyen al glaciar, al cambio climático o a la configuración espacial del glaciar.

El aporte hídrico de los glaciares tropicales suele ser, en porcentaje, bajo (*Villacís, 2010*). Sin embargo, la reducción del mismo y debido a su función como regulador (*Mena et al, 2008*) disminuiría el aporte hídrico en períodos donde las precipitaciones son reducidas. En el caso del nevado Cayambe, posiblemente la disminución del glaciar afectaría en el aporte por ejemplo al río Blanco (occidente) que desciende directamente de la cumbre del nevado o al río Azuela que se forma de las quebradas de la parte Norte y Nor-Oriental del Nevado (*Samaniego et al, 2004*).

Fue posible el uso de dos imágenes satelitales LANDSAT, tomadas en el año 2009, por poseer dos fotografías aéreas del mismo año y porque el bandeo en las imágenes satelitales era distinto cubriendo diferentes partes del glaciar del nevado Cayambe lo que permitió tener una digitalización continua del contorno glaciar y la obtención de su superficie.

Los valores del NDSI calculados en este análisis que se ajustan mejor a la cobertura nivo-glaciaria son todos los valores mayores a 0,4 llegando a ser su valor más alto de 0,95 aproximadamente. Este resultado puede ser incorporado en las bandas de la imagen satelital para obtener una mejor discriminación en la clasificación. La clasificación de la banda NDSI permite obtener una cobertura que muestra la forma del glaciar para una mejor digitalización del contorno.

Al evaluar la precisión de la metodología aplicada los resultados promedio del error relativo para un pixel de 80 m (año 1979) se encontraron alrededor de 12-30 %, para un pixel de 30 m (años 1991-2009) están dentro de 4-12 %, siendo válidos para la resolución espacial que presentan las imágenes satelitales LANDSAT (Collet, 2010).

Debido al tamaño del pixel de la imagen satelital, es necesario realizar visitas a la zona de estudio, lo que ayudará a descartar o no sombras y nieve al momento de realizar un ajuste en la digitalización, los que se representan como polígonos sobre el glaciar, resultado de grietas, penitentes, niebla o la morfología del lugar. Se pudo notar al suroeste que zonas del glaciar del nevado Cayambe se hallan cubiertas por suelo y rocas, lo que podría afectar en el cálculo de la superficie pues estas zonas no podrían ser discriminadas debido al detalle que presentan las imágenes satelitales pero podría ser descartable porque no son grandes extensiones las que se hallan cubiertas.

6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una delimitación de las lenguas glaciares del nevado Cayambe añadiendo información de campo, para determinar el sector en el cual la reducción es mayor y su aporte a los recursos hídricos por el glaciar o la acumulación de nieve por ser un sector donde existen muchas precipitaciones.

Este análisis como resultado inicial aporta una idea sobre la tendencia que el glaciar tiene que es de disminución. A partir de esta evidencia se recomienda realizar posteriores estudios en el glaciar del nevado Cayambe realizando mediciones de su volumen con las distintas técnicas usadas en glaciares como el Antisana. La razón es porque al igual que los otros glaciares, aporta a ríos que alimentan a las poblaciones de sus alrededores, y regulan la temperatura que permite que la vegetación nativa se mantenga hasta cierta altitud. El estudio de su dinámica sería muy necesario para saber los factores por los que se halla influenciado el glaciar y determinar la razón de su reducción sea el cambio climático o su configuración espacial debido a su ubicación.

Para ello se debería recopilar información meteorológica de distintos períodos de la zona para determinar el cambio climático de la zona y en qué porcentaje ésta influye sobre el retroceso del glaciar. Esto también ayudaría a determinar un posible aceleramiento en el proceso de reducción del glaciar observado a partir del año 1999.

El aporte de las imágenes satelitales es enorme en el estudio de los glaciares y otros recursos naturales, sin embargo, este debe estar acompañado del trabajo de campo donde se tomen puntos de control sobre las distintas coberturas que se hallan en la zona (hielo glaciar, nieve, suelo, rocas que conforman morrenas, y las distintas coberturas vegetales existentes) para una mejor discriminación y delimitación. Sería interesante el estudio de las morrenas alrededor del glaciar del nevado Cayambe para el entendimiento de su dinámica y una posible reconstrucción del tamaño del glaciar en el pasado.

En futuros estudios se debería empezar a incorporar las imágenes satelitales como LANDSAT 8 y ALOS, que tienen un mejor detalle por su resolución espacial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basantes, R. (2010). Análisis espacio-temporal del comportamiento geométrico de los glaciares del volcán Antisana y su relación con la variabilidad climática y el cambio climático. Caso de estudio: glaciares 12 “Los Crepos” y 15 (α , β). Tesis Universidad Nice- Sophia Antipoles, Master 2SGT PREFALC “Ciencias y gestión de la tierra geología, riesgo y gestión del territorio”. Quito-Ecuador.
- Basantes, R. (2013). Taller de “Capacitación en el Uso de Imágenes Satelitales - ALOS” del 18-21 de Junio de 2013, realizado en el Hotel Quito. Quito.
- Butler, M.J.A., Mouchot, M., Barale, V., LeBlanc, C. (1988). “Energy Sources and Interactions”. The application of remote sensing technology to marine fisheries: an introductory manual. <http://www.fao.org>. Section 2. FAO Fish. Tech.Pap., (295):165 p.
- Cáceres, B. (2010). Actualización del inventario de tres casquetes glaciares del Ecuador. Quito. 2010.
- Calispa, M. (2012). Identificación de zonas con tendencias de cambio en el período 1987-2002, en la zona Centro–Norte del Ecuador, utilizando imágenes LANDSAT. Tesis Universidad Autónoma de Barcelona. 2012.
- Campbell, J. (1987). Introduction to Remote Sensing. Vol.1, New York, London, The Gilford Press
- Castaño, C., Hofstede, R. (2002). Memorias del “Taller de Monitoreo de Paramos”. Tomo II. Congreso Nacional de Paramos. Colombia.
- Chavez, Jr., P. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 9, September 1996, pp. 1025-1036, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, U.S. Geological Survey, 2255 N. Gemini Drive, Flagstaff, AZ.

- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. Primera edición. Madrid. Editorial Rialph.
- Cogley, J.G., R. Hock, L.A. Rasmussen, A.A. Arendt, A. Bauder, R.J. Braithwaite, P., Jansson, G. Kaser, M. Möller, L. Nicholson and M. Zemp. (2011). Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP. Paris.
- Collet M. (2010). Suivi spatio-temporel des calottes glaciaires De l'Antisana et du Cotopaxi (équateur): Analyse par télédétection dans un contexte de changement climatique. Tesis Universidad de Rennes 2-Haute Bretagne. Rennes, Francia.
- Coloma, A. (2007). Ent ECOLAP y MAE 2007. Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador. ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM. Quito, Ecuador.
- Cortés, J. (2013). La evolución del mayor glaciar de México vista desde el espacio, Programa de Posgrado en ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de Mexico, México
- Dozier, J. (1989). Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. Department of Geography and Center for Remote Sensing and Environmental Optics. University of California, Santa Barbara and Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. California.
- Francou, B., Pouyaud, B. and 12 others. (2004). Métodos de Observación de Glaciares en los Andes Tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Versión 1, Great Ice, IRD, France: 238 pp. (on CD).
- Francou, Bernard. (2007, Julio). "Recesión de los glaciares en el Ecuador: Una respuesta al cambio climático". Revista Montaña. Quito.
- Francou, B., Cáceres, B., Villacís, M., Basantes, R., Maisincho, L., Galárraga, R., Romero, J.C. (2011). Analizando el cambio climático a partir de los glaciares del Ecuador, IRD, SENESCYT, EPMAPS, INAMHI, EPN, Quito, Ecuador.

- Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J.E., Silvestre, E.E., Ginot, P., Cáceres, B., Condom, T., Villacís, M., Ceballos, J.L., Lehmann, B., Anthelme, F., Dangles, O., Gomez, J., Favier, V., Maisincho, L., Jomelli, V., Vuille, M., Wagnon, P., Lejeune, Y., Ramallo, C., & Mendoza, J. (2013). Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático. CAN, PRAA, IRD.
- Febres, A. (2007). Análisis tempo-espacial de la cobertura nivoglaciar del volcán Iliniza Sur. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- Fundación Antisana. (1998). Plan de Manejo de la Reserva Ecológica Cayambe-Coca. Instituto Nacional Forestal de Áreas Naturales y Vida Silvestre. Proyecto Subir II. Quito, Ecuador.
- Gallegos, E. (2014). Variaciones temporal y espacial de la cobertura nivoglaciar del Nevado Cayambe usando fotografías aéreas. Tesis para la obtención del título de Ingeniero Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- García, M.J., Urrutia, A., Bernabé, M.A. (2009). Diseño de herramientas de análisis espacio-temporales para el estudio de bases de datos históricas. Murcia, Madrid.
- GEOPLADES. (2009). Estudio multitemporal de la cobertura vegetal y uso del suelo del Nor-Oriente del Ecuador en los años 1990 -2008 y proyección al 2030. Quito, Ecuador.
- Instituto Geográfico Militar. (2013). Cartografía de libre acceso. <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/>
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC. Ginebra, Suiza.

- Jaramillo, S. (2012). *Evolución Glaciar en la Vertiente Norte del Volcán Cotopaxi*. Proyecto de Máster. Máster en Dinámicas Territoriales y Desarrollo. Universidad Complutense de Madrid. Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Madrid.
- Mena, P., Cuesta-Camacho, F., Peralvo, M., Ganzenmüller, A., Schütze, K., Francou, B., Neira, D. (2008). *Cambio Climático: La recesión de los glaciares en el Ecuador y el Cambio Climático*. Serie Páramo 23. Ecociencia/ GTP/ Abya Yala. Quito
- Montero I. (2010). *En el Vértice del Ecuador: El descubrimiento del sitio a más latitud en el globo terráqueo, por donde cruza la línea ecuatorial*. Primera edición. México. Am&Am.
- Palese, C., Cogliati, M. (2014). *Teledetección: conceptos básicos*. <http://atlasneuquen.uncoma.edu.ar>. Laboratorio Norpatagónico de Teledetección (LANTEL). Universidad Nacional de Comahue, Facultad de Humanidades, Departamento de Geografía. Neuquén, Argentina.
- Pasapera, J. (2012). *Realidad actual de los glaciares tropicales usando técnicas de teledetección*. Proyecto de Maestría. Maestría en aplicaciones espaciales de alerta y respuesta temprana a emergencias. Perú.
- Ponce, E. (2008). *Análisis de cambio de cobertura vegetal y fragmentación en el Corredor de Conservación Comunitaria El Ángel - Bosque Golondrinas, provincia del Carchi (1996 - 2005)*. Tesis para obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente. Escuela Superior Politécnica del Ejército. Sangolquí, Ecuador.
- Pons, X. (2012), "*Ideas Introductorias: Teledetección*", Barcelona, 2012
- Rabatel, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gomez, B. Caceres, J.L. Ceballos, R. Basantes, M. Vuille, J.E. Sicart, C. Huggel, M. Scheel, Y. Lejeune, Y. Arnaud, M. Collet, T. Condom, G. Consoli, V. Favier, V. Jomelli, R. Galarraga, P. Ginot, L. Maisincho, M. Ménégoz, J. Mendoza, E. Ramírez, P. Ribstein, W. Suarez, M. Villacís, P. Wagnon. (2013). *Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. The Cryosphere*. 7, 81-102. Doi:10.519/tc-7.81-2013.

- Racoviteanu, A., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S., Armstrong, R. (2008). Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop. Boulder, Colorado, USA.
- Rivera, A. (2014). Laboratorio de Glaciología. <http://www.glaciologia.cl>. Centro de Estudios Científicos (CECS). Universidad de Chile. Chile.
- Samaniego, P., Eissen, J., Monzier, M., Robin, C., Alvarado, A., Yepes, H. (2004). Los peligros volcánicos asociados con el Cayambe. Quito. Editorial Ecuador.
- Secretaria General de la Comunidad Andina, Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente, Agencia Española de Cooperación Internacional. (2008). ¿El fin de las cumbres nevadas?. <http://www.pnuma.org/deat1/pdf/glaciaresandina.pdf>
- Úbeda, J. (2011). El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (Cordillera Occidental de los Andes Centrales). Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- United States Geological Survey. (2013). Landsat Archive. <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Valencia, R. (2014). Análisis de la disponibilidad de los recursos hídricos en la microcuenca del Río Blanco (Nevado Cayambe), utilizando el modelo de oferta-demanda en ArcGIS. Tesis para la obtención del título de Ingeniero Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- Villacís, M., Cadier, E., Mena, S., Anaguano, M., Calispa, M., Maisisncho, L., Galárraga, R., Francou, B. (2010). Hydrological interaction between glacier and páramos in the tropical Andes: implications for water resources availability. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-0, EGU General Assembly 2010.

ANEXOS

ANEXO N° 1
FOTOGRAFÍAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1. Fotografías de la zona de estudio



Fotografía 1. Vegetación cerca del Río Blanco (Occidente)



Fotografía 2. Pajonales y el nevado Cayambe cubierto de nubes (Sur)



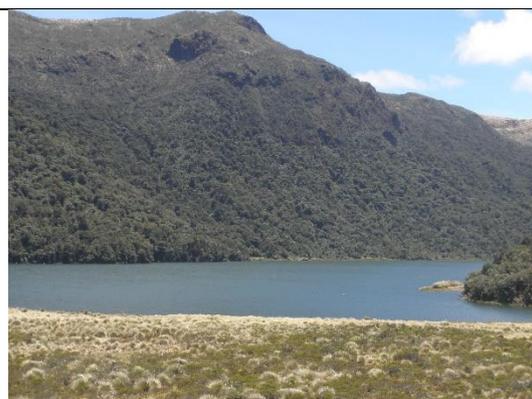
Fotografía 3. Glaciar del Cayambe, cobertura de nubes (Norte)



Fotografía 4. Cobertura vegetal al Norte del nevado Cayambe



Fotografía 5. Plantación de "orejuelas" (Norte)



Fotografía 6. Laguna de San Marcos ubicada al Norte del nevado Cayambe

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.



Fotografía 7. Senecios y líquenes sobre rocas cerca del nevado Cayambe



Fotografía 8. Vegetación Nativa de árboles de "papel"



Fotografía 9. Almohadillas y musgo sobre rocas



Fotografía 10. Rocas cubiertas por hielo y nieve (Suroccidente)



Fotografía 11. Rocas, arenales y nieve (Suroccidente del nevado Cayambe)

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.



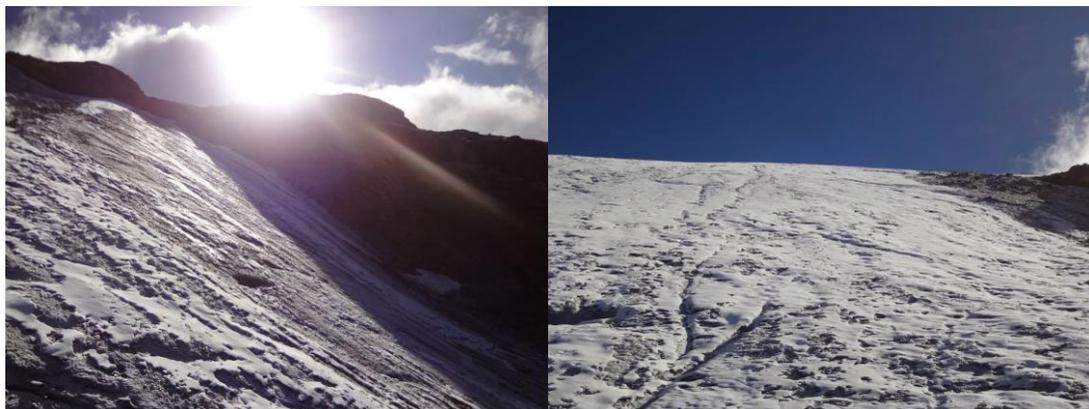
Fotografía 12. Cultivos, ganado, invernaderos y plantaciones de eucalipto



Fotografía 13. Glaciar del nevado Cayambe donde se pueden observar grietas y penitentes



Fotografía 14. Suelo cubierto de una ligera capa de nieve y una laguna congelada vista desde el glaciar (Picos Jarrin)



Fotografía 15. Nieve Cubriendo el glaciar (Picos Jarrin)

ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.



Fotografía 16. Morrenas terminales



Fotografía 17. Morrena terminal elíptica



Fotografía 18. Morrena Lateral

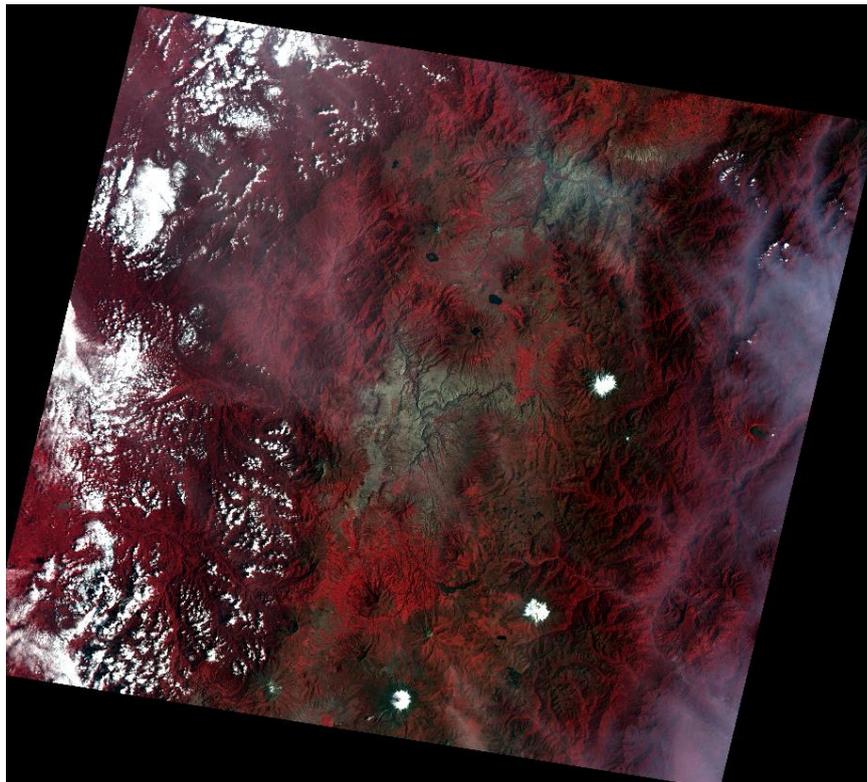


Fotografía 19. Hielo Glaciar del nevado Cayambe

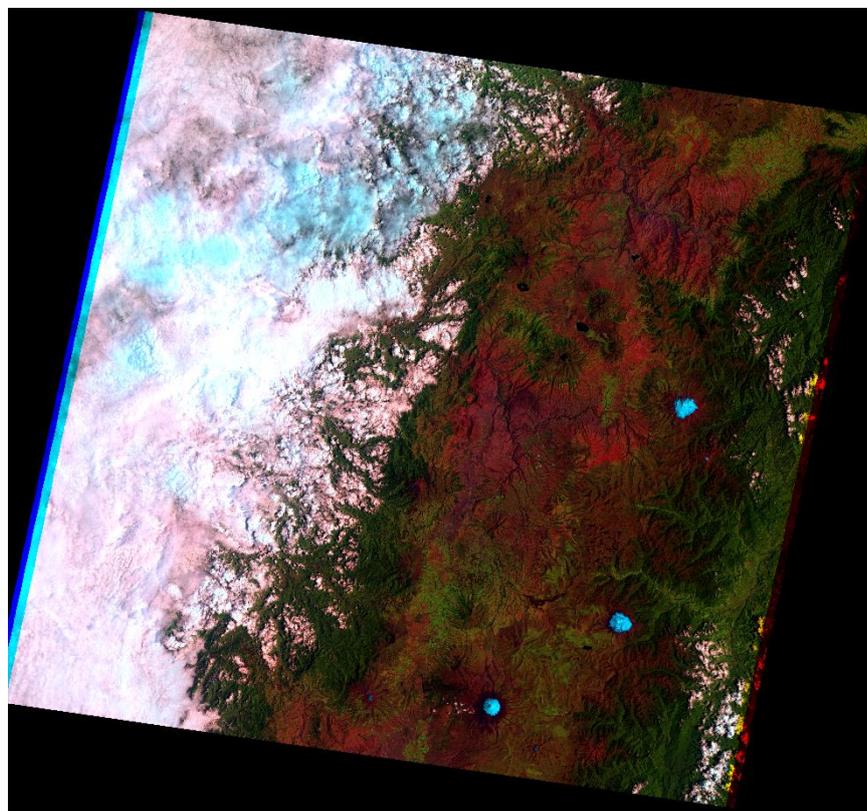
ELABORACIÓN: Cornelia Brito, 2014.

ANEXO N°2
IMÁGENES SATELITALES LANDSAT Y FOTOGRAFÍAS
AÉREAS

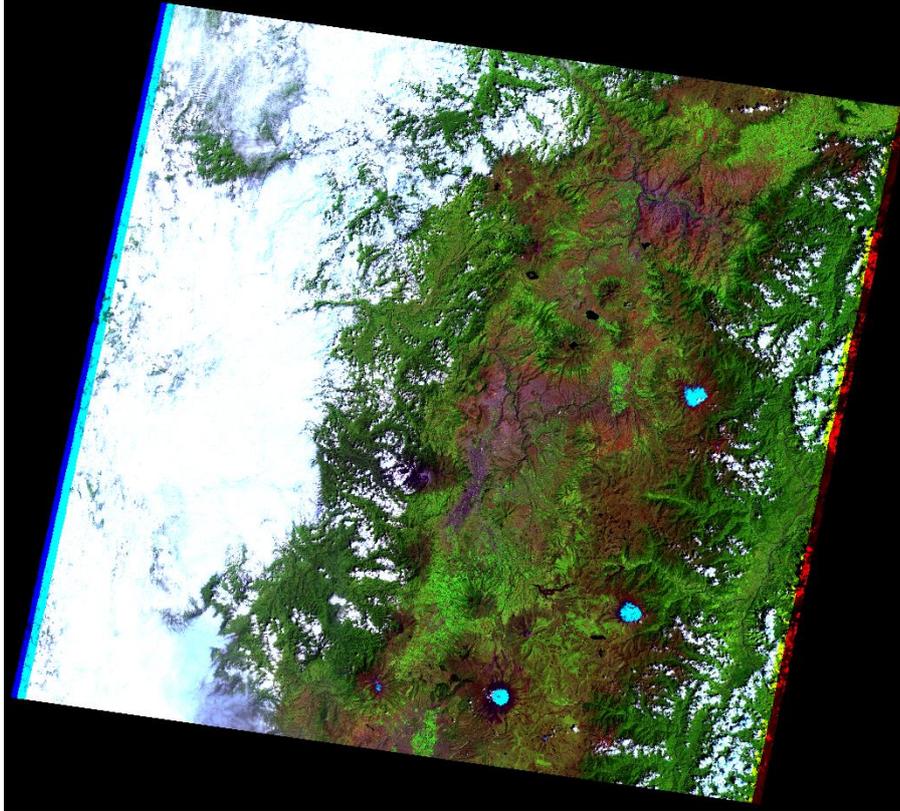
2.1. Imagen satelital LANDSAT del año 1979, Path 60 y Row 10.



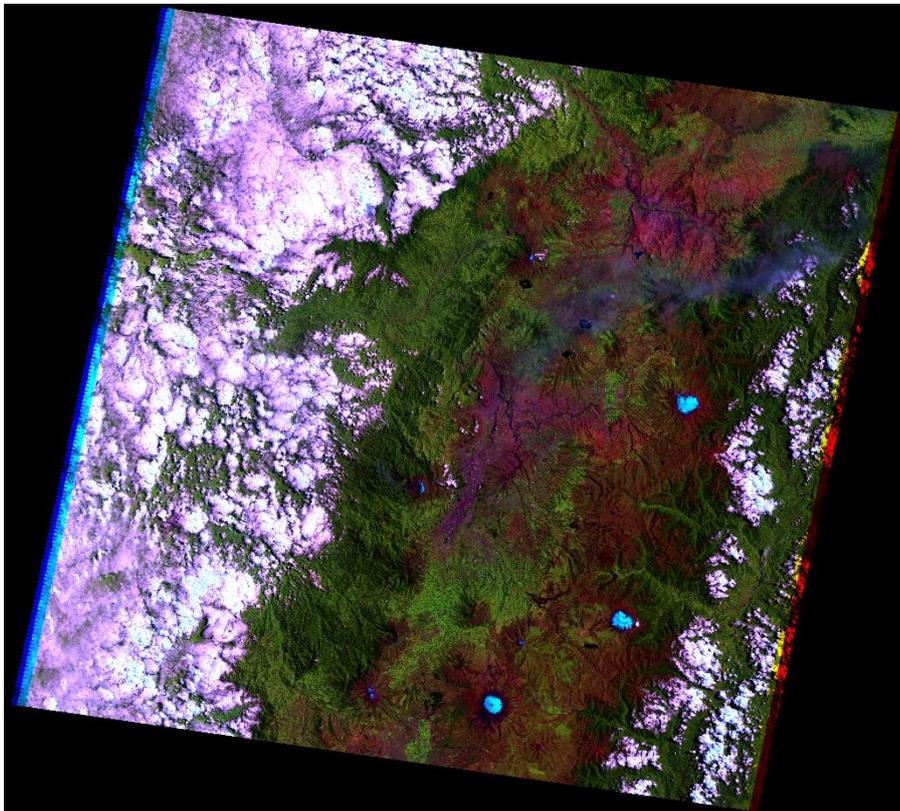
2.2. Imagen satelital LANDSAT del año 1991, Path 60 y Row 10.



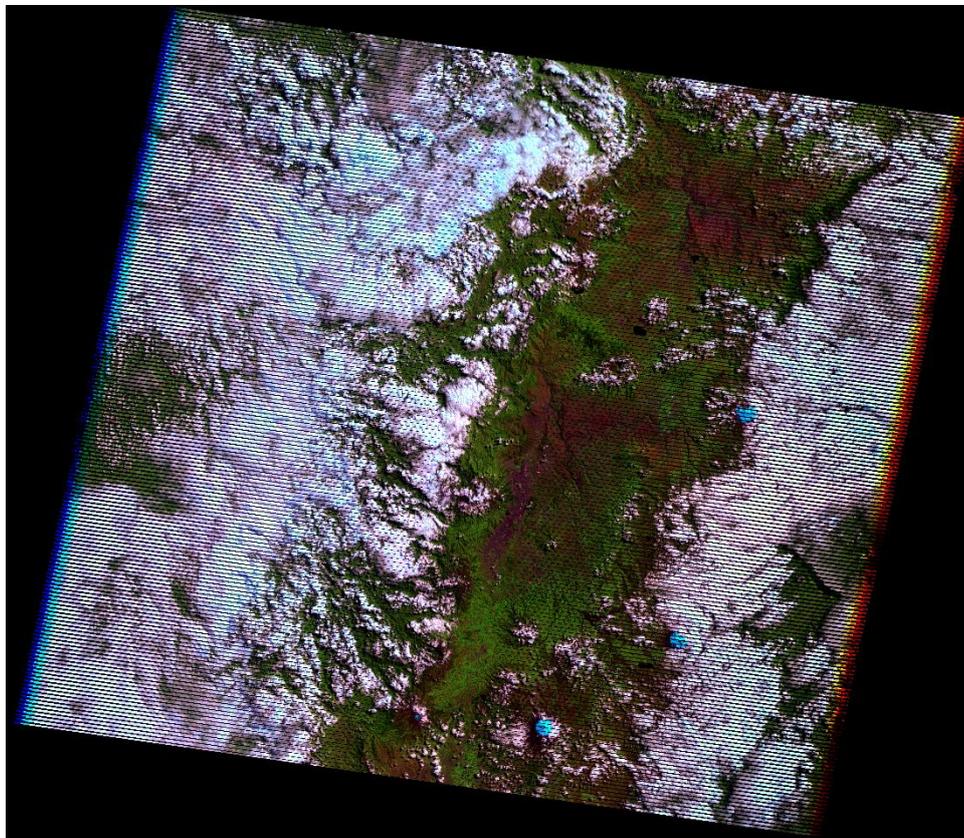
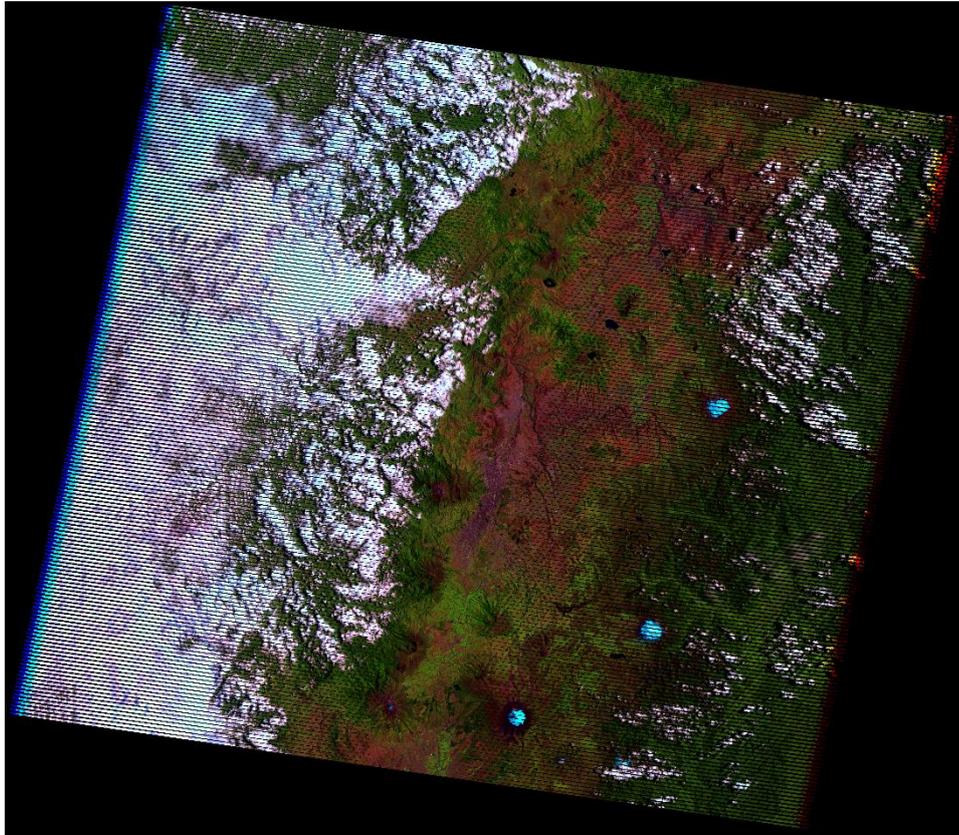
2.3. Imagen satelital LANDSAT del año 1999, Path 60 y Row 10.



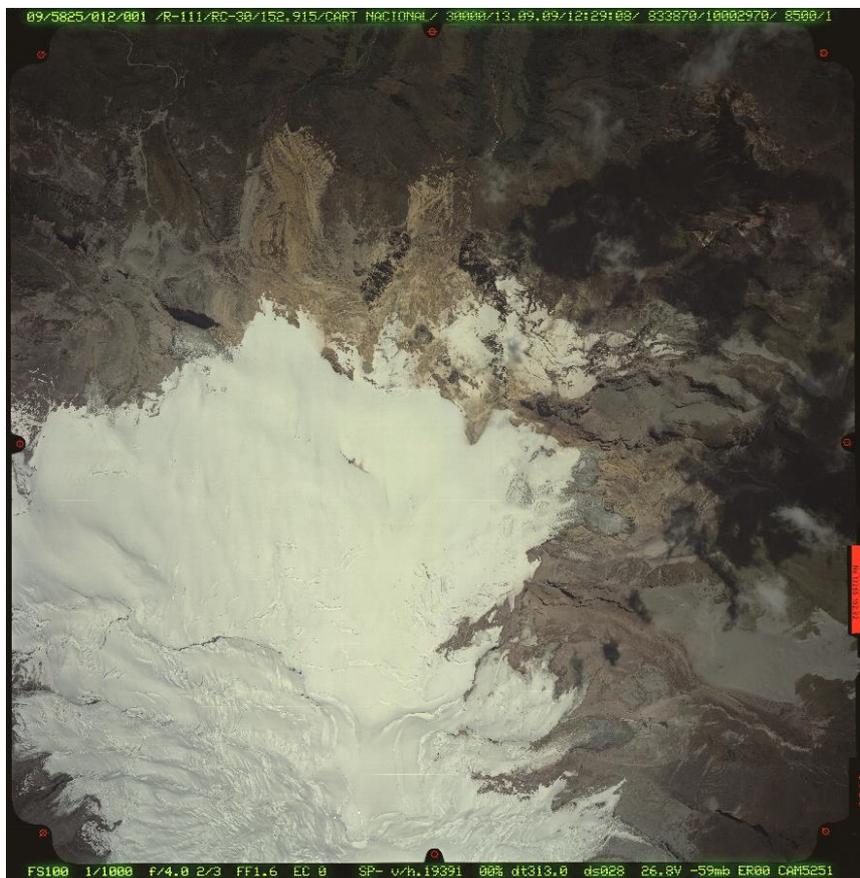
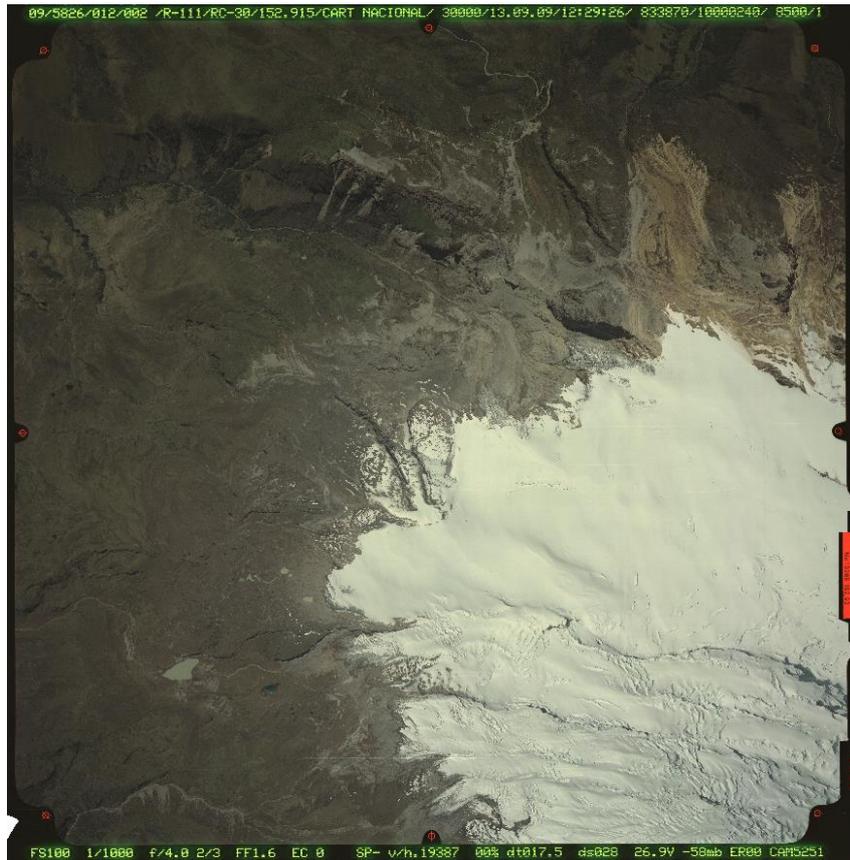
2.4. Imagen satelital LANDSAT del año 2002, Path 60 y Row 10.



2.5. Imágenes satelitales LANDSAT del año 2009, Path 60 y Row 10.



2.6. Fotografías aéreas del año 2009 del nevado Cayambe



ANEXO N°3
MAPA DE RESULTADOS DEL RETROCESO GLACIAR
DEL NEVADO CAYAMBE

3.1. Mapa del retroceso glaciar del nevado Cayambe

