

**EVOLUCIÓN DEL GLACIAR DEL VOLCÁN NEVADO DEL HUILA A TRAVÉS
DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES (1987 - 2016)**

ROSA LILIANA ALPALA AGUILAR



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

**EVOLUCIÓN DEL GLACIAR DEL VOLCÁN NEVADO DEL HUILA A TRAVÉS
DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES (1987 - 2016)**

ROSA LILIANA ALPALA AGUILAR

**Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Información Geográfica**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su constante apoyo y por su ejemplo de disciplina, compromiso y perseverancia en la vida, a mis hermanos por su apoyo y confianza, por ser una razón de superación y cada día impulsarme a alcanzar mis proyectos. A mis compañeros y amigos que me han sabido dar fortaleza en todo momento.

Al Servicio Geológico Colombiano a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, por facilitarme la información que ha sido de invaluable importancia en el desarrollo del presente trabajo, así mismo por permitirme hacer parte del extraordinario grupo de trabajo que labora en esta institución.

A Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) por atender la solicitud de las imágenes ASTER, que fueron base fundamental para poder realizar un análisis continuo y completo del retroceso glaciar en el VNH.

A los profesores de la Universidad de Manizales porque sin su empeño de instruir profesionales, este proyecto y mi nueva formación profesional no hubiera sido posible.

CONTENIDO

Pág.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA	15
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	16
2.1. HIPOTESIS.....	16
2.2. OBJETIVO GENERAL.....	16
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. MARCO TEÓRICO	18
4.1. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	18
4.1.1. Sistemas de Información Geográfica para el Análisis de Fenómenos Naturales	18
4.1.2. Sensores Remotos.....	19
4.2. GLACIARES	22
4.2.1. Retroceso Glaciar.....	22
4.3. CALULO DEL RETROCESO GLACIAR	24
4.4. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	24
4.4.1. Localización	24
4.4.2. Tectónica y Vulcanismo	25
4.4.3. Actividad Eruptiva del Volcán Nevado del Huila.....	26
4.4.4. Aspectos Climáticos	28
4.5. ANTECEDENTES.....	29
5. METODOLOGÍA.....	32
5.1. TIPO DE TRABAJO.....	32
5.2. PROCEDIMIENTO	33
5.2.1. Determinar los periodos de análisis	33
5.2.2. Procesamiento digital de imágenes satelitales.....	35
5.2.3. Clasificación Supervisada de Imágenes.....	48
5.2.4. Vectorización de la Superficie Glaciar.....	49
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
6.1. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA SUPERFICIE GLACIAR EN VNH	50
6.2. COTAS MÍNIMAS DE GLACIAR DEL VNH.....	55

6.3. CAMBIOS MORFOLÓGICOS.....	61
6.4. AFECTACIÓN EN EL RECURSO HÍDRICO	62
6.5. POSIBLES ESCENARIOS DEBIDO AL RETROCESO GLACIAR EN EL VNH	63
7. CONCLUSIONES	65

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa de Localización del Volcán Nevado del Huila	25
Figura 2. Nombres de las lenguas glaciares y límites del área glaciar entre 1961 y 1995.....	32
Figura 3. Número de eventos registrados por día en el VNH entre 1994 y 2016...	34
Figura 4. Energía sísmica acumulada en el VNH liberada entre 1994 y 2016	34
Figura 5. Conversión en ENVI 5.0 de los NDS de la imagen Landsat 5 TM del 10 de julio de 1999 a valores de radiancia.....	38
Figura 6. Conversión en ENVI 5.0 de los valores de radiancia de la imagen Landsat 5 TM del 10 de julio de 1999 a formato BILL.....	39
Figura 7. Comparación de una imagen Landsat en NDS y Radiancia.....	39
Figura 8. Corrección atmosférica de la Imagen del sensor Landsat 5 TM mediante la utilización de la rutina FLAASH del Software ENVI 5.0.....	41
Figura 9. Imagen del sensor Landsat 5 TM con la corrección atmosférica de la rutina FLAASH del Software ENVI 5.0.....	41
Figura 10. Construcción del modelo RPCs en el Software ENVI 5.0	43
Figura 11. Construcción Puntos de Control Terrestres GCP en el Software ENVI 5.0.....	44
Figura 12. DEM GeoSar Banda X de resolución espacial 5 m	45
Figura 13. Ortorectificación de una imagen Landsat utilizando un modelo RPC y un Modelo Digital de Elevación en el Software ENVI 5.0.....	46
Figura 14. Transmisión atmosférica, secciones del espectro óptico y las microondas junto con los rangos espectrales de las bandas de ASTER y ETM+..	47
Figura 15. Cociente de las bandas 4/5 del sensor Landsat 5 TM, de la imagen del 10 julio de 1999.....	48
Figura 16. Clasificación supervisada de la imagen del sensor Landsat 5 TM del 10 julio de 1999.....	49
Figura 17. Límites del glaciar para el periodo comprendido entre 1987 y 2016. El glaciar del 2007 corresponde a la imagen del 29 de enero de 2007.....	51
Figura 18. Energía sísmica acumulada de los eventos sísmicos de tipo VT desde 1994 hasta 2016 y área de la superficie glaciar entre 1987 y 2016	52
Figura 19. Energía sísmica acumulada de los eventos sísmicos de tipo LP desde 1994 hasta 2016 y área de la superficie glaciar entre 1987 y 2016	52
Figura 20. Límites de la superficie glaciar para el 29 de enero de 2007 y el 23 de febrero de 2007.....	53
Figura 21. Tendencia del retroceso de la superficie glaciar en el VNH, para el periodo comprendido entre 1961 y 2016	54
Figura 22. Afectaciones de la Lengua Glaciar El Mayor por las erupciones del VNH.	58

Figura 23. Afectaciones de la Lengua Glaciar El Venado por las erupciones del VNH.	59
Figura 24. Glaciar del VNH a enero de 2016 con las lenguas glaciares actuales..	60
Figura 25. Cambios morfológicos del VNH en la superficie glaciar.....	61
Figura 26. Comparación de la superficie glaciar del VNH entre 1999 y 2016.....	62

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Características generales de la serie de satélites Landsat	19
Tabla 2. Resolución de la serie de satélites Landsat	20
Tabla 3. Resolución espacial de la serie de Satélites Landsat	20
Tabla 4. Características de las imágenes satelitales ASTER	21
Tabla 5. Características espectrales de las imágenes satelitales ASTER	21
Tabla 6. Glaciares colombinos extintos durante el siglo XX	23
Tabla 7. Tendencia promedio de las temperaturas máximas, medias y mínimas en diferentes pisos térmicos en los últimos 30 años.....	28
Tabla 8. Imágenes Satelitales que se usaron en el desarrollo de la investigación	35
Tabla 9. Rango espectral y rangos dinámicos para post – calibración	36
Tabla 10. Cambio de la superficie glaciar en el VNH, para el periodo comprendido entre 1987 y 2016	50
Tabla 11. Cambio de la superficie glaciar en el VNH, para el periodo comprendido entre 1965 y 2016	55
Tabla 12. Cotas mínimas para el periodo comprendido entre 1987 y 2016.....	56
Tabla 13. . Evolución de la superficie de la lengua glaciar El Mayor	57
Tabla 14. . Evolución de la superficie de la lengua glaciar El Venado	57
Tabla 15. Evolución de la superficie de la lengua glaciar El Oso.....	57

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Glaciar del VNH en 1987	71
ANEXO B. Glaciar del VNH en 1999	72
ANEXO C. Glaciar del VNH en 2007	73
ANEXO D. Glaciar del VNH en 2011	74
ANEXO E. Glaciar del VNH en 2016	75

GLOSARIO

Erupción Freatomagmática: se producen cuando el magma que asciende hacia la superficie entra en contacto con agua acumulada bajo la corteza o con agua superficial de ríos o lagos. Este contacto puede ser directo o indirecto (Cardenas, 2015).

Erupción Freática: En este caso no hay magma en la explosión, los elementos que interactúan son vapor, agua, cenizas, rocas y bombas volcánicas. En la mayoría de casos se nota aumentos en el contenido de dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno en forma de emisión de gases.

Fallas Geológicas: superficie de contacto entre dos bloques de la corteza que se desplazan o han sido desplazados en el pasado en forma diferencial uno con respecto al otro y que en el momento de formación estaban unidos.

Lenguas Glaciares: Son glaciares de salida que fluyen cuesta abajo por la ladera de una montaña, por debajo de la línea de nieve.

Gases Volcánicos: son gases disueltos en el magma que se liberan antes, durante y después de una erupción volcánica. En general constituidos por H₂O, CO₂ y SO₂. Sus efectos incluyen: Irritaciones de las vías respiratorias. Intoxicaciones por inhalación, Lluvias ácidas, que pueden ser nocivas para las personas, la vegetación y la infraestructura, Envenenamiento. Contaminación del aire y agua (William y McBirney, 1979)

Lahares: son flujos de materiales volcánicos generados cuando el agua meteórica, la de escorrentía superficial, la del deshielo parcial de glaciares o la de flujos de lodos volcánicos, o la acumulada en algunos cráteres formando lagos volcánicos, se mezcla con estos materiales y se desplaza transportándolos en masa por los barrancos y cauces fluviales que tienen sus cabeceras en las laderas del volcán. (Cardenas, 2015).

Sismo: es la propagación de ondas por la corteza terrestre producidas por la liberación súbita de energía acumulada por mucho tiempo debido a la interacción de las placas tectónicas.

Piroclastos: Son fragmentos de roca o magma que son lanzados a la atmosfera como consecuencia de las erupciones explosivas.

RESUMEN

El presente trabajo busca analizar la evolución temporal del sistema glaciar del volcán Nevado del Huila (VNH) utilizando las herramientas de los sistemas de Información Geográfica (SIG) para procesar, analizar e interpretar imágenes satelitales Landsat y ASTER, que debido a su resolución temporal y espacial permiten tener un completo control de los cambios que se presenten en el glaciar del VNH entre enero de 1987 y enero de 2016. Se trabajó principalmente bajo dos requerimientos el primero abarcar el periodo de análisis más amplio y continuo posible teniendo como limitante la disponibilidad de imágenes que cumplieran con los requerimientos de calidad y nubosidad, y el segundo analizar los periodos de alta actividad sísmica del VNH. A cada una de las imágenes Landsat se les realizó los procedimientos de corrección radiométrica, atmosférica y ortorectificación debido a las altas pendientes de la zona de estudio; mientras que a las imágenes ASTER debido al nivel LT1 de procesamiento en el que fueron suministradas por el LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center), no fue necesario realiza ningún proceso de corrección. Los resultados obtenidos evidenciaron que el glaciar del VNH a enero del 2016 corresponde al 50% del glaciar de enero de 1987, además se pudo evidenciar que la velocidad del retroceso aumento en los periodos de alta actividad sísmica del VNH. Finalmente se recomienda que las entidades pertinentes y tomadoras de decisiones empiecen a implementar políticas de acción y proyectos que contrarresten las afectaciones que se puedan generar por la desaparición del glaciar del VNH.

PALABRAS CLAVES: Huila, Retroceso, Glaciar, Landsat, ASTER, Erupción.

ABSTRACT

This study seeks to analyze the evolution of the glacier system of the volcano Nevado del Huila (VNH) using the tools of Geographical Information Systems (GIS) to process, analyze and interpret satellite images Landsat and ASTER, which because of its resolution temporal and spatial allow have complete control of the changes that occur in the glacier VNH between January 1987 and January 2016. It worked mainly under two requirements the first to cover the period of broader analysis and continuous as possible, taking as limiting the availability of images that meet the quality requirements and cloudiness, and the second to analyze periods of high seismic activity VNH. Each of Landsat images was performed procedures radiometric correction, atmospheric and orthorectification due to the steep slopes of the study area; while the ASTER images due to LT1 level of processing in which were supplied by the LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center), it was not necessary to make any correction process. The results show that the glacier VNH to January 2016 corresponds to 50% of glacier January 1987, also it was evident that the recoil velocity increase in periods of high seismic activity VNH. Finally it is recommended that relevant institutions and decision-makers begin to implement action policies and projects that counteract the damages that may be generated by the disappearance of glacier VNH

KEY WORDS: Huila, Retreat, Glacier, Landsat, ASTER, Eruption.

INTRODUCCIÓN

En Colombia se ha visto desaparecer más del 65% de los sistemas glaciares que se encontraban vigentes en el siglo XIX (IDEAM, 2012), en su mayoría este proceso ha estado ligado a las condiciones de cambio climático global y regional de los últimos años y en algunos casos ha tenido incidencia la actividad de los volcanes que tienen recubrimiento glaciar. El VNH, ubicado en los límites de los departamentos del Cauca, Huila y Tolima, hace parte de los seis glaciares que aún se conservan en Colombia; sin embargo siguiendo la dinámica de los glaciares a nivel global está sufriendo un acelerado proceso de retroceso glaciar. Inicialmente es necesario conocer que los glaciares son sistemas dinámicos y cambiantes en el tiempo en función de diferentes factores que se mencionan y jerarquizan en el desarrollo del presente trabajo.

Pulgarín et al. (2005) realizó un estudio para determinar el cambio del glaciar en el VNH entre 1961 y 1999, encontrando que los principales cambios indicaban una tendencia a la disminución en las alturas de los picos y una pérdida de 5.47 km² del área glaciar (en planta) en 34 años, equivalente al 29% del área de 1961, razón por la cual en el periodo de análisis se espera encontrar cambios importantes en cuanto a la superficie glaciar y a su morfología.

El análisis de la evolución temporal del glaciar del VNH entre 1987 y 2016 a través de la utilización del catálogo de imágenes Landsat, que contiene escenas desde el año 1972 hasta la fecha en el Earth Resources Observation and Science Center (EROS) y del catálogo de las imágenes ASTER que abarca imágenes desde el año 2000 hasta la fecha, las cuales son distribuidas por Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), permitirá tener un cubrimiento temporalmente continuo y debido a la calidad de los datos y al tratamiento realizado, los resultados serán confiables, por lo que darán paso a una visión amplia del comportamiento del glaciar en cada periodo de análisis y permitirán establecer las posibles causas de mayor incidencia para el acelerado proceso de retroceso glaciar. Se destaca que durante el periodo evaluado no solo ha influenciado la dinámica del cambio climático y los procesos de desestabilización y regeneración de pendientes sugeridos por Pulgarín et al. 2005; sino también el proceso de reactivación del volcán en 2007, con dos erupciones volcánicas presentadas en febrero y abril del mismo año, y una última presentada en noviembre de 2008, adicionalmente entre 2008 y 2010 se presencié el emplazamiento de un cuerpo dómico en la superficie del glaciar del VNH. Se prevé que la ocurrencia de este tipo de anomalías en el volcán ha modificado la tendencia de retroceso glaciar.

Conociendo la importancia de los glaciares como recurso hídrico e indicador de cambio climático, es necesario que se haga seguimiento permanente para determinar el comportamiento y un tiempo aproximado para su extinción, con el fin de tomar las acciones necesarias que permitan reducir el impacto que genera su

desaparición. Así mismo resulta importante entender que el desarrollo de nuevas tecnologías y el aprovechamiento de estas a través de las herramientas de los SIG permiten darle seguimiento global y con la precisión necesaria tomar decisiones y dar manejo a los peligros naturales que nos enfrentamos en la actualidad.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

Investigaciones realizadas a nivel mundial indican que el retroceso glaciar se ha acelerado en los últimos años, esto ha sido principalmente relacionado tanto con las condiciones del cambio climático como con la actividad eruptiva o sísmica de los volcanes que cuentan con casquete glaciar.

En el VNH se tiene reporte de retroceso glaciar para el periodo comprendido entre 1961 y 1995 (Pulgarín et al., 2005), en esta investigación encontraron que el glaciar presentaba un acelerado retroceso y las causas principalmente se asociaron con las condiciones de cambio climático de la época. El VNH entro en proceso de reactivación en el año 2007 y permaneció con alta actividad sísmica hasta finales del año 2010; sin embargo en la actualidad no se conoce la afectación que se presentó en el casquete glaciar tanto por los tres procesos eruptivos que se presentaron durante la crisis volcánica, como por los efectos del cambio climático que se ha intensificado en las últimas décadas.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. HIPOTESIS

Analizar el retroceso glaciar en el VNH mediante la utilización de imágenes satelitales ASTER y LANDSAT para diferentes periodos de actividad del volcán, permitirá determinar con precisión la evolución temporal, velocidad del retroceso glaciar y sus principales causas, teniendo en cuenta los periodos de estabilidad sísmica del volcán, periodos eruptivos y afectaciones por condiciones climáticas. Con los resultados obtenidos en este trabajo se complementara el estudio realizado para el periodo de 1961-1995 y se caracterizará el comportamiento del glaciar del VNH para los últimos años.

2.2. OBJETIVO GENERAL

Calcular los cambios y analizar la evolución que ha tenido la superficie glaciar del VNH, mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales ASTER y LANDSAT para el periodo comprendido entre (1987 y 2016).

2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Delimitar y medir la superficie glaciar para los diferentes periodos de análisis.
- Determinar la velocidad del retroceso glaciar y su evolución temporal.
- Determinar la afectación en la superficie glaciar por actividad volcánica y por condiciones climáticas.

3. JUSTIFICACIÓN

La evolución de los glaciares en las zonas ecuatoriales se ha venido intensificando en las últimas décadas, por lo que ha sido objeto de numerosos estudios en los volcanes de sur y centro América, a través de diferentes metodologías utilizando fotografías aéreas, imágenes satelitales y verificaciones en campo. Para el VNH se tiene un trabajo previo (Pulgarín et al., 2005) mediante el empleo de fotogrametría analítica y software especializado, seguidamente en 2009, en un informe interno Ingeominas realizó un estudio temporal y espacial de los cambios superficiales observados en el VNH asociados a las manifestaciones eruptivas de 2007 y 2008 (Cardona et al., 2011), el cual se efectuó mediante el análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales; sin embargo no se utilizaron técnicas de corrección y procesamiento digital de imágenes. El presente trabajo pretende complementar y ampliar los estudios realizados anteriormente, en base a la utilización de imágenes satelitales ASTER y LANDSAT, integradas y analizadas con las herramientas de los SIG, realizando los respectivos mejoramientos y procesamiento digital de imágenes para obtener mayor precisión en los resultados. Se postula la utilización de dos tipos de imágenes satelitales con el fin de tener la mayor continuidad en el tiempo para el análisis de datos, la posibilidad apoyarse con la información de otro sensor para periodos de fallas con datos inválidos (gaps), y aprovechar las bondades del avance tecnológico cuando se trata de satélites recientes. El periodo que se va analizar está comprendido entre 1987 y 2016, durante el cual se tiene registro de tres erupciones volcánicas y alta actividad sísmica, así como cambios en los parámetros climáticos. Por otra parte además de cuantificar la pérdida de la superficie glaciar y analizar las causas, se pretende examinar las zonas que se encuentren en riesgo por la generación de lahares, ya que bien es sabido que los daños económicos y pérdidas de vidas humanas en el caso de las erupciones volcánicas, se dan principalmente por el desprendimiento de hielo y la generación de lahares, finalmente también se pretende evaluar el impacto de la pérdida glaciar en el recurso hídrico, puesto que los glaciares son importantes fuentes de abastecimiento de los ríos que atraviesan o nacen de los casquetes glaciares.

Con el desarrollo del presente estudio las entidades que intervienen en la evaluación del medio ambiente, monitoreo y evaluación de la amenaza por fenómenos asociados al VNH y de gestión del riesgo, podrán actualizar sus mapas y extender sus acciones de acuerdo a las condiciones actuales y detalladas de la superficie glaciar del VNH.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Se ha definido de manera general a los SIG como un sistema organizado compuesto por hardware, software, procedimientos y equipo humano enfocado en capturar, almacenar, procesar, manipular, transformar, analizar, desplegar y modelizar datos geográficos, para representar los objetos del mundo real en términos de posición, atributos y de relaciones espaciales, con el fin de analizar datos, resolver problemas, necesidades de gestión y planificación de manera rápida y precisa. El objeto fundamental de los SIG es la gestión de información espacial, que apoye la toma de decisiones.

4.1.1. Sistemas de Información Geográfica para el Análisis de Fenómenos Naturales

Los SIG con el desarrollo de las nuevas tecnologías están en la capacidad de generar información que permita evaluar y dar manejo a los peligros naturales a los que nos enfrentamos en la actualidad, además de planificar soluciones y obras de mitigación. Se ha visto el uso de los SIG en el manejo de fenómenos naturales como: amenazas geológicas (sismicidad tectónica y volcánica, movimientos en masa), huracanes, retroceso glaciar, cambio climático, inundaciones, erosión del suelo y cambios de uso de suelo entre otros.

Los desastres naturales son en parte resultado de las acciones del hombre, que han aumentado la vulnerabilidad y la incapacidad de anticipar y mitigar el daño. Razón por la cual, el analista SIG debe tener la capacidad de incorporar la información y diseñar modelos espacio temporal bajo condiciones reales, que se pueden establecer a través de capas superpuestas y organizadas, que permitan a los tomadores de decisiones analizar y evaluar los riesgos desde diferentes disciplinas, además de planificar estrategias para reducir el impacto de los fenómenos naturales. La efectividad de las soluciones obtenidas a través de los SIG se reduce a la cantidad y calidad de los datos disponibles así como a la capacidad de planificación del analista

Colombia cuenta con instituciones a nivel local y nacional que han desplegado su instrumentación para estudiar las dinámicas del medio ambiente como el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) y el SGC (Servicio Geológico Colombiano) para monitorear las amenazas de origen geológico. Así mismo a nivel global existe tecnología de alta resolución a través de satélites y radares realizando seguimiento estricto a las amenazas naturales de cambio climático, movimientos de placas, movimiento polar, movimiento de los océanos entre otros, que brindan la información necesaria para el manejo de los peligros naturales.

4.1.2. Sensores Remotos

Es la ciencia y arte de obtener información útil sobre los objetos, áreas o fenómenos bajo investigación mediante análisis de datos adquiridos por dispositivos que no están en contacto físico con ellos (Lillesand y Ralph, 1994).

Los inicios de la teledetección se dan con Gaspar Felix de Tournachon en 1859, quien obtuvo las primeras fotografías aéreas desde un globo cautivo (Hyatt, 1988). Más adelante en 1915 J. T. C. Moore-Brazon desarrollo la primera cámara aérea durante el primer conflicto bélico, junto con este desarrollo vinieron avances en las técnicas de adquisición y proceso fotográfico (Brookes, 1975). Sin embargo es en la segunda guerra mundial cuando se presentan los más notables desarrollos en cuanto a técnicas de teledetección aéreas, mejoras en las películas y cámaras, además aparecieron las primeras películas en infrarrojo y se introdujeron nuevos sensores como el radar (Chuvieco, 1995). Claro está que estos avances se aplicaron después en usos civiles, para el conocimiento y control de recursos naturales. En 1960 durante la guerra fría la NASA pone en órbita al primer satélite de la serie TIROS, aunque fue pionero de misiones de observación meteorológica, su lanzamiento se debió a fines militares. El comienzo para la observación de la tierra con fines científicos se dio en 1972 con el satélite Landsat 1, un satélite con 80 metros de resolución, le siguió el Landsat 2 con 80 metros de resolución en 1975, y Landsat 3 en 1978 con 50 metros de resolución. De esta época en adelante han sido lanzados múltiples satélites al espacio por los países más desarrollados, que cada vez mejoran su resolución y eficiencia tanto para fines militares como científicos.

En la actualidad existe un número elevado de satélites y radares operativos en la órbita terrestres, lo más destacados son: SPOT, EROS-A1, EarlyBird, IKONOS, IRS, GLONASS, MODIS, NOAA-AVHRR, OrbView3, SAC-C MMRS, SLR, DORIS, GEOSAT, VLBI, LEO, GRACE, FORMOSAT, COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate), TerraSAR, EO-1 y Landsat, que vigilan la tierra desde el espacio. Las imágenes satelitales que se van a utilizar en el presente trabajo son obtenidas de los satélites Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 ETM+ y TERRA.

4.1.2.1. Características de las Imágenes Landsat

Como se mencionó anteriormente la serie de satélites Landsat abrieron una nueva percepción del planeta y del cambio global, hasta la fecha han proporcionado el registro continuo más largo de observaciones por satélite. Las ventajas en cuanto a su resolución espacial, temporal y espectral lo hacen poseedor del mejor inventario de la evolución de la tierra. Las características de la serie de satélites Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se presentan en la Tabla 1 y 2. No se entrara a detallar en las características, puesto que no es el objetivo del presente trabajo Tabla 1. Características generales de la serie de satélites Landsat

	Landsat 1- 3	Landsat 4-6	Landsat 7
Altitud	907 – 915 km	705 km	705 km
Inclinación	99.2°	98.2°	98.2°
Orbita	Polar, Solar-sincrónica	Polar, Solar-sincrónica	Polar, Solar-sincrónica
Paso por el Ecuador	09h30 AM	09h30 AM	09h30 AM
Periodo de Revolución	103 m	99 m	99 m

Fuente: Fernández y Llorente (2001).

Tabla 2. Resolución de la serie de satélites Landsat

Sistema Satelital	Resolución Radiométrica		Resolución Temporal	Características Espaciales			
	bits	valores		Ancho del barrido	Resolución espacial (m)		
			días	km	VIS	IR refle	IR term
Landsat TM	8	256	16	185	30	120	
Landsat ETM	8	256	16	185	30	60	15

Tabla 3. Resolución espacial de la serie de Satélites Landsat

L4 TM	Rango Espectral	Resolución Espacial	L5 TM	Rango Espectral	Resolución Espacial
1	0.452-0.518	30	1	0.452-0.518	30
2	0.529-0.609	30	2	0.528-0.609	30
3	0.624-0.693	30	3	0.626-0.693	30
4	0.776-0.905	30	4	0.776-0.904	30
5	1.568-1.784	30	5	1.567-1.784	30
6	10.42-11.66	120	6	10.45-12.42	120
7	2.097-2.347	30	7	2.097-2.349	30
L7 ETM+	Rango Espectral	Resolución Espacial	L8 ETM+	Rango Espectral	Resolución Espacial
1	0.452-0.514	30	1	0.430-0.450	30
2	0.519-0.601	30	2	0.450-0.510	30
3	0.631-0.692	30	3	0.525-0.600	30
4	0.772-0.898	30	4	0.630-0.650	30
5	1.547-1.748	30	5	0.845-0.885	30
6	10.31-12.36	60	6	1.560-1.660	60
7	2.065-2.346	30	7	2.110-2.290	30
PAN 8	0.515-0.896	15	PAN 8	0.500-0.68	15
			9	1.360-1.380	30
			10	10.60-11.19	100
			11	11.50-12.51	100

4.1.2.2. Características De Las Imágenes Áster

The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), es un instrumento que se lanzó en 1999 a bordo del satélite TERRA de la NASA, con el apoyo conjunto entre el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón METI y la NASA. El objetivo principal de la misión ASTER es mejorar el entendimiento de los procesos a escala local y regional que ocurren sobre o cerca de la superficie de la tierra y en la atmosfera inferior, incluyendo la interacción superficie-atmosfera. Las características generales de las imágenes ASTER se resumen en la Tabla 4 y 5.

Tabla 4. Características de las imágenes satelitales ASTER

	ASTER
Altitud	705 KM
Orbita	Heliosincrónica
Distancia entre Orbitas	172 km
Resolución temporal	16 días
Ancho del barrido	60 km

Tabla 5. Características espectrales de las imágenes satelitales ASTER

ASTER	Subsistema	Rango Espectral	Resolución Espacial	Resolución Radiométrica
1	VNIR	0.52-0.60	15 m	8 bits
2		0.63-0.69		
3N		0.78-0.86		
3B		0.78-0.86		
4	SWIR	1.600-1.700	30 m	8 bits
5		2.145-2.185		
6		2.185-2.225		
7		2.235-2.285		
8		2.295-2.365		
9	2.360-2.430	90 m	12 bits	
10	TIR			8.125-8.475
11				8.475-8.825
12				8.925-9.275
13				10.25-10.95
14		0.515-0.896		

Como se observa en la tabla 5, las imágenes ASTER cubren un ancho de región espectral con 14 bandas del visible al infrarrojo térmico, las cuales están separadas en tres grupos; el primero de la Infrarroja termal (TIR) con 5 bandas a 90 metros de resolución espacial, el segundo de la Infrarroja de Onda Corta (SWIR) con 6 bandas a 30 metros de resolución espacial y el tercero de la infrarroja Visible/Cercana (VNIR) con 4 bandas a 15 metros de resolución espacial, por su amplio espectro de bandas termales resulta de gran utilidad para el análisis evolutivo del retroceso glaciar.

4.2. GLACIARES

Según el Centro Nacional de Datos de Hielo y Nieve (NSIDC por sus siglas en inglés), un glaciar es una masa de hielo que se origina en la tierra y se compone de nieve caída, que en el transcurso de muchos años se comprime en grandes y gruesas masas de hielo. La formación de glaciar se presenta cuando la nieve se mantiene en el mismo lugar el tiempo suficiente para que suceda la transformación, esta condición le da a los glaciares la capacidad de moverse como ríos lentos y ser dinámicos.

Los glaciares en el contexto científico son considerados como residuos de la última Edad de Hielo, cuando las bajas temperaturas permitieron que el hielo polar avanzara hacia zonas de baja altitud. En la actualidad los glaciares cubren aproximadamente el 10% de la superficie de la tierra, con la mayor parte en las regiones polares y con un bajo porcentaje en las zonas montañosas, en ambos casos las temperaturas con el tiempo tienden a ser más cálidas, razón por la cual y especialmente en las zonas montañosas los glaciares están desapareciendo.

Los glaciares se mantienen por la dinámica de sus partes, el área en la cual el cuerpo de hielo gana masa es conocida como *Zona de Acumulación*, por lo general es la zona más alta del glaciar donde cae la nieve. Así mismo los glaciares tienen una *Zona de Ablación*, en la cual se pierde la masa y ocurren los procesos de fusión y evaporación, en este proceso se forman las escorrentías superficiales que alimentan los ríos. Cuando la pérdida y la ganancia de masa glaciar son iguales, la *Línea de Equilibrio* se mantiene, de lo contrario se dice que se rompe la Línea de Equilibrio. Estos tres fenómenos son cambiantes, razón por la que los glaciares son dinámicos en el tiempo y a diferentes escalas, así como tienen periodos de retroceso pasan también por etapas de recarga glaciar.

4.2.1. Retroceso Glaciar

Se ha definido como retroceso glaciar a la pérdida de volumen de las superficies cubiertas por una masa de hielo, esta pérdida debe diferenciarse de otros fenómenos cíclicos que se presentan por condiciones climáticas estacionales, cuando se presenta retroceso glaciar contrariamente a los cambios cíclicos, las condiciones iniciales no se recuperan, dentro de las causas más estudiadas del

derretimiento glaciar se encuentran los cambios de temperatura global, cambios en la posición de los continentes, baja precipitación en las regiones de glaciar, aumento en la temperatura en los andes, actividad sísmica y erupciones volcánicas.

Desde el año 2004 el Programa Hidrológico Internacional de la Unesco ha venido apoyando al Grupo de Trabajo de Nieves y Hielos de América Latina (GTNH). En agosto del 2008 durante una reunión realizada en la ciudad de Manizales (Colombia) el GTNH presentó evidencia del retroceso glaciar que se presenta en los países andinos y en México, destacaron la intensidad con la que se ha presentado desde las tres últimas décadas como consecuencia del calentamiento atmosférico, lo cual ha representado aumento en el proceso del retroceso de los glaciares (Ingeominas, 2010). En Colombia, en el año 1850 el área de las zonas nevadas correspondía a 348.9 km², en los últimos 150 años se ha reducido el 84%, con las mayores pérdidas ocurridas durante los últimos 20 años (Bernex y Tejada, 2010), en la Tabla 6 se presentan los glaciares desaparecidos en Colombia durante el siglo XX.

Tabla 6. Glaciares colombinos extintos durante el siglo XX

Glaciar	Altitud m.s.n.m.	Año aproximado de extinción	Departamento
Puracé	4520	1920	Cauca
Galeras	4276	1948	Nariño
Sotará	4580	1948	Cauca
Chiles	4470	1950	Nariño
Pan de Azúcar	4520	1960	Cauca
Quindío	4650	1960	Quindío
Cisne	4600	1960	Caldas - Tolima
Cumbal	4790	1985	Nariño

Fuente: Flórez, (2002a)

Los glaciares que permanecen aún en Colombia están sometidos a cambios de temperatura y humedad baja en la atmosfera (IDEAM, 2012), adicionalmente a baja precipitación y a la alta actividad de los volcanes, esto sigue dando paso a un acelerado retroceso de los glaciares.

Por otra parte, es importante entender que las masas de hielo son reservas solidas de agua, y hoy en día representan el 80% del agua dulce del mundo, razón por la cual la pérdida de masa glaciar reduce la disponibilidad de agua en los ríos, afectando el equilibrio de los ecosistemas naturales, la agricultura, la generación de energía incluso el uso doméstico del agua. Así mismo se resalta que los glaciares presentes en las cumbres de los volcanes activos, representan un importante riesgo por la generación de lahares, prueba de ello es la tragedia ocurrida en Colombia el 13 de noviembre de 1985, cuando un lahar generado por una moderada erupción del Volcán Nevado del Ruiz, afecto a los departamentos

de Caldas y Tolima, a medida que los lahares recorrían los cauces de los ríos que nacían en el volcán, alcanzaba mayor velocidad y mayor volumen de lodo, esta tragedia que afectó principalmente al municipio de Armero en Tolima, se convirtió la segunda más mortífera del siglo XX, causada por la erupción de un volcán.

4.3. CALULO DEL RETROCESO GLACIAR

Las nuevas tecnologías para el monitoreo de la Tierra, la aplicación de la percepción remota, el fácil acceso a los datos, en conjunto con las herramientas de los SIG, permiten realizar el monitoreo de los glaciares en alta montaña de manera precisa, constante, sencilla y remota, sin necesidad de muestreos en campo. El seguimiento de la evolución temporal y la dinámica de los glaciares se puede realizar utilizando fotografías aéreas, Imágenes Satelitales, Imágenes de Radar e Interferometría, que realizando el análisis y procesamiento adecuado de los insumos como correcciones, realces, cocientes, entre otros, permite obtener de manera precisa el límite de los glaciares y el área correspondiente. En el capítulo 5.2.2. Se explica a detalle y se aplica el procesamiento digital de imágenes satelitales.

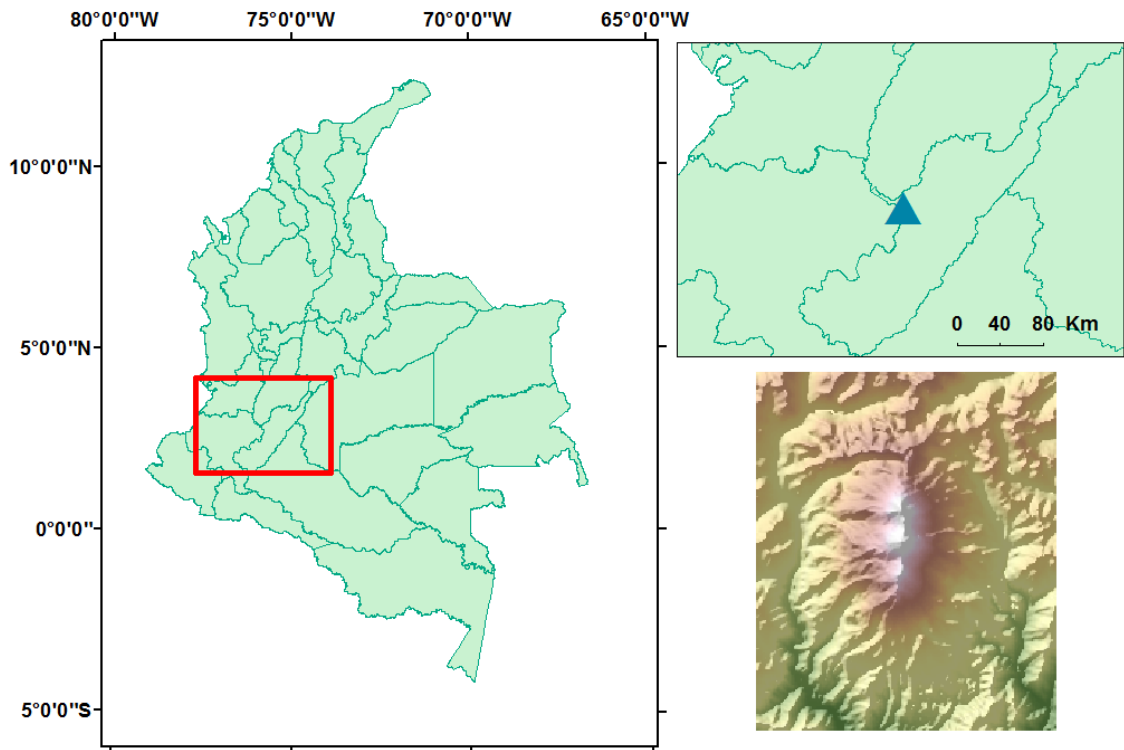
4.4. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.4.1. Localización

El área de estudio corresponde a la superficie glaciar del VNH, el cual está ubicado al SW de Colombia, en las coordenadas 2°55'N y 76°03'W a una distancia de 285 km al SW de Bogotá y a 85 km al NE de la ciudad de Popayán (Cauca), en los límites de los departamentos de Cauca, Huila y Tolima (Figura 1), tiene una forma alargada en dirección NS. El denominado Pico Central del VNH corresponde a la máxima altura de la Cordillera Central y de los Andes Colombianos con 5364 m.s.n.m. (Floréz y Ochoa, 1990). Su gran importancia en el recurso hídrico, es debido al nacimiento de los ríos Páez y Simbolá en el glaciar, estos ríos abastecen a las poblaciones de la zona en el sentido NS.

Existen dos rutas principales de acceso al glaciar del VNH, la primera se realiza partiendo desde Popayán o Cali hasta el municipio de Santander de Quilichao, desde donde se toma un desvío hacia la población de Tacueyo en el departamento del Cauca, de Tacueyo se continua hasta el sector denominado Verdún, a partir del cual se inicia el ascenso hasta llegar al costado noroccidental de la superficie Glaciar. La segunda ruta se hace tomando el trayecto Popayán - Belalcazar, hasta llegar a la vereda Plan de Caloto, desde donde se inicia el ascenso al volcán atravesando el río Páez, por esta ruta se arriba al volcán por el costado Suroccidental.

Figura 1. Mapa de Localización del Volcán Nevado del Huila



4.4.2. Tectónica y Vulcanismo

La formación del VNH de acuerdo a Pulgarín et al. (2001), se ha dado de manera típica, por la actividad de convergencia de las placas que interactúan en esta zona, detalladamente explica su artículo “El VNH forma parte del cinturón volcánico que está asociado a la zona de subducción de la Placa de Nazca debajo de la miniplaca del bloque Andino y la placa Suramerica“. Como en la mayor parte de los volcanes colombianos y algunos suramericanos, el magma aprovechó las zonas de debilidad en la corteza continental como los límites de placas y fallas geológicas para ascender a la superficie dando origen al edificio volcánico y a su continua alimentación.

En cuanto a la naturaleza del VNH Pulgarín et al. (2001) afirma: “El basamento sobre el que se levanta este volcán y las unidades litológicas, que lo enmarcan corresponde a rocas ígneas (intrusivas y extrusivas), rocas metamórficas y metasedimentarias y formaciones sedimentarias recientes”. Inicialmente el VNH había sido clasificado como estrato volcán, después de realizar trabajos investigativos y visitas de campo varios autores (Correa y Cepeda, 1995; Pulgarín y Correa, 1997) han reafirmado este concepto; pero han reclasificado al VNH como estrato volcán con predominio de actividad efusiva sobre la explosiva.

Por otro lado, se sabe que el VNH es un complejo volcánico activo que se ha conformado por dos edificios sobrepuestos, denominados Pre-Huila y Huila. El Edificio Huila, se ha desarrollado en dos etapas, Edificio Antiguo y Edificio Actual, el primero mantuvo predominio de flujos de lava de composición andesítica que alcanzaron hasta 15 km de longitud. El Edificio Actual (o Huila Actual) tiene registros de lavas andesíticas a dacíticas, que mantuvieron un rango de variación en su longitud de 7 a 1 km. Adicionalmente en el edificio actual se ha identificado flujos piroclastos generados por colapsos y explosiones de domo (Pulgarín et al., 2001).

4.4.3. Actividad Eruptiva del Volcán Nevado del Huila

En el inicio de la vigilancia volcánica los expertos del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán del Ingeominas actualmente SGC, observaron que el VNH se encontraba en un nivel estable de actividad, puesto que presentaba un bajo número de eventos sísmicos, así como bajos aportes energéticos de los mismos, en promedio se registraban 3 sismos al día. El episodio más destacado en el comienzo del monitoreo volcánico fue el sismo del 6 de junio de 1994, el cual presentó una magnitud de momento de 6.7 grados (M_W 6.7, NEIC), éste evento se localizó a 10 km al SE del Pico Central del volcán a una profundidad de 12 km, como consecuencia de este sismo se generaron varios deslizamientos de suelos y rocas, que terminaron represando el flujo de los ríos circundantes, con lo que se desencadenó una avalancha que causó pérdidas humanas y de infraestructura, posteriormente el volcán presentó una ligera excitación sísmica, que al transcurso de dos meses terminó y el volcán retornó a su nivel de actividad normal.

Entre 1997, 2001 y 2003 se observó la presencia de algunos enjambres sísmicos (alto número de sismos en un corto periodo de tiempo) asociados al fracturamiento de material cortical (tipo VT), localizados al NE, SW y en la parte alta del edificio volcánico, siguiendo la dirección del trazo de la falla de moras, no obstante estos eventos no alteraron inmediatamente el nivel de actividad del volcán. Hasta que a finales del 2006 se empezaron a registrar eventos sísmicos de tipo VT con magnitudes de coda importantes mayores a 3.0 grados en la escala de Richter, estos eventos pueden considerarse posibles precursores a la posterior crisis. El 18 de febrero de 2007 el VNH inició su proceso de reactivación, con la presencia de enjambres sísmicos de tipo VT, localizados en la cima del volcán, que fueron los precedentes de una fase corta, pero de intensa actividad sísmica, con la ocurrencia de eventos VT acompañados de eventos asociados al tránsito de fluidos (tipo LP) y gases a través de los conductos volcánicos, el 19 de febrero de 2007, en menos de 24 horas del primer incremento sísmico, se presentó una erupción freática, en medio de la cual se registraron varios eventos de tipo VT y se destacó un sismo de 4.1 grados de magnitud, uno de los sismos más energéticos registrados hasta esa fecha en la historia del volcán, al episodio de la erupción freática y a los eventos sísmicos VT de magnitudes importantes, se le asociaron la formación de una fisura de 2 km de largo y 50 m de ancho en la parte alta del

edificio volcánico (Santacoloma et al., 2009), entre los picos Central y la Cresta en dirección NS, la formación de una columna de ceniza y gas de 1.5 km de altura y la generación de un lahar, que se inició en el costado occidental del edificio y que posteriormente el flujo de lodo viajó por el río Páez, después de 5 horas de la primera erupción, se presentó una nueva de menor magnitud, la cual no tuvo un flujo de lodo asociado (Santacoloma et al., 2009).

Durante los meses siguientes entre febrero y mayo el VNH presentó un periodo de relajación parcial del sistema, puesto que se presentaron algunas fluctuaciones que terminaron con pequeñas emisiones de cenizas. No obstante, el 17 de abril se presentó un nuevo incremento de la actividad sísmica, con un comportamiento muy similar a la anterior erupción, primeramente se registró un enjambre sísmico de eventos de tipo VT, a profundidades muy superficiales inferiores a 4 km y localizados sobre el pico central, posteriormente se registró un gran número de sismos asociados a movimiento de fluido, los cuales el 18 de abril desencadenaron la segunda erupción freática, esta erupción originó: una nueva fisura de 2.3 Km de largo, que atravesó los costados SW y NE del Pico Central, una columna eruptiva de 3 km sobre la cima de volcán, pérdida de una porción de masa del glaciar El Oso; y la formación de un nuevo lahar de volumen mayor al anterior, y el cual esta vez se encauzó por los ríos Paéz y Símbolá, el lahar de esta erupción no afectó vidas humanas, pero si afecto seriamente la infraestructura vial de la zona (Santacoloma et al., 2009).

La actividad sísmica del VNH no retorno a su nivel base después de los dos episodios eruptivos. Entre marzo y septiembre de 2008 la actividad sísmica fue aumentando gradualmente y ocurrieron 20 VT con magnitudes importantes entre 3.0 y 4.9 grados, además de señales sísmicas LP y Tremor (tipo TR) asociadas con emisiones de ceniza y gases volcánicos a la superficie. Entre octubre y noviembre el VNH volvía a registrar intensa actividad sísmica con eventos de tipo LP y sismicidad Híbrido que involucra tanto mecanismos de fractura como de transito de fluidos (tipo HB), posiblemente estas señales sísmicas estaban relacionadas con intrusión de material magmático hacia niveles superficiales (Cardona et al., 2009). El 20 de noviembre de 2008 se presentó la última erupción del VNH registrada hasta la fecha, de tipo freatomagmatica que al igual que en las erupciones anteriores generó un lahar de mayor volumen y afectación que los anteriores, formación de una nuevo cráter de aproximadamente 1 km de largo y 300m de ancho (Santacoloma et al., 2009), a través del cual se presentó la extrusión de un domo lávico en el costado suroccidental del Pico Central, sobre el cual posteriormente se evidencio una nueva intrusión de material magmático en el segundo semestre de 2009, este proceso de emplazamiento se mantuvo hasta septiembre de 2010, fecha en la cual el VNH retorno a su proceso de relajación.

Desde 2011 hasta mayo de 2016, el volcán ha permanecido en Nivel Amarillo, lo cual indica que es Activo, pero se encuentra en un nivel estable de actividad, con la posibilidad de presentar cambios en su comportamiento. De la actividad reciente

se destaca el incremento sísmico de tipo VT registrado entre el 9 y 12 de enero de 2014, sismicidad que se localizó hacia el costado NE del volcán a 13 km del Pico Central, esta sismicidad presentó magnitudes importantes, dentro de las cuales sobresalen dos eventos con magnitudes de 4.5 y 5.0 grados en la escala de Richter, reportados como sentidos en los departamentos del Cauca, Valle de Cauca, Tolima y Huila.

4.4.4. Aspectos Climáticos

Según el IDEAM, (2012) los seis glaciares que Colombia tiene en la actualidad están sometidos a la dinámica climática mundial, así como a las variaciones climatológicas inducidas por la Zona de Confluencia Intertropical y el fenómeno “El niño Oscilación del Sur, ENSO”. Las estaciones meteorológicas que el IDEAM tiene localizadas a partir de los 3000 msnm, y según los estudios realizados por la misma institución demuestran que en los últimos 30 años se ha evidenciado una tendencia de disminución en la precipitación y en general un incremento en la temperatura. La Tabla 7, tomada del IDEAM, (2012). Presenta la tendencia promedio de las temperaturas máximas, medias y mínimas en diferentes pisos térmicos en los últimos 30 años.

Tabla 7. Tendencia promedio de las temperaturas máximas, medias y mínimas en diferentes pisos térmicos en los últimos 30 años

Piso Térmico	Altitud (msnm)	Tendencia promedio temperatura Máxima °C/año	Tendencia promedio temperatura Media °C/año	Tendencia promedio temperatura Mínimo °C/año
Páramo alto	3701 - 4200	1,07	0,41	0,30
Páramo bajo	3001 - 3700	0,43	0,14	0,09
Frío	2001 - 3000	0,2	0,2	0,2
Templado	1001 - 2000	0,0	0,2	0,2
Cálido	1 - 1000	0,3	0,1	0,2

Fuente: IDEAM, (2012).

Se observa que en todos los pisos térmicos hay una tendencia positiva en la tasa de aumento de temperatura y son más grandes los cambios en las zonas altas, precisamente en las que se encuentran los glaciares. La disminución de la precipitación, los aumentos de temperatura sumada a cambiantes fenómenos climáticos que se presentan a nivel mundial, son unas las causas directas de los cambios del clima de las zonas de glaciar y es conocido que estos cambios afectan los procesos de retroceso glaciar. El grado de afectación a los glaciares es dependiente de la localización y tamaño de las masas de hielo (Francou y Vicent, 2007). El tamaño de la superficie glaciar del VNH es considerada como bajo y detallando en los trabajos realizados anteriormente relacionados con el retroceso glaciar, la tasa de cambio cada vez es más alta, es decir mientras más bajo sea el

volumen de hielo más alta es la tasa de cambio y con el paso del tiempo se observara que el retroceso glaciario se acelera.

4.5. ANTECEDENTES

Con respecto al cambio glaciario en el VNH se han realizado pocos trabajos, entre los más destacados se encuentra el de Pulgarín et al. (2005), en el que presenta la variación del área y volumen glaciario del VNH entre 1961 y 1965, este estudio se realizó mediante el empleo de la fotogrametría analítica digital, empleándose el planicomp P3 de Zeiss. En los resultados obtenidos encontraron no solo cambios en el área glaciario, sino también en el volumen, morfología y del complejo sistema de grietas, incluso lenguas glaciares que habían desaparecido. Así mismo detallaron que no siempre se presentó pérdida de masa glaciario, entre 1961 y 1965 se presentó un aumento del área glaciario del 1.06%. Del análisis individual de las lenguas glaciares encontraron que entre 1961 y 1965 las lenguas el Mayor, el Oso y el venado (denominadas por Correa y Cepeda, 1995), perdieron respectivamente el 20%, 40%, 12.3% de su ancho medio; en cambio con respecto a sus longitudes encontraron que la lengua el Mayor ganó el 0.53%, y la lengua El Oso y el Venado perdieron el 36.5% y el 23%, respectivamente. Definieron que el retroceso en planta ha sido el más marcado, principalmente en los sectores SW, SE, S, NW y en menor proporción en el N. De los aportes más importantes se encuentran los datos de máxima altura y área glaciario que han sido tomados como referencia para posteriores trabajos. Para el año 1995, definieron que la mayor altura correspondía al Pico Central, con 5354 m.s.n.m. y que el sistema glaciario mantenía una cobertura glaciario de 13.39 km². En la Figura 2, se presenta la delimitación de la superficie glaciario para los periodos evaluados y los nombres de las lenguas glaciares correspondientes.

Ceballos et al. (2007) por su parte realizó un estudio sobre retroceso glaciario en Colombia y su relación con el cambio climático, teniendo como caso principal el Nevado de Santa Isabel, sin embargo también calculó el retroceso glaciario para otros volcanes entre ellos el VNH, encontrando que el glaciario en los últimos 106 años presentaba una pérdida de 53% y en los últimos 45 años (hasta el 2003) presentaba una pérdida equivalente al 25%, de modo que hasta aquella fecha el glaciario en los últimos periodos había presentado una velocidad menor de retroceso

Del mismo modo en 2012 el IDEAM publicó una investigación desarrollada para cuantificar los glaciares Colombianos actuales, para el VNH de acuerdo con la interpretación que realizaron de la imagen satelital ALOS en 2010, determinaron el glaciario del VNH tenía una extensión de 9,7 km², lo que equivale al 21 % de la superficie glaciario colombiana.

Llinas y Meneses, (2004) también realizaron un estudio en Colombia para determinar el retroceso glaciario en el Volcán Santa Isabel y su Incidencia Hídrica

en la Ciudad de Pereira, mediante la utilización de técnicas y herramientas fotogramétricas, imágenes de satélite, sistemas de información geográfica y trabajo de campo. Los resultados evidenciaron que el hielo desaparecido en la cuenca glaciar que drena al río Otún entre 1959 y 1995 tiene una equivalencia de 47.268.951 m³, lo que representa el 0.04 m³/s en caudal del río.

A nivel mundial se han realizado numerosos estudios para monitorear el retroceso glaciar en volcanes, tanto para determinar los efectos del cambio climático como para evaluar el riesgo por la generación de lahares, que es uno de los mayores peligros que amenaza la vida humana e infraestructura. Sudamérica cuenta con la cadena de los andes, que es la mayor cadena de glaciares tropicales del mundo y que en los últimos años se ha reducido notablemente. Según Ingeominas, (2010) los glaciares de las zonas tropicales presentan evidencias de vulnerabilidad al cambio climático y en particular a la ocurrencia del Fenómeno del Niño. Esta anomalía se ha visto reflejada en estudios desarrollados en Perú, Ecuador, Bolivia, Colombia, Venezuela y México.

Alcalá (2007) desarrolló un estudio de la evolución de los glaciares en El Complejo Volcánico Ampato (Peru) utilizando fotografías aéreas, imágenes de satélite y verificación de campo, encontrando que el glaciar en el 2000 representa el 3.94% en comparación con el glaciar del LGM (último máximo avance glaciar), lo que indica un acelerado retroceso glaciar, el autor recalca que se debe tener en cuenta que adicionalmente a los cambios en las características climáticas, durante este tiempo han tenido lugar eventos volcánicos que en general debieron provocar el retroceso de la masa de hielo, aunque también aclara que es posible que sucediese el efecto contrario.

En Ecuador Jaramillo (2012) desarrolló un estudio para la vertiente norte del volcán Cotopaxi utilizando imágenes satelitales ASTER y fotografías aéreas, Jaramillo encontró con respecto a los glaciares actuales una disminución del 5.30% para el periodo de 2000 a 2009 y utilizando la delimitación de los paleoglaciares para la época Glaciar Tardío y Heloceno Pequeña edad de Hielo encontró un retroceso del 60.19%, concluye que el ritmo de retroceso de la superficie glaciar se ha incrementado en las dos últimas décadas.

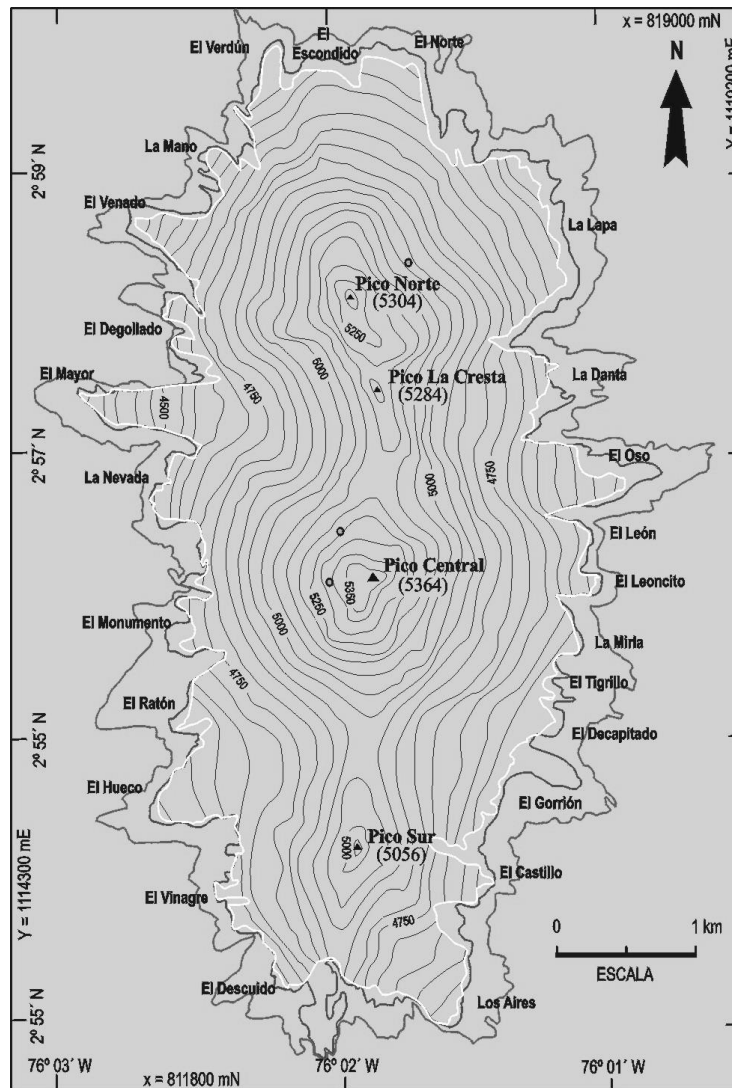
Carrillo y Yépez (2008) estudiaron la evolución de los glaciares en los Andes Venezolanos (glaciares de los Picos Humboldt y Bonpland), a través del método DNSI de análisis multiespectral de imágenes SPOT-5, para el año 2008 calcularon un área de cobertura de 0.33 km², del estudio concluyeron que desde 1952 hasta enero de 2008 el glaciar ha perdido un área de 1.7 km², y que además la tasa de retroceso se elevó en la segunda mitad del siglo XX y principios del XXI, alcanzando una velocidad de 30.3 m/año, lo que corresponde a un retroceso del 83.74% de la cobertura en 1952. Finalmente advierten que de continuar el acelerado retroceso de los glaciares en los Andes Venezolanos, para el 2018 podría presentarse su extinción total.

De igual manera en México se han desarrollado múltiples estudios para determinar la evolución de los glaciares, entre ellos se destaca el realizado por Cortes y Delgado (2010), en el que reconocen que los glaciares mexicanos son sistemas físicos determinados tanto por la actividad volcánica como por las condiciones climáticas locales y globales. Mediante la utilización de ortoimágenes obtenidas de imágenes ASTER calcularon los cambios morfológicos y de área ocurridos entre 2001 a 2007 en el Glaciar Norte del volcán Citlaltépetl, la ventaja de este estudio radica en la baja actividad volcánica que prácticamente resulta despreciable, por lo que el único factor incidente en el retroceso glaciar es el clima regional y global en la zona. Al final del estudio concluyen que el glaciar Norte del volcán Citlaltépetl presenta una clara disminución en el área glaciada correspondiente al 33% en 6 años, con respecto al área delimitada anteriormente en 1958, al área a 2007 presenta un 72% de pérdida, así mismo concluyeron que el límite inferior del glaciar se está moviendo hacia altitudes cada vez más elevadas a una velocidad de 59 m.s.n.m. por año, adicionalmente encontraron que la tasa de retroceso glaciar entre 2001 y 2007 presenta alta variabilidad, para el periodo de 2001 a 2002, la tasa resultante fue de 204.115 m²/año, mientras que para el periodo 2005 a 2007 fue de 16.758 m²/año.

Es preciso señalar que según el BMI, (2014) de todos glaciares de la cordillera de los andes, el que ha prendido las alarmas es el Chacaltaya ubicado en Bolivia, el cual tenía fama de ser la pista de esquí mas alta del mundo, en 1986 aun permitía la practica de este deporte; sin embargo actualmente es una montaña totalmente descubierta, pues su glaciar ya esta extinto. Entre 1940 y 1982 el retroceso glaciar fue relativamente lento, la tasa de retroceso estaba en 0.95 cm/año, para 1982 a 1996 el promedio del retroceso subió notablemente a 6.05 m/año. Se evidenció que durante los años 90 el glaciar de Chacaltaya experimentó su mayor retroceso y finalizó en 2010. Actualmente solo lo cubren algunos parches de nieve en algunas temporadas específicas del año.

Como se evidencia los efectos del cambio climático en los glaciares de Colombia, en los glaciares de la cadena de los andes y a nivel mundial han sido nefastos, aunque se han presentado en diferente proporción dependiendo de algunas variaciones climáticas locales o de actividad volcánica adicional. En el presente trabajo se pretende actualizar la evolución que ha tenido la superficie glaciar del VNH hasta el 2016, realizar el seguimiento multitemporal y analizar las posibles causas de este retroceso aprovechando las nuevas técnicas de monitoreo la tierra.

Figura 2. Nombres de las lenguas glaciares y límites del área glaciar entre 1961 y 1995



Fuente: Pulgarín et al. (2005)

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE TRABAJO

El presente proyecto corresponde a un trabajo de investigación aplicada utilizando el desarrollo tecnológico en los sistemas de percepción remota y las herramientas de los SIG para el tratamiento, organización y análisis de los datos. Las áreas involucradas son las de estudios ambientales, meteorológicos y de gestión del riesgo.

Al iniciar la investigación se buscó imágenes satelitales que se adaptaran y apoyaran el desarrollo total de los objetivos trazados. Se encontró que las imágenes ASTER y LANDSAT satisfacen los requerimientos en cuanto a resolución temporal, espectral y espacial, para realizar análisis detallados de la evolución temporal del glaciar en el VNH. El trabajo se desarrollara en tres fases, la primera corresponde a seleccionar los periodos de análisis y las imágenes que cumplan con los parámetros de visibilidad y nubosidad durante los periodos seleccionados; la segunda concierne al tratamiento digital de las imágenes y la última fase comprende el análisis de los resultados. El software que se va a utilizar para el tratamiento digital de las imágenes es ENVI 5.0. y Arcgis 10.2. para el análisis y presentación de resultados

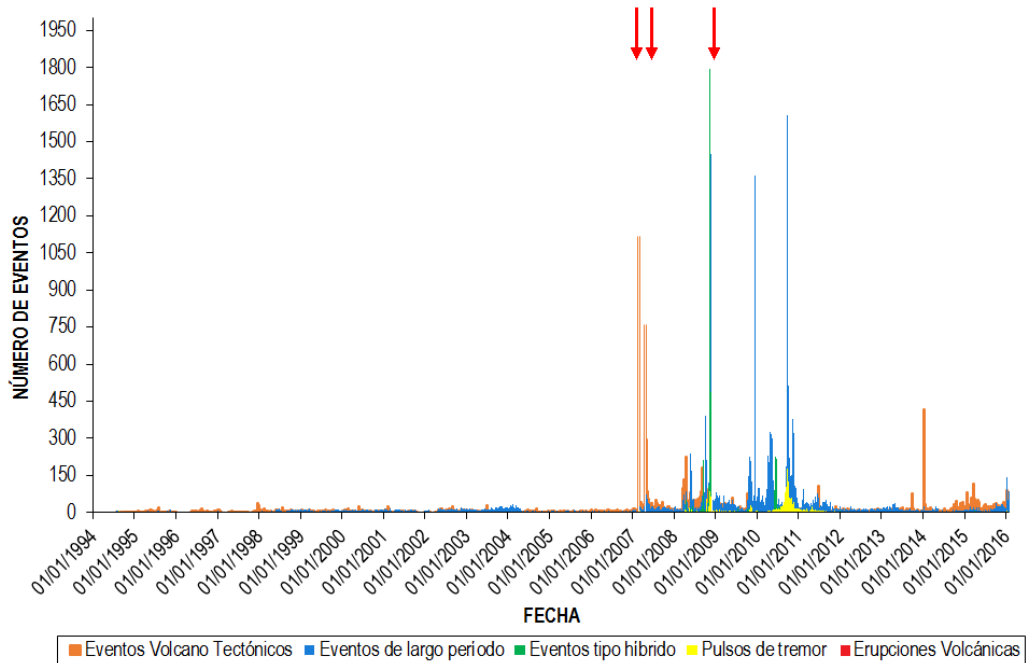
5.2. PROCEDIMIENTO

5.2.1. Determinar los periodos de análisis

El seguimiento multitemporal de la evolución del glaciar del VNH se trabajó bajo dos escenarios: el primero, abarcar el mayor tiempo posible con el fin de realizar un análisis completo del comportamiento; el segundo, analizar los periodos en los que se presentó actividad anómala en el volcán, especialmente para 2007 y 2008, cuando en el VNH se presentaron tres erupciones, cada una de ellas en diferente proporción afectó la superficie glaciar del VNH. Con respecto a los datos climáticos no se encontró variaciones puntuales para analizar.

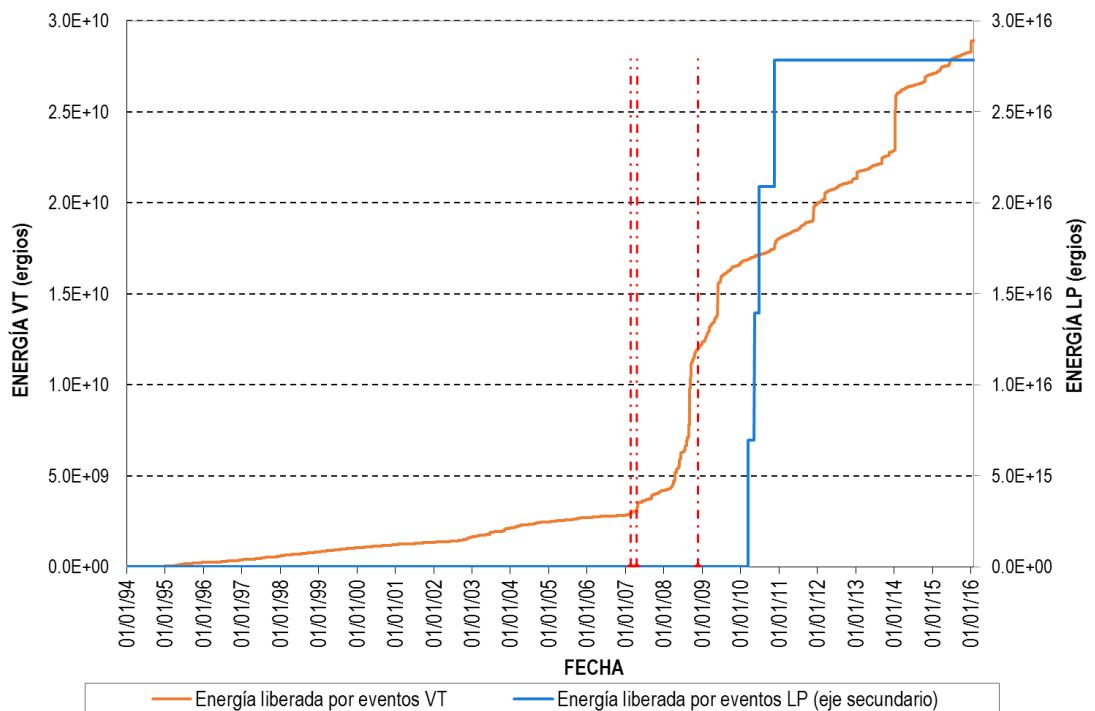
En la Figura 3 se presenta los eventos sísmicos registrados diariamente en el VNH, asociados con el fracturamiento de material cortical (VT) y al tránsito de fluidos de tipo Largo Periodo (LP), tipo Híbridos que involucran tanto mecanismos de movimiento de fluidos como mecanismos de fracturamiento de roca (HB), y tremores volcánicos, relacionados en muchos casos con salidas de ceniza (TR). En la Figura 3 se aprecia que hasta antes del 2007 no se presentaron incrementos significativos en el número de eventos, en promedio para la fecha se registraban 9 sismos por día, algunas pequeñas fluctuaciones que se observan son propias de un volcán activo. Sin embargo a partir del 18 de marzo de 2007, se observó dramáticos incrementos en el número de eventos registrados diariamente, se contabilizaron hasta 1320 sismos por día, de esta fecha en adelante se detalla alta actividad sísmica. Esta tendencia permaneció constante con algunas variaciones o pequeños periodos de reposo hasta noviembre de 2008, cuando se presentó la última erupción registrada hasta el momento en el VNH. La actividad sísmica no retorno a sus niveles base, debido a la extrusión de un cuerpo dómico, cuya manifestación estuvo acompañada de intensa actividad de fluidos hasta finales del 2010, a partir de 2011, el volcán entro a un nivel más bajo de actividad, con algunos incrementos temporales de sismicidad asociada al fracturamiento de roca.

Figura 3. Número de eventos registrados por día en el VNH entre 1994 y 2016



Fuente: Datos del SGC – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán

Figura 4. Energía sísmica acumulada en el VNH liberada entre 1994 y 2016



Fuente: Datos del SGC – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán

La Figura 4 presenta la energía sísmica liberada de forma acumulada por los eventos de tipo VT y LP. Como era de esperarse entre 2007 y 2010 se observan grandes liberaciones de energía, por lo cual analizando la actividad sísmica del volcán es importante detallar el comportamiento del glaciar del VNH antes de 2007 y después de 2011 (periodo de crisis volcánica). En las fechas diferentes a este periodo el volcán ha permanecido en un nivel estable de actividad.

De acuerdo a lo anterior, y al catálogo de las imágenes Landsat en Earth Resources Observation and Science Center (EROS) y de las imágenes ASTER suministradas por Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) que cumplieran con los requerimientos de nubosidad y que en lo posible correspondieran a la misma temporada del año, se seleccionaron las siguientes imágenes satelitales (Tabla 8).

Tabla 8. Imágenes Satelitales que se usaron en el desarrollo de la investigación

Sensor	ID Escena	Fecha	Hora (UT)
Landsat 5	LT50090581987014XXX01	14 de enero de 1987	14:39:00.68
Landsat 5	LT50090581999191CPE07	10 de julio de 2009	14:57:04.57
Landsat 7	LE70090582007029EDC00	29 de enero de 2007	15:09:38.84
ASTER	AST_L1T_00302232007153058	23 de febrero de 2007	15:30:58.00
ASTER	AST_L1T_00301242011153608	24 de enero de 2011	15:36:08:00
Landsat 8	LC80090582016030LGN00	30 de enero de 2016	15:19:23.17

5.2.2. Procesamiento digital de imágenes satelitales

En el procesamiento digital de imágenes satelitales, existen diferentes técnicas que se pueden aplicar para corregir las interferencias o errores a los cuales están sometidas las imágenes durante su recepción. Con el fin de analizar de manera precisa la información requerida es necesario realizar correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas, así mismo existen otros procedimientos que permiten realizar transformaciones a la imagen facilitando el análisis visual de los datos, se destacan los procedimientos de filtrado, realce y composición de color RGB. A continuación se describe las correcciones aplicadas a las imágenes satelitales utilizadas en el presente trabajo y la metodología aplicada.

Dependiendo del nivel de procesamiento con el que sean suministradas las imágenes, se realizara las correcciones pertinentes, las imágenes Landsat Nivel 1 adquiridas para este trabajo no tienen correcciones adicionales radiométricas ni geométricas, por lo que deben ser sujeto de corrección, en cambio las imágenes ASTER Nivel 1T suministradas por LP DAAC, ya se encuentran ortorectificadas, utilizando los datos digitales de elevación GLS2000, lo que en si es un DEM del suelo desnudo y los puntos de control en tierra han sido derivados de Land Proceses (LP) Distributed Active Archive Center (DACC). Adicionalmente las

imágenes están corregidas por radiancia, por lo cual no era necesario realizar transformaciones adicionales.

5.2.2.1. Corrección Radiométrica de bandas

La corrección radiométrica en si abarca diferentes procesos que se realizan para corregir los pixeles incorrectos que pueden estar contenidos en las imágenes satelitales, ya sea por fallas en los sensores o por diferentes condiciones atmosféricas y de iluminación. Para efectuar esta corrección en las imágenes se utilizó como principal insumo el documento de Chander et al., 2009, el cual contiene los coeficientes (Tabla 9) y las ecuaciones para efectuar la corrección radiométrica banda por banda de los sensores Landsat TM y Landsat ETM+.

Tabla 9. Rango espectral y rangos dinámicos para post – calibración

TM Sensores ($Q_{calmin} = 1$ y $Q_{calmax} = 255$)					
Banda Unidades	Longitud de Onda Central	$LMIN_{\lambda}$ W/(m ² sr m)	$LMAX_{\lambda}$ W/(m ² sr m)	$G_{rescale}$ (W/m ² sr m)/DN	$Br_{rescale}$ W/(m ² sr m)
L5 TM (LPGS)					
1	0.485	-1.52	169	0.671339	-2.19
2	0.569	-2.84	333	1.322205	-4.16
3	0.660	-1.17	264	1.043976	-2.21
4	0.840	-1.51	221	0.876024	-2.39
5	1.676	-0.37	30.2	0.120354	-0.49
6	11.435	1.2378	15.3032	0.055376	1.18
7	2.223	-0.15	16.5	0.065551	-0.22
TM Sensores ($Q_{calmin} = 1$ y $Q_{calmax} = 255$)					
Banda Unidades	Longitud de Onda Central	$LMIN_{\lambda}$ W/(m ² sr m)	$LMAX_{\lambda}$ W/(m ² sr m)	$G_{rescale}$ (W/m ² sr m)/DN	$Br_{rescale}$ W/(m ² sr m)
L7 ETM (LPGS)					
1	0.483	-6.2	191.6	0.778740	-6.98
2	0.560	-6.4	196.5	0.798819	-7.20
3	0.662	-5.0	152.9	0.621654	-5.62
4	0.835	-5.1	157.4	0.639764	-5.74
5	1.648	-1.0	31.06	0.126220	-1.13
6	11.335	3.2	12.65	0.037205	3.16
7	2.206	-0.35	10.80	0.043898	-0.39
8	0.706	-4.7	158.3	0.641732	-5.34

Fuente: Chander et al., 2009

5.2.2.1.1. Transformación de ND a Radiancia y Reflectancia

La transformación de los ND (Números Digitales) de la imagen en parámetros físicos, permite una medición absoluta de estos valores, brindando confianza a las operaciones matemática, los cocientes entre bandas y la relación espectral de las clases temáticas entre otros. Esta corrección se aplica a cada una de las bandas por separado y para llevarla a cabo es necesario transformar los valores en escala de grises de los ND a valores de radiancia utilizando los respectivos coeficientes de cada banda, para ello se utiliza la siguiente expresión (Chander et al., 2009):

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) * (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda}$$

o simplificando

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * Q_{cal} + B_{rescale}$$

Donde

$$G_{rescale} = \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}$$

$$B_{rescale} = LMIN_{\lambda} - \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) * Q_{calmin}$$

Donde

L_{λ} = Radiación espectral en la abertura del sensor [W/(m² sr μm)]

Q_{cal} = Valor del píxel calibrado cuantificado de la banda es específico

Q_{calmin} = Valor del píxel mínimo calibrado cuantificado correspondiente a $LMIN_{\lambda}$ [ND]

Q_{calmax} = Valor del píxel máximo calibrado cuantificado correspondiente a $LMAX_{\lambda}$ [ND]

$LMIN_{\lambda}$ = Espectro del sensor de radiancia que es calculada a Q_{calmin} [W/(m² sr μm)]

$LMAX_{\lambda}$ = Espectro del sensor de radiancia que es calculada a Q_{calmin} [W/(m² sr μm)]

$G_{rescale}$ = Factor de ganancia de cada banda específica de cambio de escala [W/(m² sr μm)] /ND]

$B_{rescale}$ = Factor de sesgo de cada banda específica de cambio de escala [W/(m² sr μm)]

A manera de ejemplo se sustituyó los coeficientes de la Tabla 9 correspondientes a la banda No 1 del sensor Landsat 5 TM en la ecuación 2. El valor de Q_{cal} depende de la banda en específico que se está trabajando, razón por la cual una vez se tenga establecida la ecuación, el programa ENVI 5.0 puede correr la expresión reemplazando el valor de b por el valor de la banda proporcionada.

$$G_{rescale} = 0.671339$$

$$B_{rescale} = - 2.19$$

$$Q_{cal} = b_2$$

$$L_{\lambda} = 0.671339 * b_1 + (-2.19)$$

Para acelerar este proceso sistemático el programa ENVI 5.0 cuenta con un módulo en la rutina de corrección radiométrica que permite realizar esta transformación, esta rutina necesita que las bandas de la imagen se encuentren separadas y para el procesamiento es necesario suministrarle los siguientes datos: el tipo de sensor, la fecha de adquisición de la imagen, el valor de la altitud solar y el número de la banda a corregir, estos datos son extraídos del metadato de la imagen (Figura 5). Es importante verificar que el número de la banda suministrado corresponda con la que se está efectuando la corrección, ya que de eso depende que el programa ENVI 5.0 seleccione automáticamente los coeficientes adecuados. Se repite el procedimiento para cada una de las bandas, exceptuando la banda termal y se compila las bandas teniendo en cuenta el orden correspondiente. Con ello se ha convertido las NDS de la imagen a valores de radiancia. Para reacomodar el orden de los pixeles y lograr que la imagen quede en valores de reflectancia, requisito previo antes de aplicar la corrección atmosférica, es necesario convertir los valores de BSQ que es el formato de las imágenes en radiancia a formato BILL, para este proceso también se utilizó el software ENVI 5.0 (Figura 6).

Figura 5. Conversión en ENVI 5.0 de los NDS de la imagen Landsat 5 TM del 10 de julio de 1999 a valores de radiancia

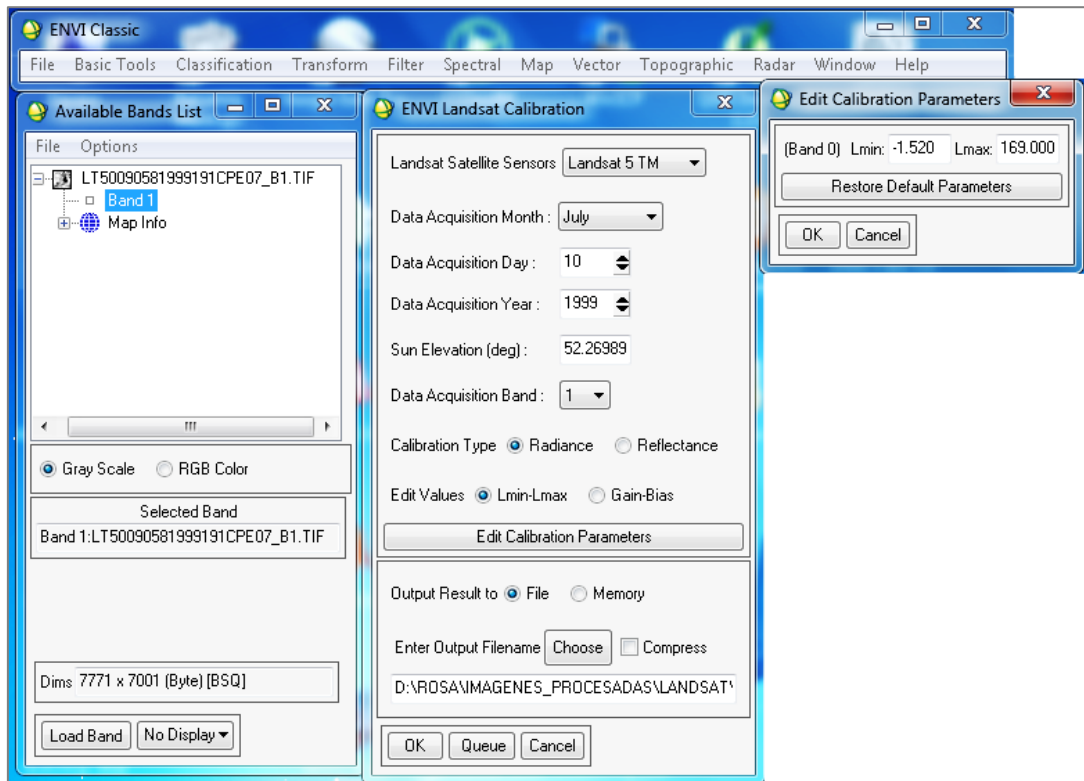


Figura 6. Conversión en ENVI 5.0 de los valores de radiancia de la imagen Landsat 5 TM del 10 de julio de 1999 a formato BILL

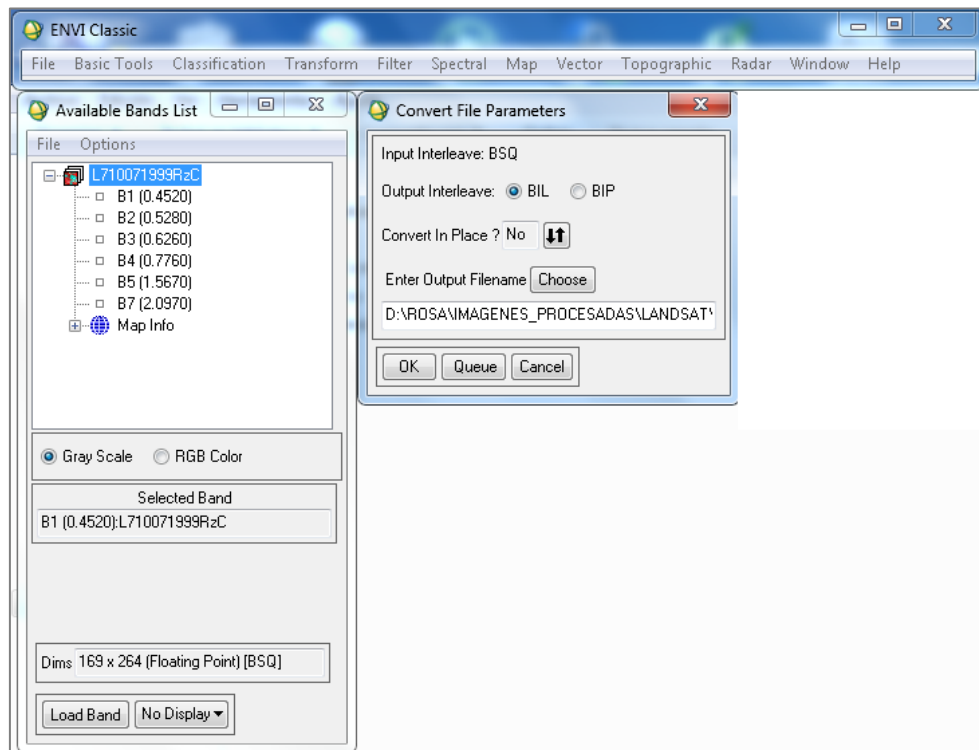
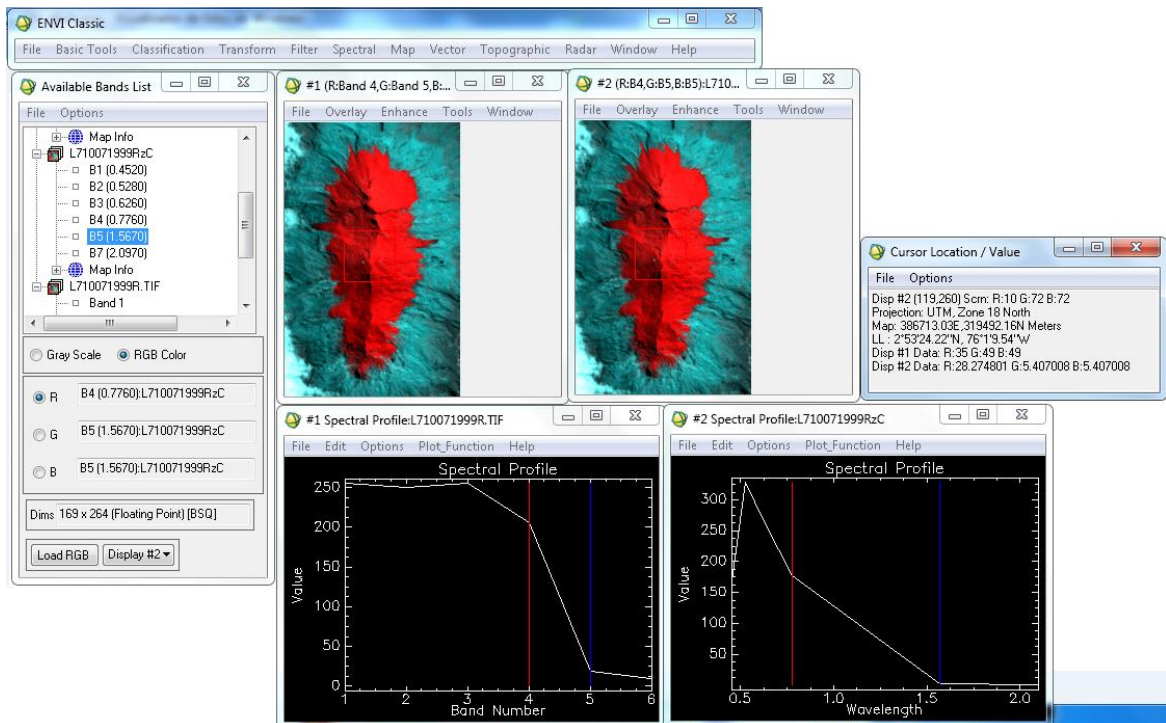


Figura 7. Comparación de una imagen Landsat en NDS y Radiancia.



En la Figura 7, se presenta la comparación de la visualización y de las firmas espectrales de una imagen del satélite Landsat 5, en NDS y en valores transformados a radiancia. La imagen de la derecha y su correspondiente firma espectral muestra los valores de los NDS correspondientes (Números enteros), mientras que la imagen de la izquierda y su firma espectral representa la imagen transformada en valores de radiancia (Números decimales)..

5.2.2.1.2. Corrección Atmosférica

Esta corrección se aplica para eliminar tanto los efectos de los aerosoles suspendidos en la atmosfera como los efectos generados por las mismas condiciones atmosféricas, logrando mejorar la calidad visual de la imagen y obteniendo valores reales de la reflectividad del terreno. Para ello se requiere la relación del satélite con los respectivos valores de los parámetros meteorológicos propios de cada región.

La corrección atmosférica para el presente trabajo se realizó mediante el módulo FLAASH del software ENVI 5.0, el cual utiliza algoritmos y rutinas para calcular las condiciones atmosféricas como visibilidad, nubosidad, gradientes de temperatura y humedad, vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂) y dispersión atmosférica de acuerdo a la zona de trabajo e información que se le suministre. Una vez se tengan todas las bandas de la imagen en formato BILL, se abre cada banda en el módulo FLAASH aplicándole un factor de escala de 10, para transformar las unidades de la imagen en $Mw/cm^2\mu m sr$. Seguidamente es necesario ingresar al programa los datos del sensor como: la altitud, la elevación promedio o del centro de la imagen, el tamaño del pixel, la fecha y hora de adquisición de la imagen, estos datos permiten calibrar la distancia de la tierra al sol en el instante preciso de la toma de la imagen por parte del satélite. Para calcular el ángulo solar es necesario ingresar las coordenadas en latitud y longitud del centro de la imagen, para finalizar, la rutina necesita que se seleccione un Modelo atmosférico y de aerosol para la corrección, considerando la localización del Volcán Nevado del Huila se optó por escoger un Modelo de atmosfera tropical y de aerosol para zonas rurales como se observa en la Figura 8, en la Figura 9 se muestra la imagen del sensor Landsat 5 TM con la corrección atmosférica.

Figura 8. Corrección atmosférica de la Imagen del sensor Landsat 5 TM mediante la utilización de la rutina FLAASH del Software ENVI 5.0

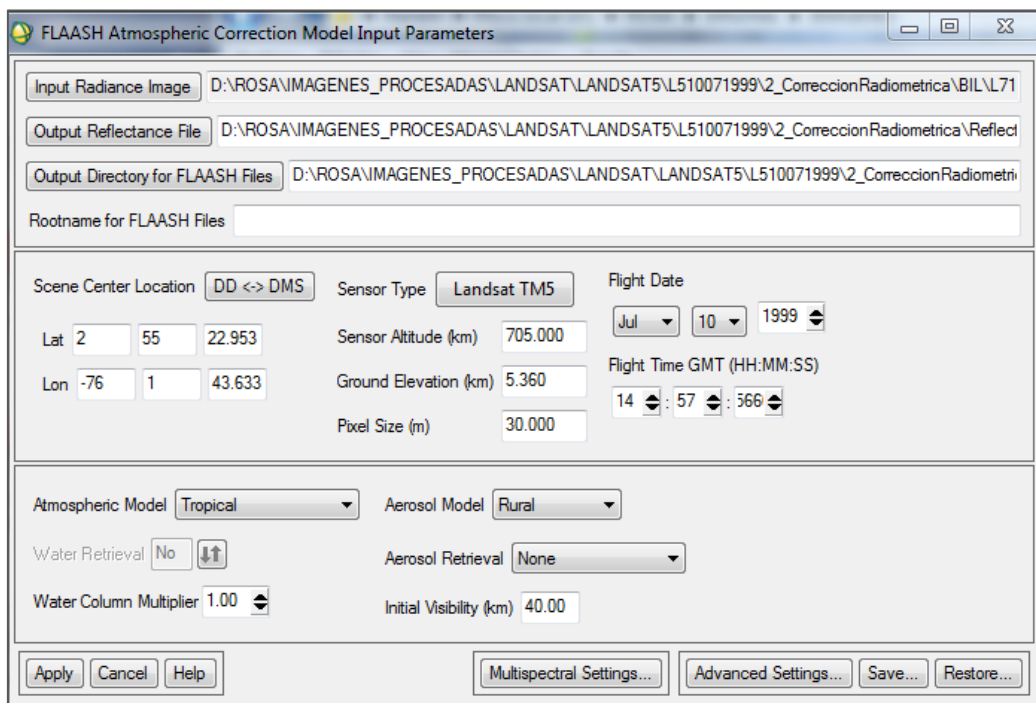
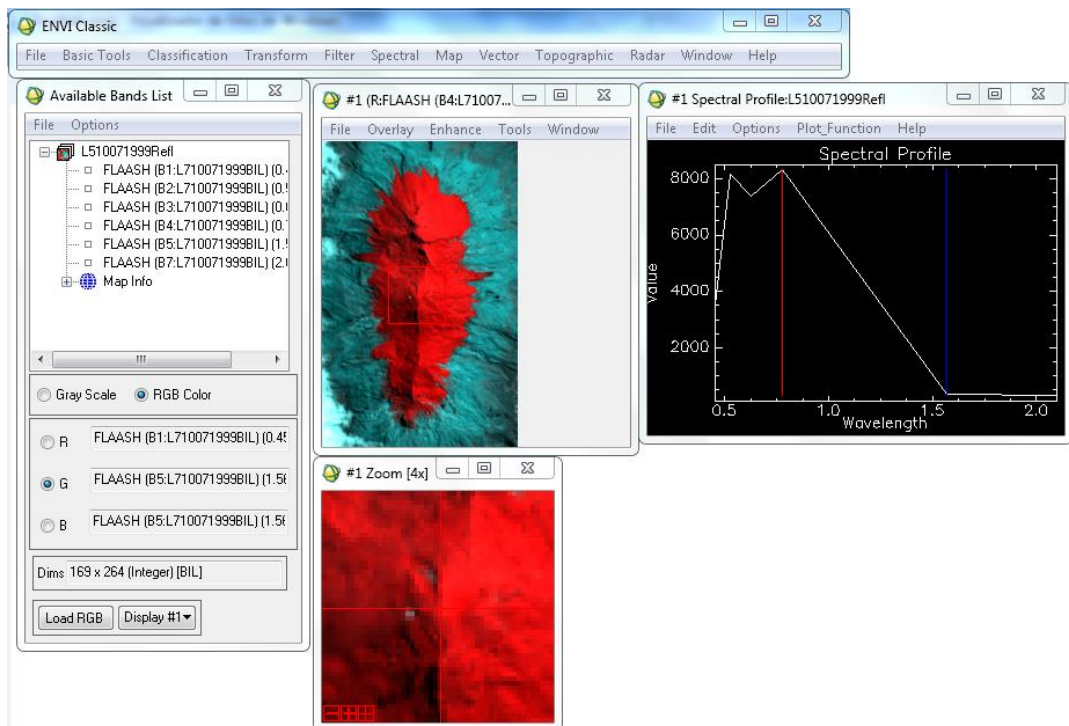


Figura 9. Imagen del sensor Landsat 5 TM con la corrección atmosférica de la rutina FLAASH del Software ENVI 5.0



5.2.2.2. Ortorectificación

Las imágenes satelitales están sometidas a distorsiones espaciales debido a las variaciones topográficas y a la curvatura de la superficie de la tierra, además de la inclinación propia del sensor que afecta sistemáticamente la distancia con la que se muestrea los datos en la imagen satelital. Cuanto más inclinada y topográficamente diversa sea la zona de interés, mayor será la distorsión de la imagen, razón por la cual el área que abarca el volcán Nevado del Huila, debido a las fuertes pendientes que contiene debe ser sujeto del proceso de ortorectificación.

La ortorectificación consiste en corregir o minimizar las distorsiones geométricas de la imagen con base a datos georeferenciados u ortorectificados previamente, como resultado se obtiene una ortoimagen, que es una imagen digital con corrección de desplazamientos por la perspectiva del sensor y el relieve. El método aplicado en este trabajo para la ortorectificación fue el Monoscópico, que utiliza una imagen en 2D y un Modelo Digital de Elevación 1D (DEM) para realizar la corrección. ENVI 5.0 cuenta con herramientas suficientes para realizar el tratamiento de ortorectificación, para ejecutar el proceso necesita: la imagen satelital combinada que se desea rectificar, los datos del sensor, los parámetros de vuelo, un modelo RPC, valor del Geoide para la zona de estudio y un modelo digital de elevación (DEM).

Las herramientas de ortorectificación de ENVI clásicas están adaptadas actualmente para realizar la rectificación directa de los siguientes sensores de barrido transversal: ASTER, CARTOSAT-1, FORMOSAT-2, GeoEye-1, IKONOS, OrbView-3, QuickBird, RapidEye, SPOT, y WorldView-1. ENVI busca un archivo RPC en los datos de estos sensores para realizar la ortorectificación. Como ha sido evidente las imágenes Landsat no poseen el modelo RPC; sin embargo se puede generar, esa fue una de las principales y dispendiosas tareas de este proceso.

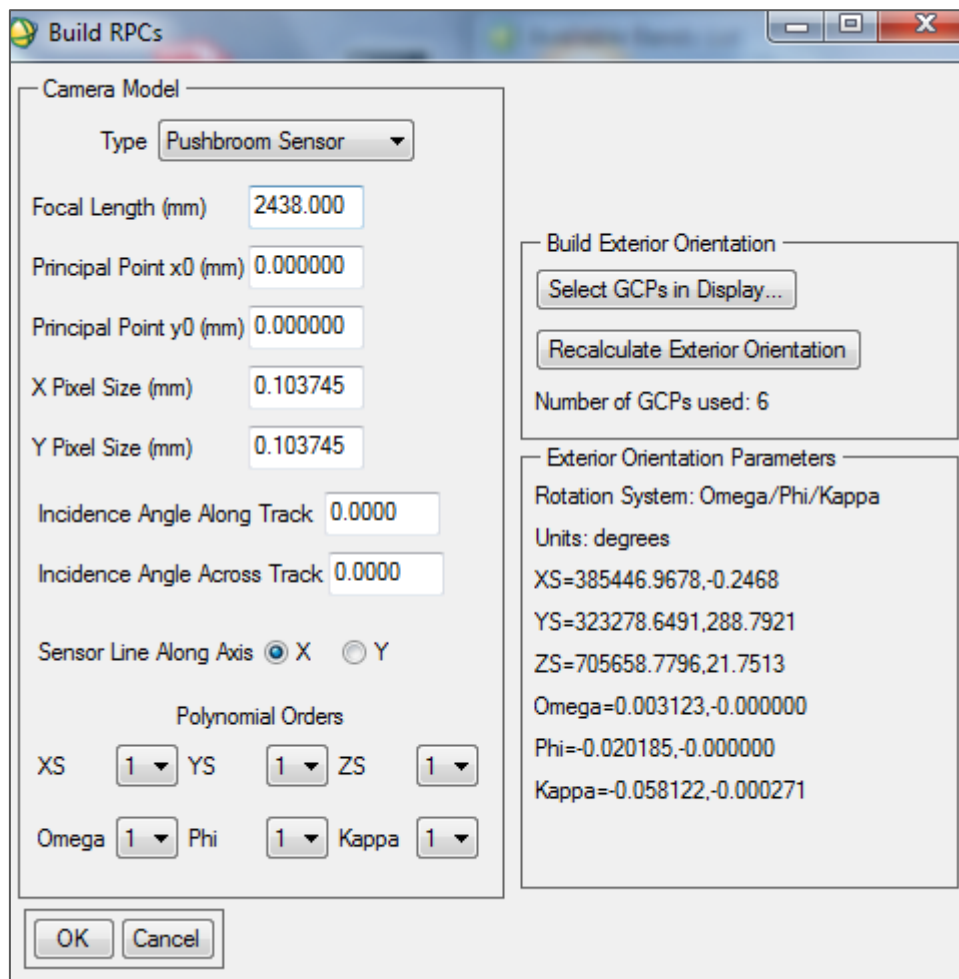
5.2.2.2.1. Construcción de un modelo RPC

ENVI 5.0 posee una herramienta capaz de construir y calcular el Coeficiente Polinómico Racional (RPC) de fotografías aéreas digitalizadas y de imágenes de sensores de barrido transversal. El programa a través de las ecuaciones de colinealidad que utiliza construye la geometría del sensor, transformando el sistema de coordenadas de píxeles de la cámara a un sistema de coordenadas espacial y determinando la posición y los parámetros de orientación angular asociados a la imagen.

La herramienta Build RPCs de ENVI necesita como principal insumo el tipo de sensor que adquirió la imagen o fotografía aérea, para el caso de los sensores de

barrido transversal el programa solicita adicionalmente una Distancia Focal (Focal Length mm) de la cámara del sensor, esta es una distancia desde el centro de la perspectiva al plano focal de la imagen, este valor proviene del reporte de calibración de la cámara, 2438 mm para el caso de los sensores Landsat 5 y 7 y 886 mm para el sensor Landsat 8; las coordenadas del punto principal de la imagen x_0 y y_0 , en ambos casos el valor por defecto es 0; tamaño del pixel X y Y, el cual se puede calcular mediante la relación $PS=f*GSD/H$, donde f es la distancia focal, GSD es la distancia de muestra de la superficie, H es la altura del sensor y PS es el tamaño del píxel en el lente de la cámara; el ángulo de incidencia, este valor se utiliza para establecer los valores iniciales de los parámetros exteriores de orientación y no tienen que ser exactos (HARRIS, 2016), en la Figura 10 se presenta este procedimiento.

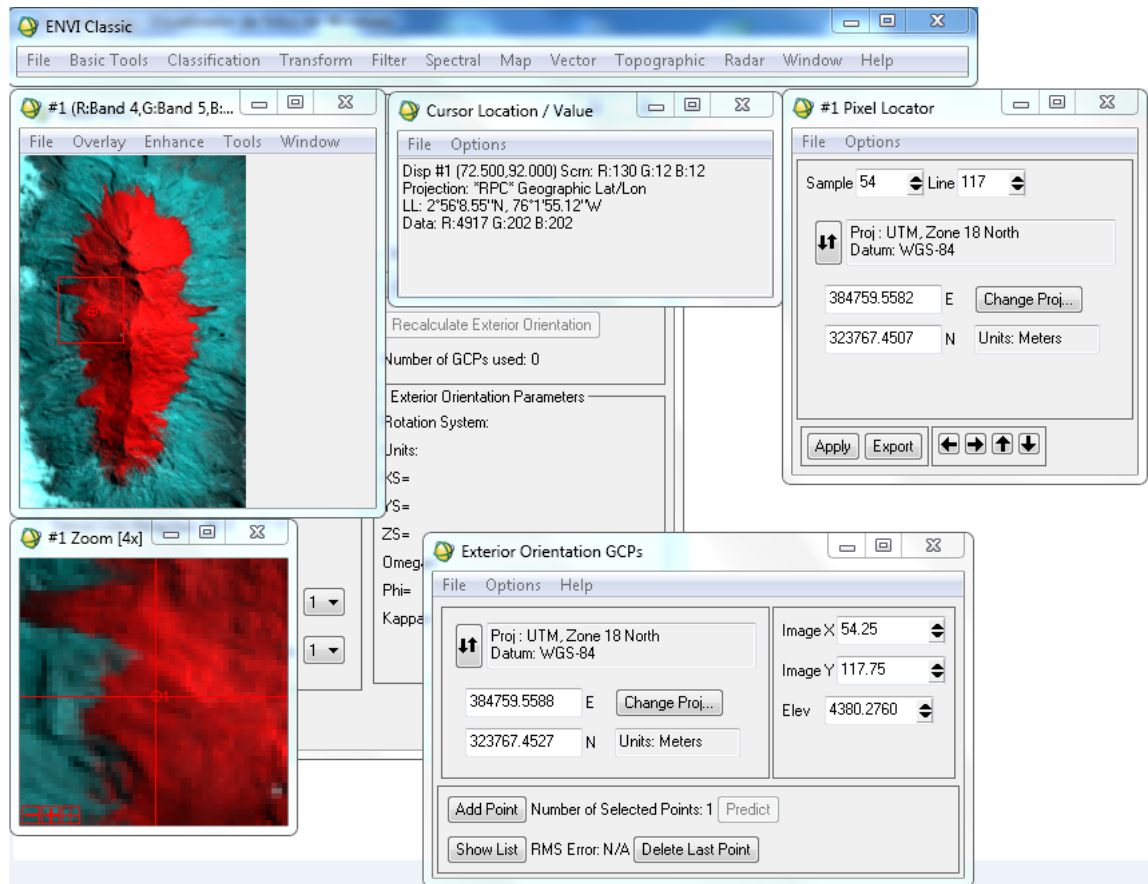
Figura 10. Construcción del modelo RPCs en el Software ENVI 5.0



Seguidamente es necesario restaurar o construir los GCP (Puntos de Control Terrestres), ENVI es capaz de construir los GCPs con la herramienta Select GCP in Display, únicamente necesita la información espacial de la imagen del tipo de

proyección. En adelante se establece la orientación externa de los GCPs, centrando los puntos de mira en cada GCP, con lo que las coordenadas las carga el programa y únicamente necesita la información de altura del punto, es necesario cargar al menos 6 GCP y verificar que los errores acumulados sean bajos. Una vez terminado este proceso se guarda o se exporta los GCPs para la construcción del RPC. (Figura 11).

Figura 11. Construcción Puntos de Control Terrestres GCP en el Software ENVI 5.0

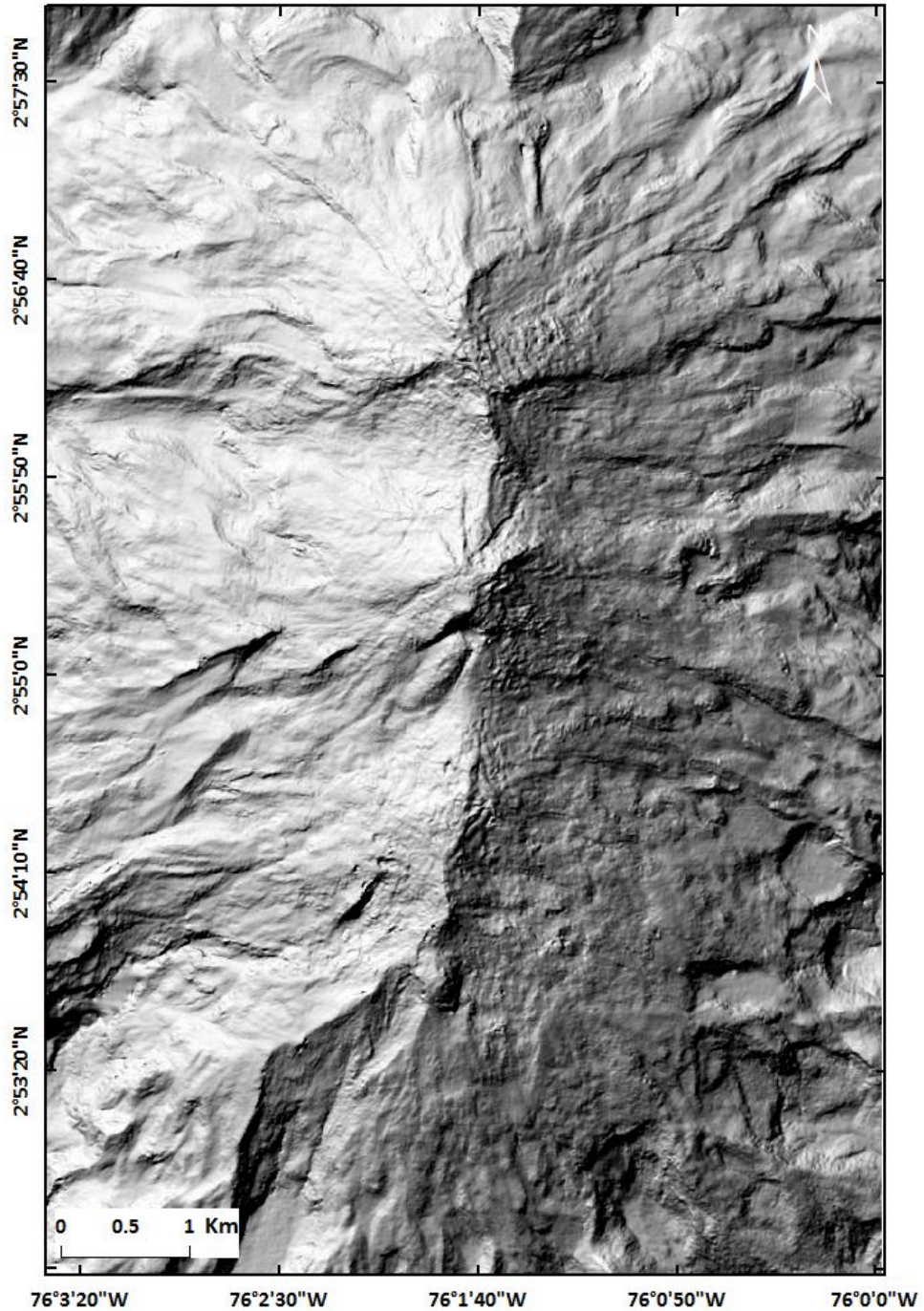


5.2.2.2.2. Ortorectificación de imágenes Landsat.

Una vez construidos los RPC para cada imagen compuesta, ENVI reconoce la información del RPC en el encabezado del archivo y se puede realizar la ortorectificación de las imágenes Landsat usando la herramienta *Orthorectify using RPC or RSM*, para el remuestreo de la imagen se utilizó el método del Vecino más cercano, el valor de *Background* o fondo de la imagen se manejó como cero (0), el DEM utilizado fue el DEM GeoSar Banda X de resolución espacial 5 m (Figura 12), el modelo de reemuestreo del DEM igualmente fue el del Vecino más cercano, el *Geoid Offset* u ondulación del Geoid se tomó del Modelo Geoidal GeoCol2004

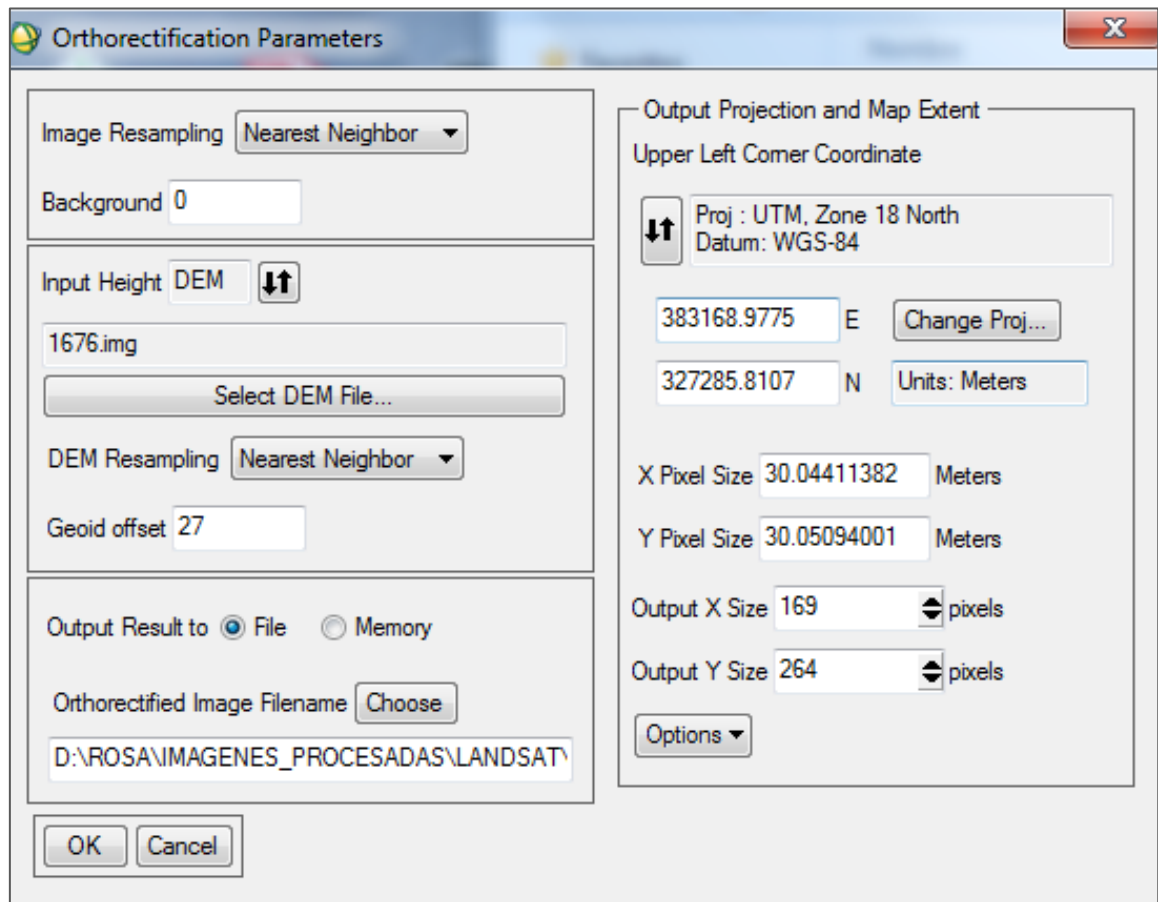
(Sánchez, 2013), una vez se tengan claros todos estos datos únicamente es correr la rutina en ENVI para todas las imágenes como se presenta en la Figura 13.

Figura 12. DEM GeoSar Banda X de resolución espacial 5 m



Fuente: SGC - Convenio Interadministrativo entre el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el SGC.

Figura 13. Ortorectificación de una imagen Landsat utilizando un modelo RPC y un Modelo Digital de Elevación en el Software ENVI 5.0

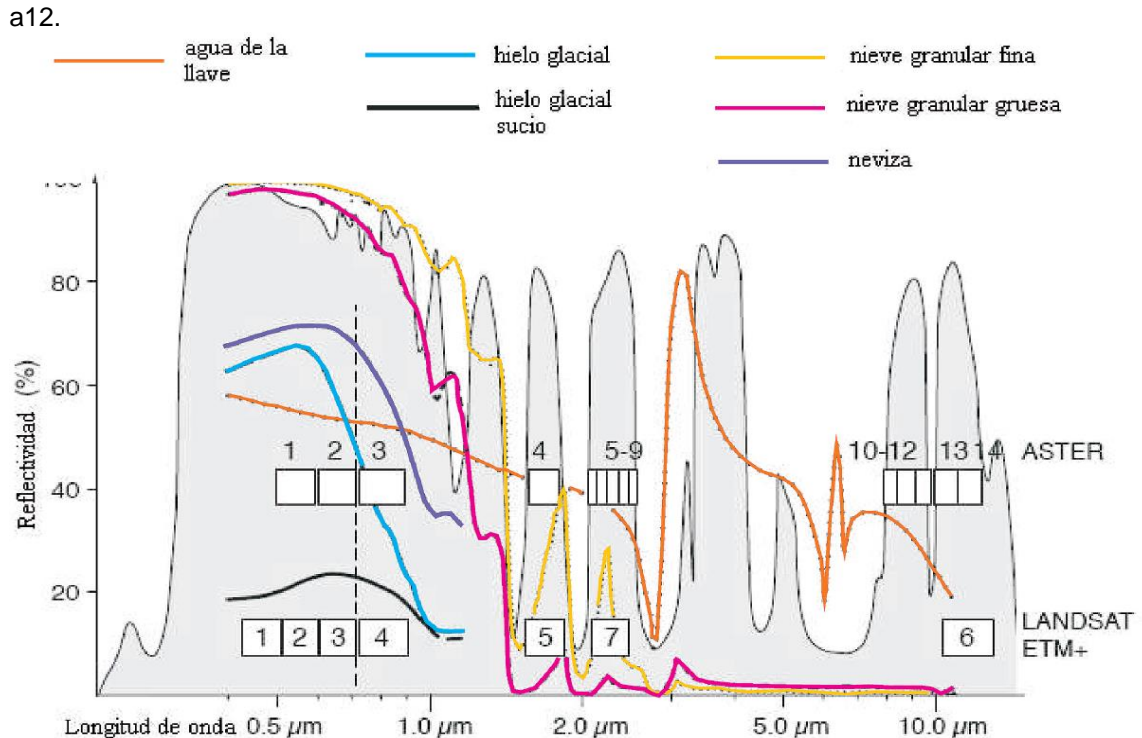


5.2.2.3. Cociente entre Bandas

Aplicar un cociente entre bandas implica efectuar una división pixel a pixel entre los NDS almacenados en dos o más bandas de la misma imagen. El cociente entre bandas se realizó tanto para las imágenes Landsat como para las imágenes ASTER, lo que permitió resaltar la variación espectral de las zonas cubiertas por hielo y nieve. Ya que según Cortés y Delgado, (2013) “la respuesta espectral de las superficies de hielo y nieve presentan una marcada absorción de la radiación en las longitudes de onda del infrarrojo cercano y de alta frecuencia en el visible”. Para las imágenes Landsat 5 y 7 se utilizó el cociente entre las bandas 4 y 5, que están en las longitudes de onda del infrarrojo cercano (0.75-0.90 μm) e infrarrojo (1.55- 1.75 μm) del espectro electromagnético, donde la reflectancia de la nieve presenta porcentajes máximos y mínimos (Figura 14), para la imagen Landsat 8 se realizó el cociente entre las bandas 5 y 6, que están en las longitudes de onda del infrarrojo cercano (0.85-0.88 μm) e infrarrojo de onda corta (1.56- 1.66 μm) del espectro electromagnético.

Con respecto a las imágenes ASTER el procedimiento adecuado habría sido realizar el cociente entre las bandas 3 y 4 ($0.78-0.86\mu\text{m}$) y ($1.60-1.70\mu\text{m}$) del espectro electromagnético; sin embargo no se tuvo la disposición de todas las bandas y se realizó el cociente entre las bandas suministradas que mayor contraste mostrarán.

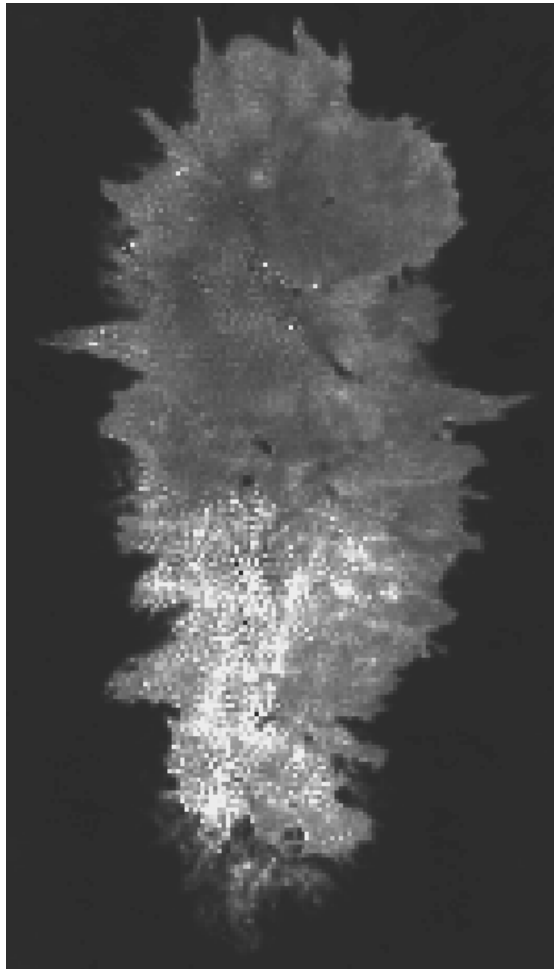
Figura 14. Transmisión atmosférica, secciones del espectro óptico y las microondas junto con los rangos espectrales de las bandas de ASTER y ETM+ a12.



Fuente: Cortes y Delgado (2013).

En la Figura 15 se observa el cociente de las bandas 4 y 5 del sensor Landsat 5 TM, para una imagen del 10 de julio de 1999. La imagen del cociente de las bandas es un apoyo que más adelante se va a utilizar en el mapeo de la superficie glaciar, ya que resalta claramente las zonas de límite del área glaciar.

Figura 15. Cociente de las bandas 4/5 del sensor Landsat 5 TM, de la imagen del 10 julio de 1999



5.2.3. Clasificación Supervisada de Imágenes

Dependiendo del comportamiento de un cuerpo al interactuar con la radiación, absorbiéndola y reflejándola en ciertas longitudes de onda, es posible identificar diferentes tipos de coberturas y superficies. Para la clasificación de las zonas que corresponde a superficie glaciaria en el volcán Nevado Nevado Huila, se utilizó el método de Clasificación Supervisada, que se basa en el agrupamiento de forma digital de las clases espectrales que compartan patrones de comportamiento. Para esta clasificación es necesario entrenar al software en este caso ArcGIS10.2.2 con zonas de estudio de las cuales se tiene certeza de su familiaridad o clase, para que el programa reconozca los NDS o píxeles y por medio de un método estadístico categorice y clasifique las áreas de interés. Para el presente trabajo se utilizó el método del Maximum Likelihood Classification, y para entrenar al software en algunas zonas límite de conflicto se utilizó como apoyo las imágenes del cociente entre bandas y fotografías aéreas.

En la Figura 16 se presenta la imagen del sensor Landsat 5 TM del 10 julio de 1999 clasificada mediante el proceso de clasificación supervisada.

Figura 16. Clasificación supervisada de la imagen del sensor Landsat 5 TM del 10 julio de 1999.



5.2.4. Vectorización de la Superficie Glaciar

Este proceso consistió en convertir las zonas de la imagen clasificadas como superficie glaciar y compuestas por píxeles en imágenes o polígonos formados por vectores, que representan los bordes del área glaciar. La vectorización se realizó de manera manual, ya que no solo es necesario tener en cuenta los aspectos espectrales de la imagen, sino que también es preciso realizar un análisis basado en conocimientos geológicos o de experiencia que permitan complementar y corregir la clasificación. Con este proceso se finaliza la delimitación de la superficie glaciar, que al aplicarlo a todas las imágenes seleccionadas para el estudio, se obtiene la evolución de la superficie glaciar durante entre el año 1987 y el 2016.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA SUPERFICIE GLACIAR EN VNH

Una vez delimitada la superficie glaciar para cada periodo, se procedió a calcular el área correspondiente, los resultados se presentan en la Tabla 10, Figura 17 y anexos A, B, C, D y E. El área glaciar inicial de 1987 hasta el último año de análisis 2016, presenta una pérdida del 50 % en 29 años, lo que indica que el glaciar se ha reducido a la mitad del área inicial, en un periodo muy corto de tiempo. Se resalta que entre 2007 y 2011 la tasa de cambio fue de 539.070 m²/año, esta tasa de pérdida corresponde a la mayor de todos los periodos evaluados y ésta asociada a la alta actividad sísmica y a los procesos eruptivos registrados entre 2007 y 2008. Como se observa en las Figuras 18 y 19, existe correspondencia entre el periodo que evidencia el mayor cambio en el área de la superficie glaciar, con las etapas de mayor actividad sísmica y liberación de energía por los eventos VT y LP. Como se mencionó en el capítulo 4.3 durante los tres episodios eruptivos, el glaciar se vio altamente afectado, en la primera erupción de tipo freática del 19 de febrero de 2007 se generó una fisura de 2 km de largo en la superficie glaciar, en dirección N-S, además de un lahar como resultado del aporte de los reservorios acuíferos, así como de la fusión y deshielo parcial del glaciar; en el segundo proceso eruptivo del 18 de abril de 2007 nuevamente se generó una fisura de 2.3 km de largo en dirección NE-SW y un lahar de mayor volumen que el anterior. La última erupción presentada en el VNH, tuvo lugar el 20 de noviembre de 2008, de tipo freatomagmática, ésta generó un cráter por el cual se dio la extrusión de un domo lávico, que mantuvo su proceso de emplazamiento hasta octubre de 2009, la aparición de este domo fue una de las causas más importantes en el retroceso glaciar, ya que su extrusión se dio en el costado SW de la superficie glaciar, derritiendo y desestabilizando paulatinamente el recubrimiento glaciar de esta zona debido a las altas temperaturas con las que surgió el domo, que en definitiva es lava con alta viscosidad que surge del interior del volcán.

Tabla 10. Cambio de la superficie glaciar en el VNH, para el periodo comprendido entre 1987 y 2016

AÑO	Fecha	Diferencia años	Área m ²	km ²	Diferencia m ²	Tasa de cambio m ² /año	% respecto 1987
1987	14/01/1987	-	15.026.295	15.0	-	-	-
1999	10/07/1999	12	12.403.300	12.4	2.622.995	218.583	83
2007	29/01/2007	8	10.327.002	10.3	2.076.298	259.537	69
2007	23/03/2007	-	10.299.235	10.3	27.767	-	-
2011	24/01/2011	4	8.170.722	8.2	2.156.280	539.070	54
2016	30/01/2016	5	7.522.867	7.5	647.855	129.571	50

Figura 17. Límites del glaciar para el periodo comprendido entre 1987 y 2016. El glaciar del 2007 corresponde a la imagen del 29 de enero de 2007.

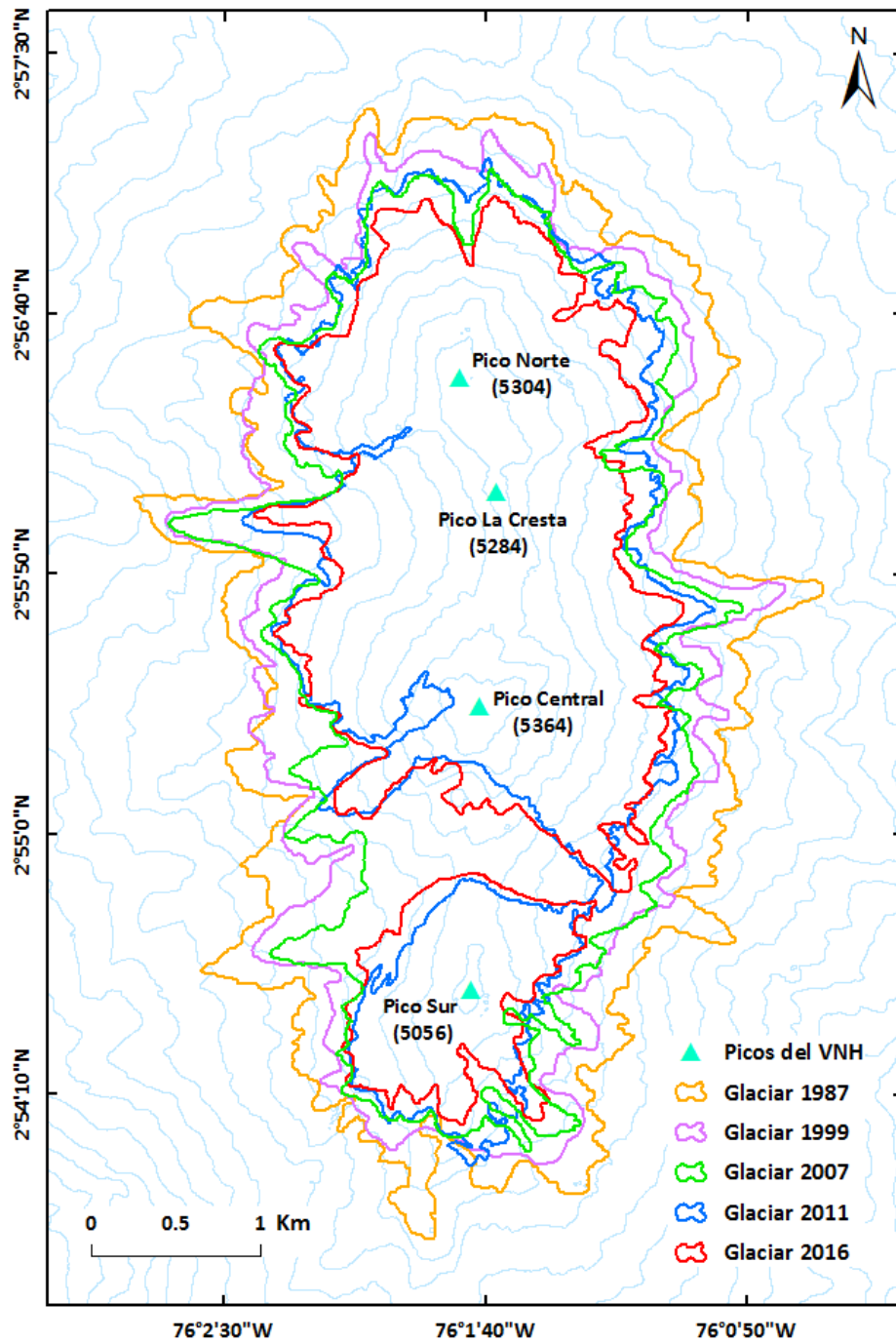


Figura 18. Energía sísmica acumulada de los eventos sísmicos de tipo VT desde 1994 hasta 2016 y área de la superficie glaciara entre 1987 y 2016

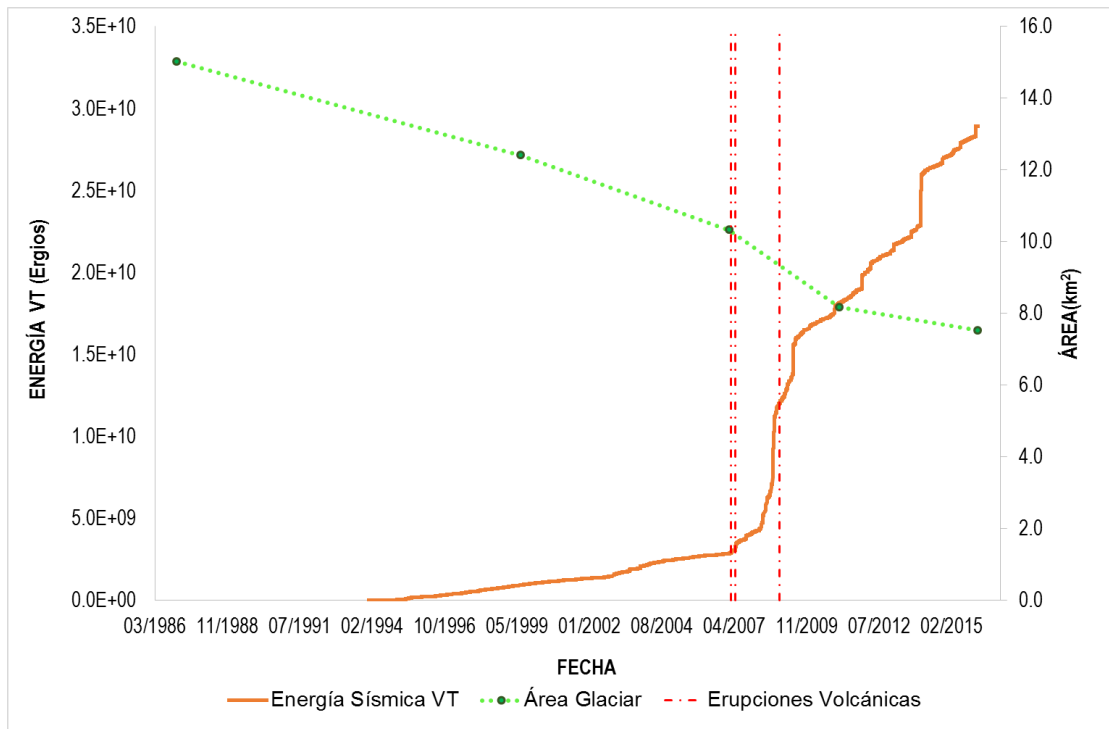
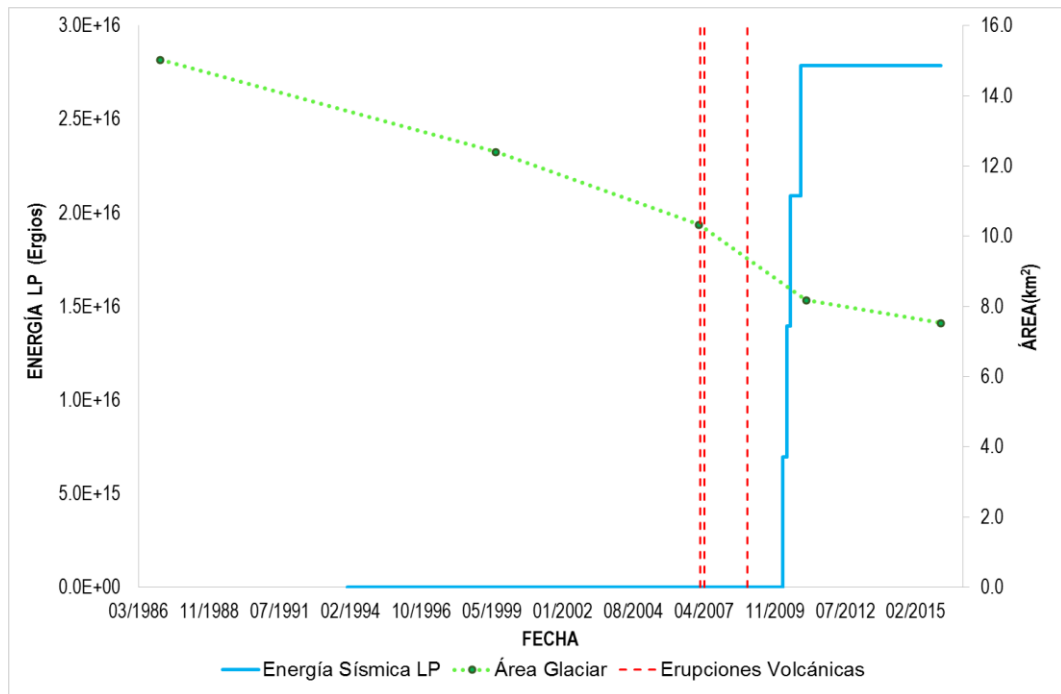
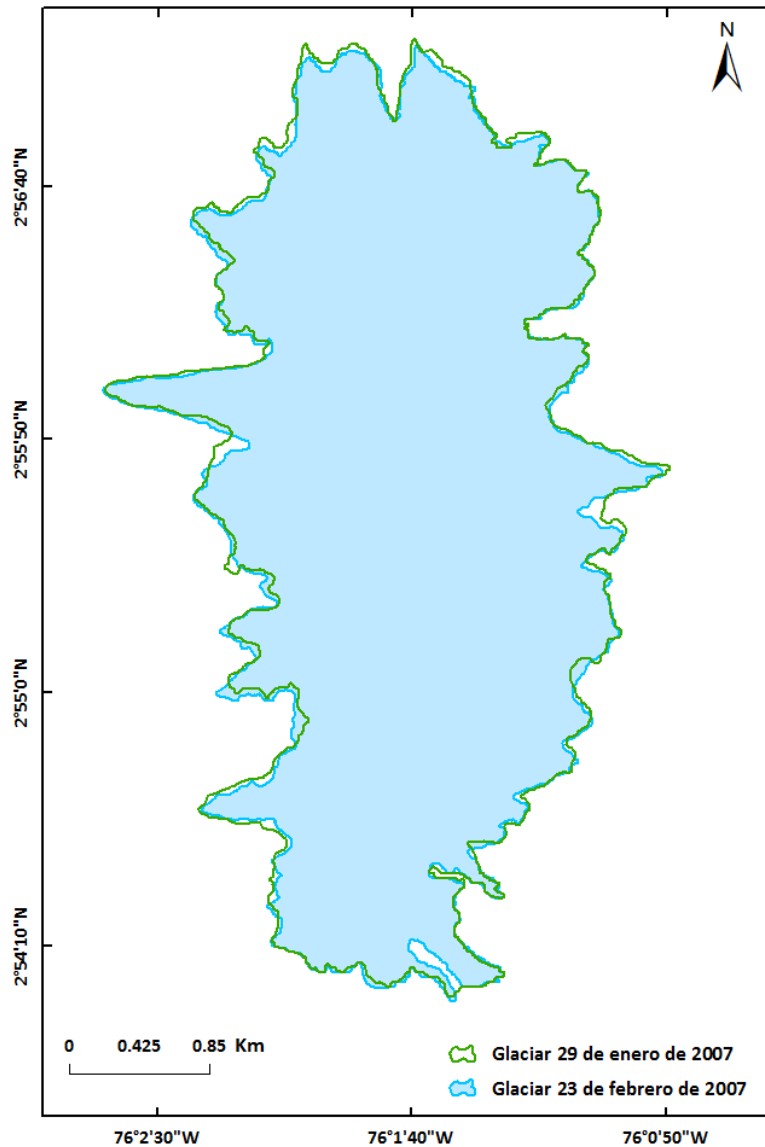


Figura 19. Energía sísmica acumulada de los eventos sísmicos de tipo LP desde 1994 hasta 2016 y área de la superficie glaciara entre 1987 y 2016



Para el periodo de 2007 se analizaron dos imágenes satelitales, una del 29 de enero y la siguiente del 23 de febrero de 2007, cuatro días después de la primera erupción, como se observa en la Figura 20 realmente no hay una pérdida significativa, en planta se presentó una disminución de 27.767 m², lo cual indica que el área de retroceso de 2'156.280 m² observada en 2011, no se ha presentado de manera inmediata después de las erupciones; sino que es el producto de diferentes procesos como la lluvia acida, la salida de gases a altas temperaturas, la ceniza que cubre y cambia la temperatura propia de la superficie glaciara, la aparición de grietas y columnas fumarólicas a lo largo de las grietas y principalmente el emplazamiento de cuerpos dómicos.

Figura 20. Límites de la superficie glaciara para el 29 de enero de 2007 y el 23 de febrero de 2007



Se aclara que el VNH registró retroceso glaciar aun cuando presentaba baja actividad sísmica, como se evidencia en los periodos de reposo (bajos aportes energéticos) en las figura 18 y 19, con lo que se puede inferir que el hielo del VNH ha perdido su línea de equilibrio, también por otros fenómenos diferentes a la actividad sísmica como el tan conocido cambio climático, lo cual resulta coherente con visto en el capítulo 4.4.5, donde se advirtió que en las últimas décadas la temperatura en las zonas de alta montaña de Colombia había tenido una tendencia positiva, mientras que la precipitación, que es una de las fuentes de acumulación de nieve, había registrado una tendencia negativa o disminución.

Para analizar el comportamiento del glaciar en un periodo de tiempo más amplio, se tomó como apoyo el cálculo de retroceso glaciar en el VNH entre 1961 a 1995, realizado por B. Pulgarín, 2005. La correspondencia de los datos se presenta en la Figura 21 y Tabla 11.

Figura 21. Tendencia del retroceso de la superficie glaciar en el VNH, para el periodo comprendido entre 1961 y 2016

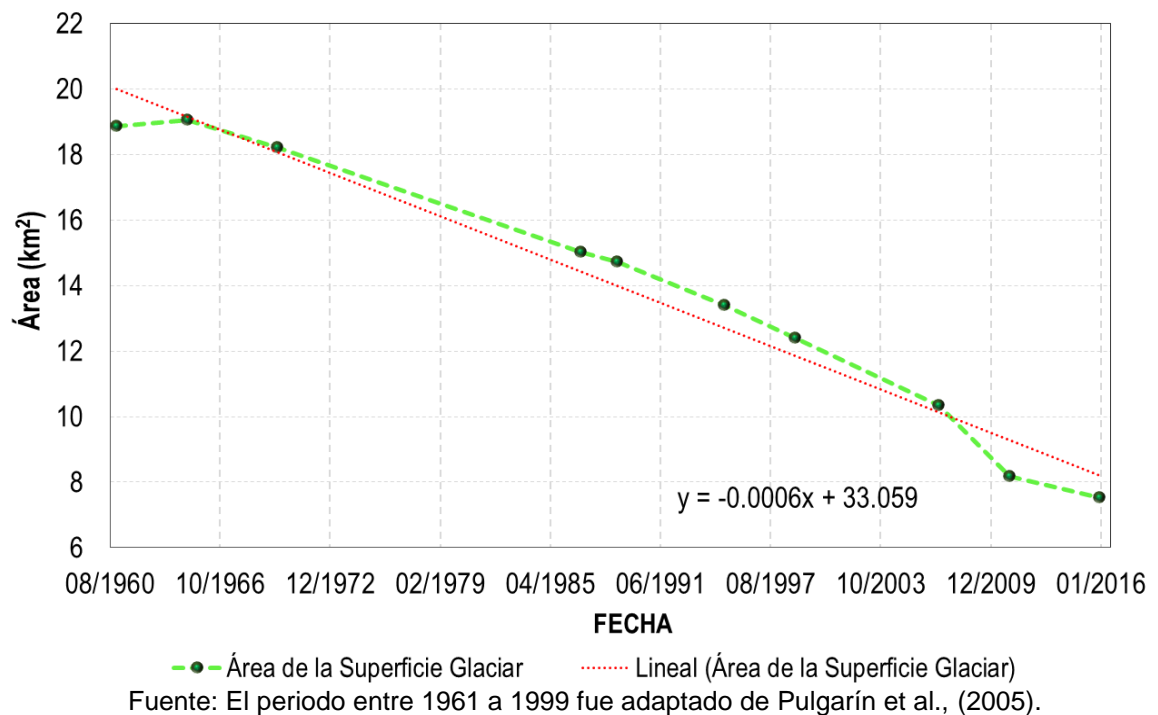


Tabla 11. Cambio de la superficie glaciar en el VNH, para el periodo comprendido entre 1965 y 2016

AÑO	Insumo	Diferencia años	Área m ²	Diferencia m ²	Tasa de cambio m ² /año	% respecto a 1961
1961	<i>Fot. aérea</i>	-	18.860.000	-		
1965	<i>Fot. aérea</i>	4	19.060.000	-200.000	50.000	
1970	<i>Fot. aérea</i>	5	18.210.000	850.000	170.000	97
1987	Imag. Sat.	17	15.026.295	3.183.705	187.277	80
1989	<i>Fot. aérea</i>	2	14.720.000	306.295	153.148	78
1995	<i>Fot. aérea</i>	6	13.390.000	1.330.000	221.667	71
1999	Imag. Sat.	4	12.403.300	986.700	246.675	66
2007	Imag. Sat.	8	10.327.002	2.076.298	259.537	55
2011	Imag. Sat.	4	8.170.722	2.156.280	539.070	43
2016	Imag. Sat.	5	7.522.867	647.855	129.571	40
Total		55		11.537.133		

Resulta alarmante detallar el comportamiento del glaciar durante los últimos 55 años, en general el retroceso glaciar presenta la misma tendencia, únicamente entre 1961-1965 y 2007-2011, se registraron cambios que se salen del comportamiento general, en 1965 no se observó retroceso, sino recarga glaciar, y entre 2007 a 2011, la velocidad de la pérdida del glaciar aumento como consecuencia de la actividad sísmica del VNH. Actualmente en 2016 el glaciar del VNH representa el 40% de lo que conformaba la superficie glaciar de 1961, esto representa una pérdida de 11.537.133 m², menos del área que actualmente está sobre la cumbre del VNH. Utilizando un análisis estadístico se generó una proyección que se muestra en la figura 18 de la perdida glaciar total, se pudo calcular que alrededor del año 2047 el volcán contara con menos de 1 km² de recubrimiento de glaciar.

6.2. COTAS MÍNIMAS DE GLACIAR DEL VNH

Con el fin de obtener las cotas mínimas de la superficie glaciar por cada periodo, se generaron curvas de nivel cada 20m con el modelo digital de elevación del IGAC con resolución de 5 m. Con esto fue posible comparar y analizar las alturas mínimas a las que se podía encontrar glaciar en cada periodo, y comparar las lenguas glaciares que más cambios han evidenciado, incluso detallar aquellas que han desaparecido, en la Tabla 12, se presenta las alturas mínimas del glaciar por cada periodo. La lengua glaciar que en todos los periodos presenta la cota más baja es la lengua conocida como El Mayor, en 1987 su cota mínima se encontraba entre a 4174 m.s.n.m., mientras que al 2016 la cota mínima a la que se encuentra glaciar en el VNH es de 4503 m.s.n.m., existe un retroceso en la cota más baja de 329 m en altura.

Tabla 12. Cotas mínimas para el periodo comprendido entre 1987 y 2016

Año	Cotas Mínimas M.S.N.M	Lengua Glaciar
1987	4174	El Mayor
1999	4285	El Mayor
2007	4305	El Mayor
2011	4475	El Mayor
2016	4503	El Mayor

En las Tabla 13, 14 y 15 se presentan la variación de las lenguas glaciares más importantes del VNH, El Mayor, El Venado y El Oso respectivamente, se observa una evolución dramática en las dimensiones en planta, tanto en longitud como en ancho. La lengua El Mayor ubicada al Este del Pico la Cresta, presentó su mayor cambio entre 2007 y 2011 perdiendo 248 m. de su longitud y 55 m. de su ancho, como se observa en la Figura 22, los lahares y los flujos de los reservorios hidrotermales del VNH, han arrastrado gran parte del hielo de esta lengua, así mismo las salidas de ceniza durante las crisis volcánicas han cubrieron la superficie de esta lengua, alterando su temperatura, aunque también entre 1987 y 1999 esta lengua también presentó una disminución importante en su longitud y ancho de 166 y 64 m. respectivamente, en definitiva entre 1987 y 2016 ha perdido el 44% de su longitud y el 65% de su ancho.

La lengua El Venado localizada al Noreste del Pico Norte, presento las mayores variaciones entre 1987 y 2007, no fue posible medir con precisión la longitud en 1999, debido a la presencia de ceniza cerca de los límites de la lengua glaciar, sin embargo se evidencia que los periodos eruptivos no han afectado dramáticamente las dimensiones de esta lengua lo cual es coherente, ya que ni la ceniza ni los flujos hidrotermales han afectado esta lengua.

La lengua El Oso, es la que más cambios presenta en su longitud, y este fenómeno se dio principalmente entre 2007 y 2011, como se presenta en la Figura 23 esta lengua también ha estado sometida a la influencia de los flujos de lodo o lahares generados en los episodios eruptivos, principalmente en el de abril de 2007.

Tabla 13. . Evolución de la superficie de la lengua glaciar El Mayor

Lengua El Mayor	Altura Frente m.s.n.m.	Diferencia m	Largo Medio m	Diferencia	Ancho Medio m	Diferencia m
1987	4174		825.4		306.0	
1999	4285	-111	659.2	-166.1	241.9	-64.1
2007	4305	-20	781.8	122.6	228.5	-13.4
2011	4475	-170	533.4	-248.4	172.9	-55.6
2016	4503	-28	455.1	-78.3	107.8	-65.1
Total		-329		-370.3		-198.2

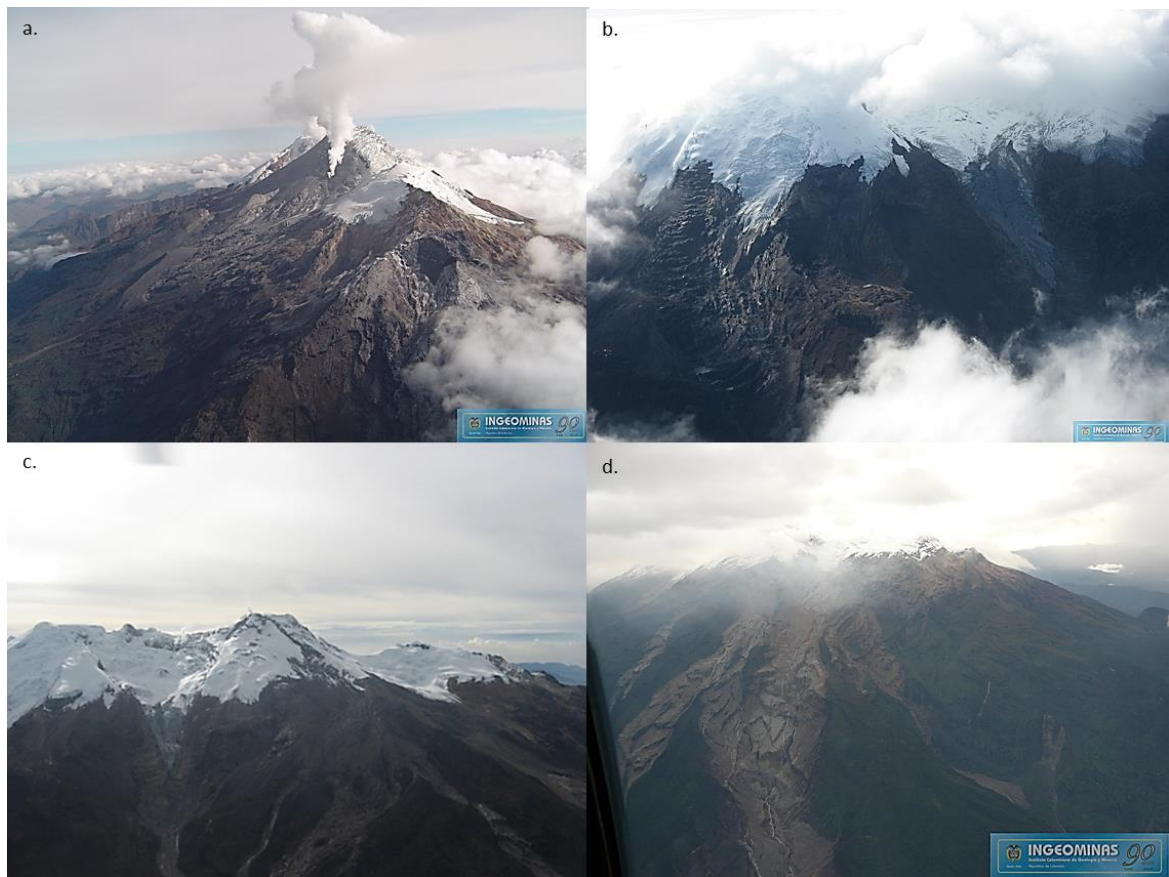
Tabla 14. . Evolución de la superficie de la lengua glaciar El Venado

Lengua El Venado	Altura Frente m.s.n.m.	Diferencia m	Largo Medio m	Diferencia	Ancho Medio m	Diferencia m
1987	4395		501.2		268.1	
1999	4522	-127	-	-	-	-
2007	4587	-65	262.4	-238.8	153.4	-114.7
2011	4628	-41	232.0	-30.4	143.4	-10
2016	4625	3	252.3	20.3	163.6	20.2
Total		-230		-248.9		-104.5

Tabla 15. Evolución de la superficie de la lengua glaciar El Oso

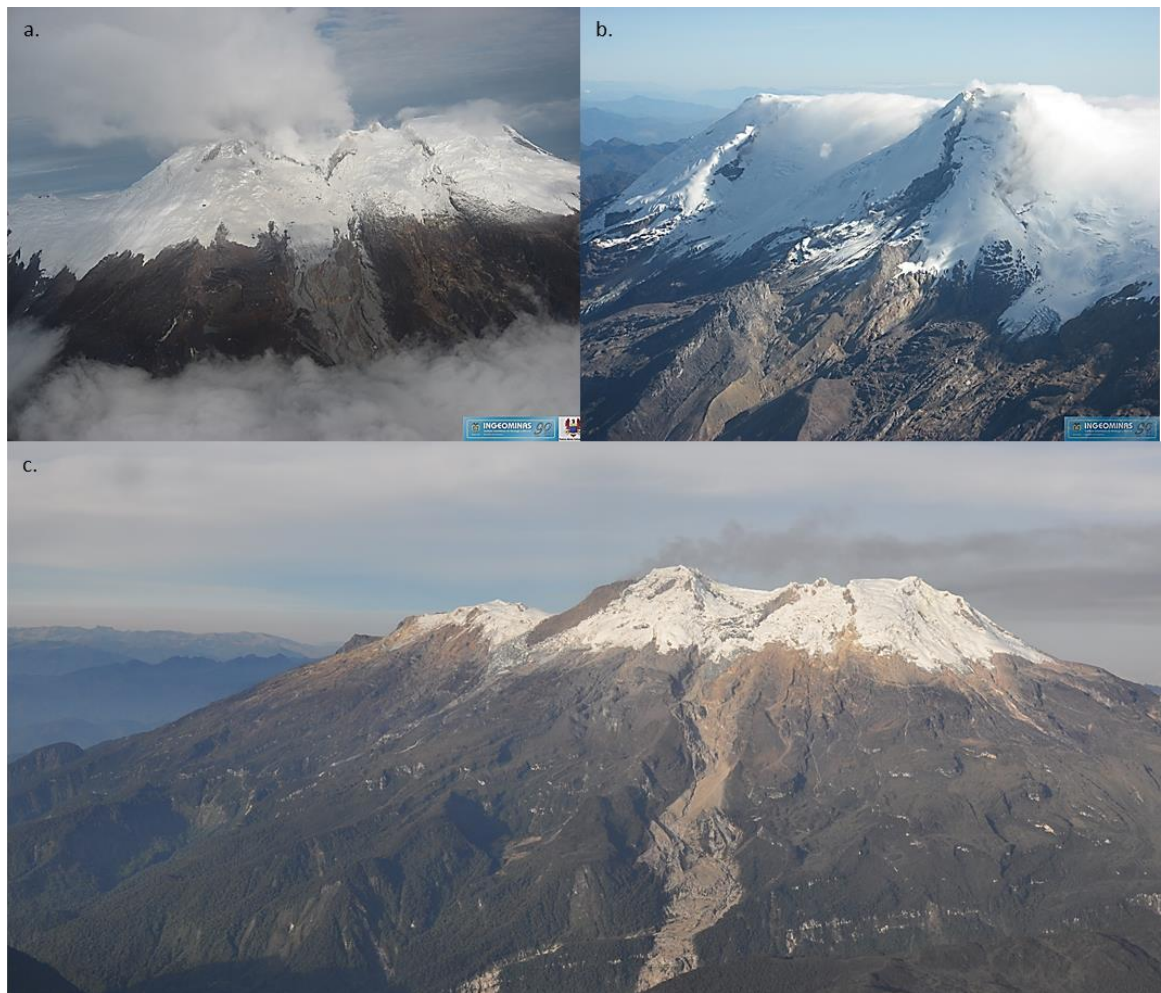
Lengua El Oso	Altura Frente m.s.n.m.	Diferencia (m)	Largo Medio (m)	Diferencia (m)	Ancho Medio (m)	Diferencia (m)
1987	4232		729.8		251.9	
1999	4325	-93	647.7	-82.1	219.3	-32.6
2007	4430	-105	569.9	-77.8	281.2	61.9
2011	4502	-72	387.1	-182.8	197.8	-83.4
2016	4580	-78	277.1	-110	193.7	-4.1
Total		-348		-452.7		-58.2

Figura 22. Afectaciones de la Lengua Glaciar El Mayor por las erupciones del VNH.



Fuente. Servicio Geológico Colombiano. a) Flujos de la erupción del VNH del 19 de febrero de 2007, vista desde el sector SW. b) Afectación de la lengua glaciar El Mayor por la erupción del 18 de abril de 2007, vista desde el W del VNH el 1 de junio de 2007. c) Lahar de la erupción del 20 de noviembre de 2008 desde el W del VNH, visto el 25 de enero de 2011. d) Recorrido de los flujos de lodo de la erupción del 20 de noviembre de 2008 visto desde el W del VNH el 12 de abril de 2008

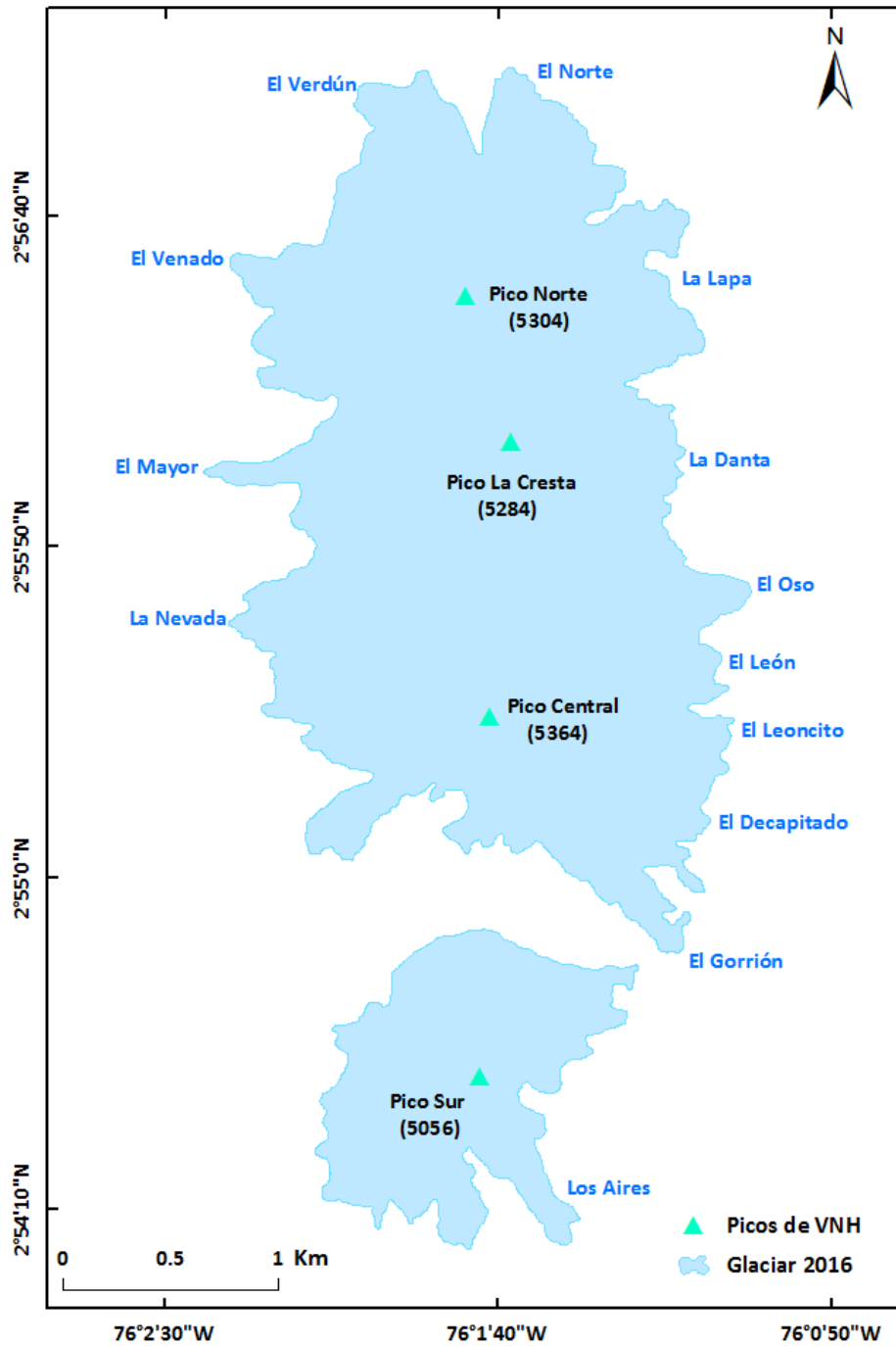
Figura 23. Afectaciones de la Lengua Glaciar El Venado por las erupciones del VNH.



Fuente, Servicio Geológico Colombiano. a) Flujo de lodo sobre la lengua glaciar El Venado generado por la erupción del 18 abril de 2007, visto desde el E del VNH, el 22 de abril de 2007 b) Afectación de la lengua glaciar El Venado por la erupción del 18 de abril de 2007, vista desde el NE del VNH el 20 de noviembre de 2007 c) Recorrido del flujo generado en la erupción del 20 de noviembre de 2008, vista desde el NE del VNH el 25 de enero de 2011.

En el periodo evaluado también se logró detallar la desaparición de ocho lenguas glaciares: El Escondido, El Mano, El Castillo, El Descuido, El Vinagre, El Hueco, El Ratón y El Monumento y en algunas lenguas como El gorrión y La Danta, únicamente quedan pequeños remantes de hielo glaciar, en la Figura 24 se presentan las lenguas glaciares existen a enero de 2016.

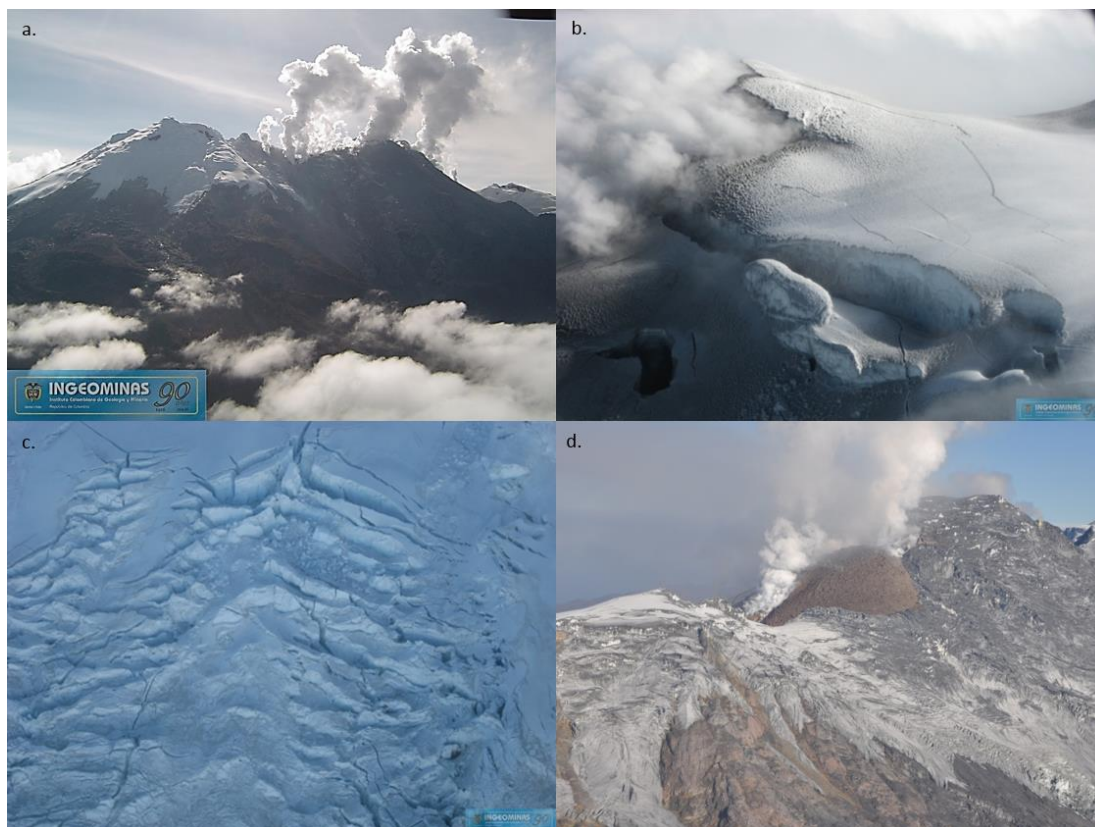
Figura 24. Glaciar del VNH a enero de 2016 con las lenguas glaciares actuales



6.3. CAMBIOS MORFOLÓGICOS

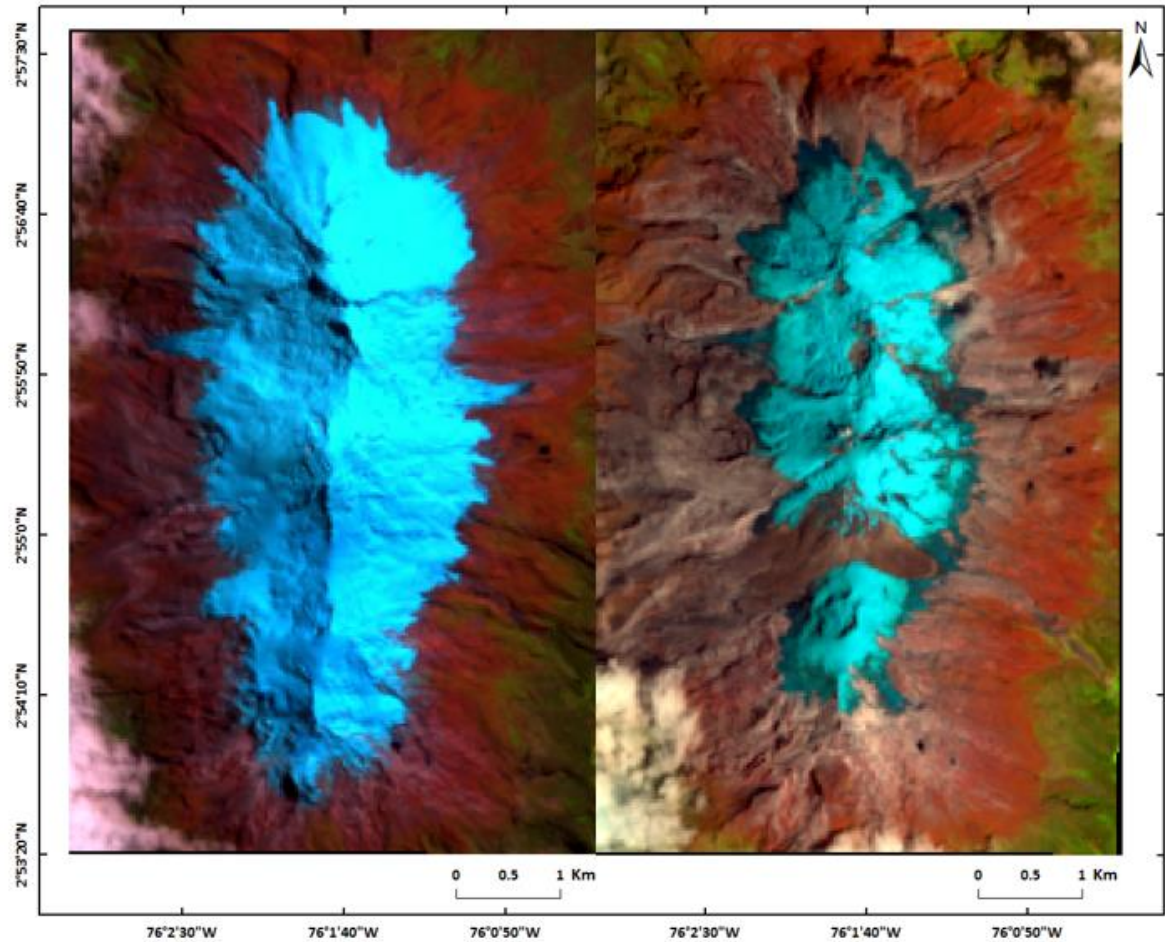
Los cambios morfológicos observados en la superficie glaciar del VNH principalmente se deben al retroceso glaciar que el volcán ha sufrido en el periodo evaluado, en 1987 la superficie glaciar era de 15'026.295 m² (15 km²) y actualmente a enero de 2016 la superficie glaciar corresponde a 7'522.867 m² (7.5 km²). Adicionalmente en el sistema glaciar se observó la aparición de dos fisuras de gran tamaño que fraccionaron su superficie, de sur a norte y de nor-orienta a sur-occidente, y la extrusión de un domo lávico, que desestabilizó e incluso segmentó el sistema glaciar en dos partes. Por otra parte se pudo detallar la aparición de fracturas en el glaciar cerca a los Picos Norte y La Cresta, incluso hay áreas entre estos picos que ya no tienen recubrimiento glaciar, esto se observa en las imágenes de la Figura 25 y 26, donde se muestra fotografías aéreas en los episodios de crisis del VNH y la comparación de las imágenes satelitales de 1999 en la combinación en falso color RGB 5,4,3 y para 2016 RGB 6,5,4, evidenciando el cambio morfológico que ha tenido en glaciar del VNH en los últimos años.

Figura 25. Cambios morfológicos del VNH en la superficie glaciar.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. a) Erupción 19 de febrero de 2007. b) agrietamiento Pico Central, c) Fracturamiento de las masas de hielo, 10 de noviembre de 2009 e) Emplazamiento del segundo domo lávico sobre la superficie del glaciar, diciembre de 2008

Figura 26. Comparación de la superficie glaciar del VNH entre 1999 y 2016



6.4. AFECTACIÓN EN EL RECURSO HÍDRICO

Los ríos que se originan del glaciar del VNH, son los de la cuenca del río Páez, al norte del VNH a una altura de aproximadamente 4500 m.s.n.m., esta cuenca a la vez es una de las principales tributarias del río Magdalena en su cuenca alta, en la cual desembocan alrededor de 97 afluentes que nacen en su gran mayoría en el área de influencia del Parque Natural Nacional Nevado del Huila (CGRD Paéz, 2012). A la vez el río Páez se encuentra rodeado de importantes lagunas para la población de la zona como la Laguna de Páez a 3450 m.s.n.m. de aproximadamente 27 ha de espejo de agua y la Laguna de Juan Tama CGRF (CGRD Paéz, 2012). Las subcuencas del río Paéz son los principales aportantes de agua para labores domésticas, agrícolas y para la generación de energía (Central Hidroeléctrica de Betania) en la región del oriente caucano principalmente del municipio de Paéz, Inza y algunas poblaciones del municipio del Huila, se resalta que en la actualidad no existe un inventario claro del recurso hídrico.

Siendo el glaciar del VNH, el principal alimentador de la cuenca del río Paéz y como se presentó en el capítulo 6.1. el tiempo proyectado para la existencia del glaciar del VNH se reduce a tan solo tres o cuatro decenas de años, las instituciones locales y nacionales deben garantizar el uso racional de este recurso natural, generar políticas, proyectos para la protección y conservación del recurso hídrico. En principio se hace necesario disponer de un inventario actual de las fuentes de agua que integran la cuenca hidrográfica del río Paéz y poner en marcha programas de reforestación para salvaguardar los colchones de agua. Finalmente se hace necesario exponer que desde este momento deben existir políticas que contrarresten las afectaciones que se generen cuando la disminución en el caudal de los ríos sea evidente por la extinción del hielo del glaciar del VNH.

6.5. POSIBLES ESCENARIOS DEBIDO AL RETROCESO GLACIAR EN EL VNH

La pérdida de masa y desestabilización del sistema glaciar pueden desencadenar múltiples fenómenos que son factores de riesgo para la población e infraestructura de la zona, la formación de lagunas glaciares es un escenario latente que se puede esperar, dependiendo del tipo de presa y lago pueden llegar a ser inestables y propensas a fallar de manera catastrófica (Worni, 2012); los deshielos como producto de la desestabilización del glaciar son otro tipo de manifestación que pueden generar flujos de lodo o lahares, a medida que estos avanzan se vuelven más peligrosos por la velocidad que adquieren en el trayecto y el volumen de escombros que acarrear. Históricamente se encontró que los lahares en el VNH han sido los eventos que mayor daño han causado en infraestructura, economía y lamentablemente han generado pérdidas humanas en las poblaciones rurales que se encuentran cercanas al cauce del río Paéz y río Símbolá. Para la generación de lahares en el VNH se contemplan dos escenarios, el primero está ligado a una fase de mayor actividad del volcán con la ocurrencia de eventos de fracturamiento de material cortical de gran magnitud en la parte alta del edificio volcánico o a un episodio eruptivo, de acuerdo a los informes del SGC a junio de 2016 el VNH se encuentra en nivel de actividad amarillo o III, este es un estado en el cual se pueden presentar cambios en el comportamiento de la actividad volcánica, razón que lleva a plantear estas posibilidades. El segundo escenario se puede presentar por la dinámica propia del glaciar y del cambio climático, como se detalló en el capítulo 6.3 a la fecha se observa en el glaciar un sistema de grietas y zonas de debilidad que podrían terminar con el colapso gravitacional de pequeñas masas de hielo.

Por otro lado es necesario mencionar que en el proceso de desglaciación se espera que a medida que ésta se incrementa, el volumen de circulación del flujo de agua sea cada vez mayor, hasta que llegue al límite en el cual el caudal iniciaría una paulatina disminución, reduciendo el consumo de agua en la agricultura, ganadería, usos domésticos, minería y generación de energía. Así mismo se menciona que el resultado del derretimiento glaciar perturba

directamente la temperatura de la zona, lo que conlleva alterar los ecosistemas que aún subsisten en las zonas de paramo y en general en el Parque Natural Nacional Nevado del Huila.

7. CONCLUSIONES

- El seguimiento de la evolución temporal de la superficie del glaciar del VNH a través del análisis de imágenes satelitales Landsat y ASTER, permitió determinar que entre enero de 1987 y enero de 2016, se presentó una pérdida en la superficie glaciar de 7'503.428 m², lo que es equivalente al 50% de la superficie glaciar de enero de 1987.
- La mayor velocidad de retroceso glaciar fue de 539.070 m²/año, la cual se presentó entre 2007 y 2011, esta anomalía se asoció a los procesos eruptivos registrados entre 2007 y 2008 y a los fenómenos asociados estas erupciones como lluvias ácidas, salida de gases a altas temperaturas, salida de ceniza, aparición de grietas y principalmente el emplazamiento de un cuerpo dómico en la cumbre del VNH ocurrido entre 2008 y 2010.
- Fue posible evidenciar retroceso glaciar en el VNH durante todo el periodo evaluado, aun en etapas de baja actividad sísmica; lo que indica que el retroceso glaciar también está ligado a otros fenómenos como el cambio climático de las últimas décadas, el cual fue evidenciado en la tendencia descendente de la precipitación y el aumento de la temperatura en las zonas de alta montaña.
- Con los resultados obtenidos en el presente trabajo y tomando como apoyo los cálculos de retroceso glaciar realizados anteriormente, se pudo analizar una línea de tiempo lo suficientemente amplia y confiable para evaluar el comportamiento del hielo del glaciar del VNH en los últimos 55 años. Con lo que se realizó una proyección aproximada para la extinción del glaciar y se calculó que para el año 2047 el VNH estará cubierto por menos de 1 km² de hielo glaciar.
- Para enero de 2016 la lengua glaciar El Mayor, correspondiente a la cota más baja de la superficie glaciar del VNH se encuentra a 4503 m.s.n.m., esta lengua desde 1987 hasta la fecha ha presentado una pérdida en altura de 329 m.
- Durante el análisis temporal de la superficie glaciar del VNH fue posible observar la paulatina desaparición de ocho lenguas glaciares: El Escondido, El Mano, El Castillo, El Descuido, El Vinagre, El Hueco, El Ratón y El Monumento, y en algunas lenguas como El gorrión y La Danta, únicamente quedan pequeños remantes de hielo glaciar.
- Para contrarrestar las afectaciones e impacto en el recurso hídrico por la disminución progresiva del hielo glaciar y garantizar la subsistencia o menor

afectación de los ecosistemas, las instituciones correspondientes y tomadoras de decisiones desde ya deben generar políticas y proyectos para la conservación y protección del recurso hídrico.

- Se observó que los riesgos contemplados por el fenómeno de retroceso glaciar se pueden presentar por la generación de lahares, reducción del agua para usos domésticos, agricultura, ganadería, minería y generación de energía, conociendo que el retroceso glaciar es inevitable, restan alrededor de tres décadas para tomar acciones que garanticen el menor impacto posible en cada uno de los escenarios de riesgo mencionados.
- En el desarrollo del presente trabajo se pudo evidenciar la importancia de los SIG en el estudio y seguimiento de los fenómenos naturales que representan una amenaza para el ser humano y su entorno. El fácil acceso a los datos que monitorean las características y cambios de la tierra, la organización, el procesamiento y las herramientas de análisis que brindan los SIG, permiten realizar un seguimiento continuo a cualquier fenómeno natural de manera remota, evitando la indispensable visita de campo, optimizando los recursos y sobre todo, garantizando continuidad en el seguimiento de los fenómenos y confiabilidad en los resultados.
- Efectuar las correcciones radiométricas, aplicar el modelo FLASHH para la corrección atmosférica, la utilización de un modelo digital de elevación DEM y la construcción de los GCP puntos de control terrestres para alcanzar una alta precisión geodésica, permite garantizar calidad y confiabilidad en los resultados, ya que hace posible la eliminación de los errores inherentes a los instrumentos, a la toma del dato y a las condiciones atmosféricas. Estas rutinas de procesamiento deben conocerse y realizarse a las imágenes satelitales que sean objetos de cualquier estudio, con el fin de garantizar precisión en los resultados y decisiones acordes a la realidad del fenómeno estudiado.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda aprovechar las diversas posibilidades de organización, procesamiento y análisis que brindan los SIG y los datos de monitoreo global que actualmente están disponibles para analizar los fenómenos naturales, de manera continua y consiente, con la rigurosidad necesaria en la selección de datos, el procesamiento y tratamiento de los mismos, de tal manera que se garantice resultados que respondan a los problemas y necesidades actuales.

Con las facilidades anteriormente mencionadas, las entidades pertinentes tienen la posibilidad de transformar los procesos de monitoreo regional y local en tareas rutinarias de seguimiento continuo, llevando control de los cambios y de los riesgos que se vayan generando con la evolución de los fenómenos naturales como retroceso glaciario, cambio climático, cambios de uso de suelo, disminución de los páramos, movimientos en masa entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

Alcalá, J. (2007). La Evolución de los Glaciares en el Complejo Volcánico Ampato (Peru). Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Bernex, N. y Tejada, M. (2010). Cambio Climático, Retroceso Glaciar y Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Lima, 130 P.

Brookes, B. (1975). Photo Reconnaissance. The Operational History. London: Ian Allan.

Cardona, C., Manzo O., y Laverde, C. (2011). Informe de Avance Sobre el Análisis de Cambios Superficiales Asociados a la Actividad Eruptiva En El Volcán Nevado Del Huila. Popayán, 26 P.

Carrillo, E. y Yépez, S. (2008). Evolución de los Glaciares en los Andes Venezolanos: Glaciares de los Picos Humboldt y Bonpland. Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Fundación Instituto de Ingeniería, Centro de Procesamiento Digital de Imágenes. En Ingeominas , *Glaciares, nieves y hielos de América Latina*. P 77-108.

Ceballos, J., Euscátegui, C. y Tobón, E. (2007). Los glaciares en Colombia, su estudio y relación con el comportamiento climático, caso volcán Nevado Santa Isabel (Cordillera Central, Colombia). Memorias de la Primera conferencia internacional de cambio climático: impacto en los sistemas de alta montaña. Bogotá: IDEAM-Universidad de Zurich, pp. 75-85.

Chander, G., Markham, B., Helder, D., (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, Elsevier: Remote Sensing of Environment , USA, Vol 113, 893-903 P.

Consejo Municipal De Gestión De Riesgo De Desastres Paéz Cauca. (2012), Versión Preliminar Documento de Caracterización General de Escenarios de Riesgo. Municipio de Paéz – Cauca.

Correa, A. y Cepeda H. (1995). Informe Preliminar sobre la Geología del Complejo Volcánico Nevado del Huila. Ingeominas, Informe Interno. Popayán, 74 P CHUVIECO Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial. 2da ed. Madrid. Ediciones Rialp S.A., 224 P, ISBN 84 – 321-2680-2.

Cortés, J. y Delgado, H. (2013). La Evolución del Mayor Glaciar de México Vista desde el Espacio, 1 ed. México: UNAM, Coordinación de Estudios de Posgrado.

Gonzales, C. (2015) Geomorfología General, Los Volcanes, Departamento de Geografía y Ordenamiento Territorial. Grupo de Investigación Geomorfología,

Territorio y Paisaje en Regiones Volcánicas. [Consulta: 9/07/2016] Disponible en: <<https://www.uclm.es/profesorado/egcardenas/eruhi.htm>>

Fernández, C. y Llorente, H. (2001). El satélite Landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat. España, Valladolid: Universidad de Valladolid.

Flórez, A. (2002a). Geomorfología de Colombia. Bogotá D. C. Trabajo de grado, Universidad Nacional.

Florez, A. y Ochoa, F. (1990). El Nevado del Huila o Ñandi. Revista Colombia, sus Gentes y Regiones, No 20. IGAC. Bogotá. 206-215 P.

Francou, B. y Vicent, C. (2007). Les glaciers à l'épreuve du climat. IRD Editions – Editions Belin. París. 274 P.

Harris Geospatial Solutions. (2016). Parameters for Digital Cameras and Pushbroom Sensors [en línea], [consulta: 23/01/2016], Disponible en <<https://www.harrisgeospatial.com/docs/parametersfordigitalcameraspushbroomnsors.html>>

Hyatt, E. (1988). Keyguide to Information Sources in Remote Sensing. London. Mansell.

Ingeominas, (2010). Glaciares, Nieves y Hielos de América Latina. Cambio Climático y amenazas. Bogotá, 344 P, ISBN 978-958-97896-9-8.

Instituto Boliviano de la Montaña (BMI) (2014). Glaciares Bolivia. 12 Testigos del Cambio Climático. La Paz, 52 P.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), (2012). Glaciares de Colombia más que montañas con hielo. Bogotá, D. C., 344 P.

Jaramillo, S. (2012). Evolución Glaciar en la Vertiente Norte del Volcán Cotopaxi. (Tesis de Maestría para optar al título de Máster en Dinámicas Territoriales y Desarrollo). Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad Complutense de Madrid. España. 61 P.

Lillesand, T. y Kiefer R. (1994). Remote Sensing and Image interpretation. 3 ed. New York: Wiley & Sons, 750 P, ISBN 0471577839

National Snow & Ice Data Center (NSIDC) (2016). All About Glaciers [en línea], University of Colorado Boulder, CO 80309-0449 USA, [consulta: 2/03/2016], Disponible en: <<http://nsidc.org/cryosphere/glaciers/questions/what.html>>.

Pulgarín, B. y Correa, A. (1997). Depósitos Fragmentarios No Consolidados en el Edificio del Complejo Volcánico Nevado del Huila. Ingeominas, Informe Interno. Popayán, 56 P.

Pulgarín, B., Correa A., Cepeda, H. y Ancochea E. (2001). Aspectos geológicos del Complejo Volcánico Nevado del Huila. Memorias VIII congreso colombiano de geología. Manizales, 15 P.

Pulgarín, B., Ekkehard, J. y Wilfried L. (2005). Aspectos Geológicos y Cambio Glaciar del Volcán Nevado del Huila Entre 1.961 Y 1.995, Proceedings I Conferencia Cambio Climático. Bogotá, 17 P.

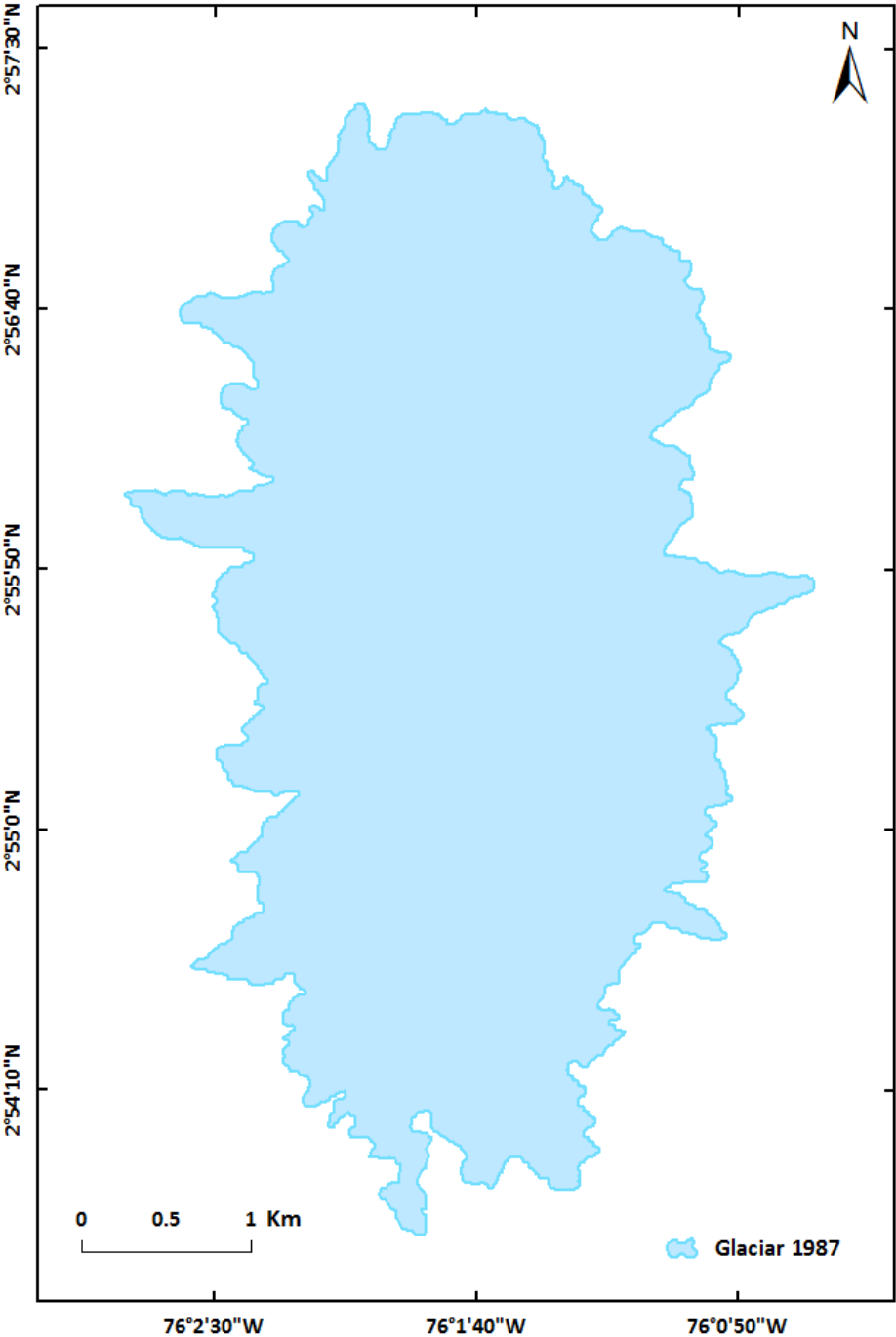
Sanchez, L. (2013). Determinación de la Superficie Vertical de Referencia para Colombia, Dresde, 106 P. Trabajo de grado (Diplom – Ingenierum), Technische Universität Dresden.

Santacoloma, C., Cardona, C., White, R., Mccausland, W., Trujillo, N., Bolaños, R. et al. (2009). Aspectos Sísmicos de las Erupciones Freáticas y Freatomagmáticas del Volcán Nevado del Huila (Colombia). Congreso Colombiano de Geología, 7 – 11 de septiembre de 2009, Paipa – Boyacá.

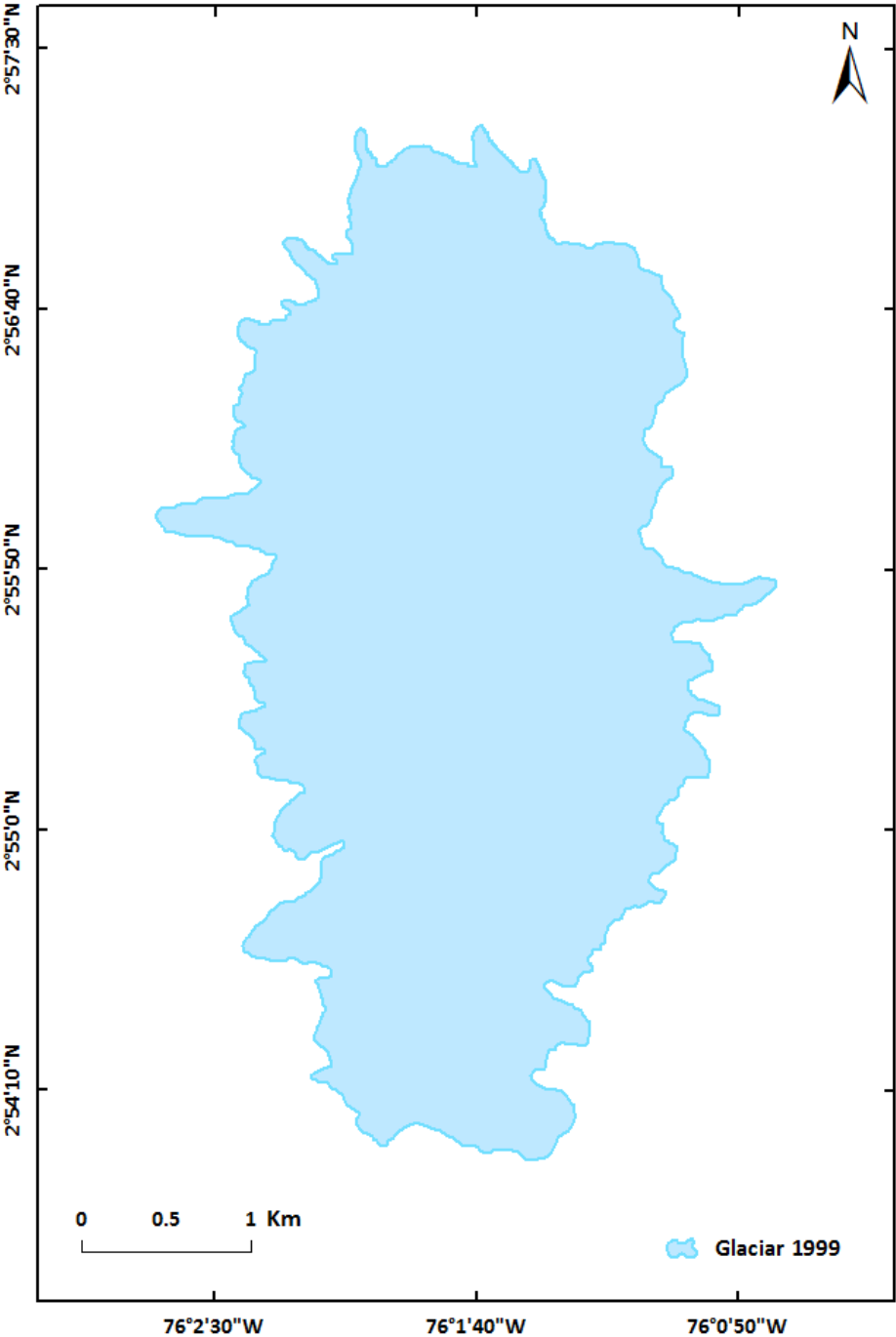
William, H. y Mcbirney, A. (1979). Volcanology, Universidad de California, 2009, ISBN 0877353212, 9780877353218, 397 P.

Worni, R. (2012). Characteristics of glacial lake hazards and extreme flow events: advanced approaches to model processes and process chains. Tesis Doctoral: Universidad Genève, No. Sc. 4511.

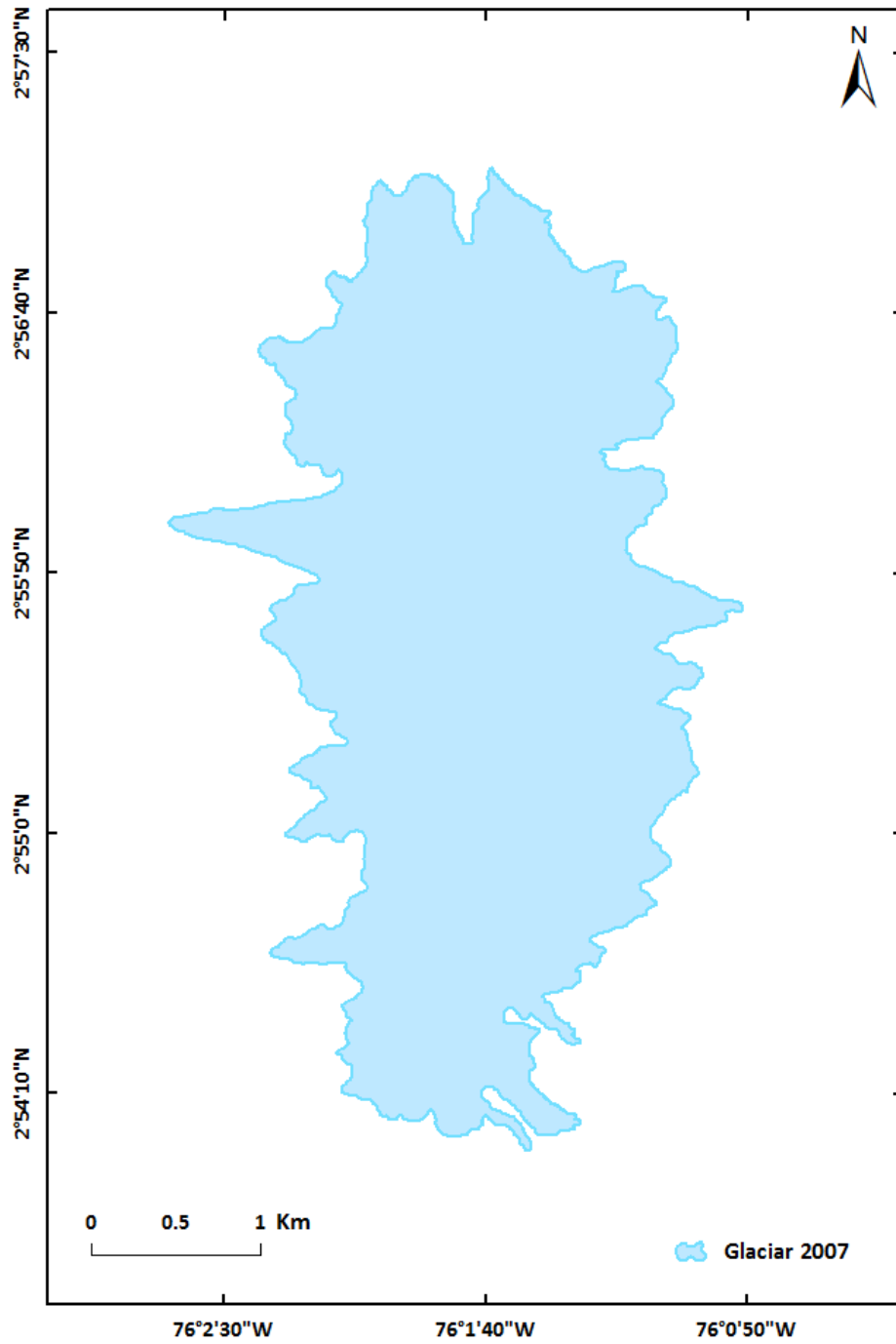
ANEXO A. Glaciar del VNH en 1987



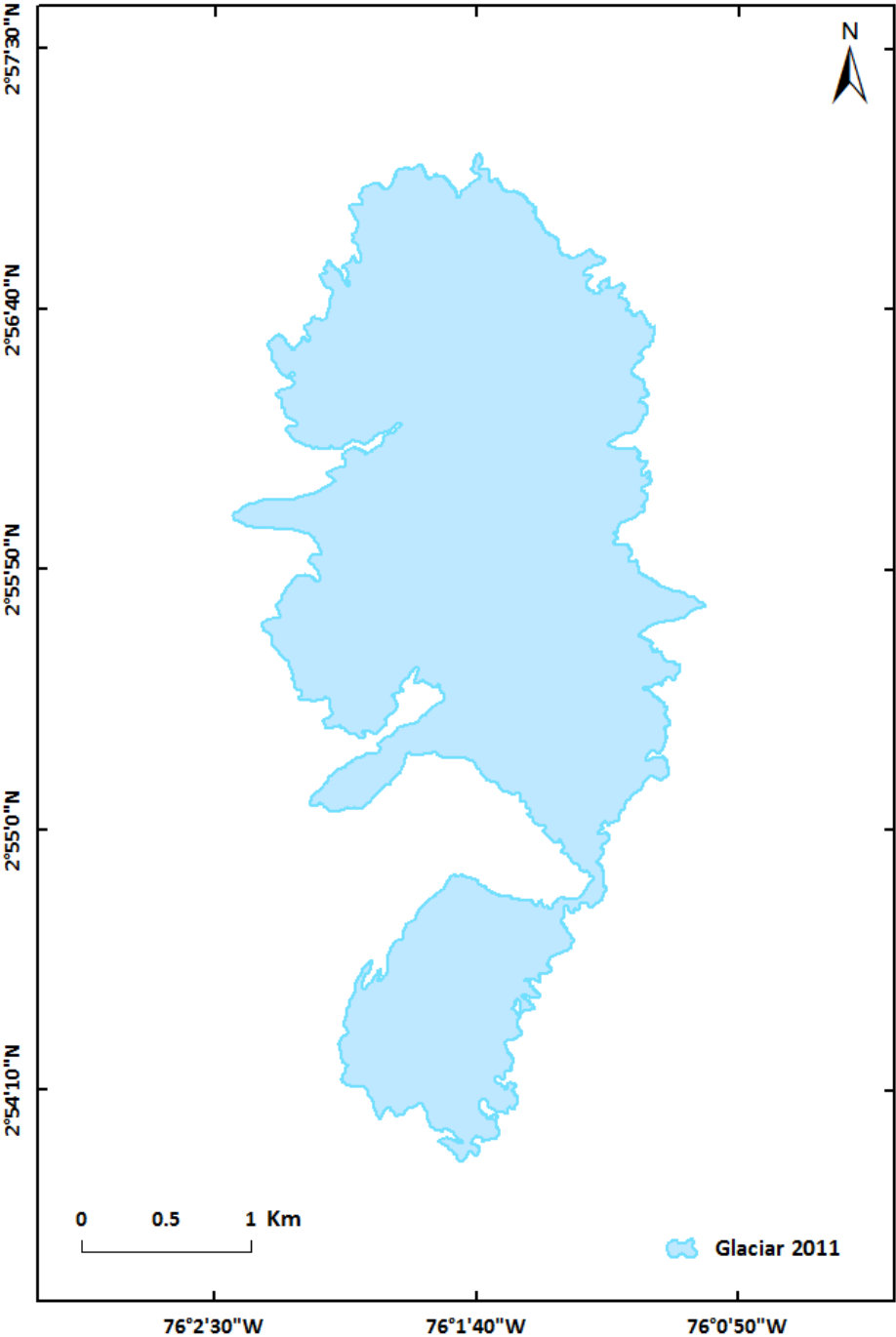
ANEXO B. Glaciar del VNH en 1999



ANEXO C. Glaciar del VNH en 2007



ANEXO D. Glaciar del VNH en 2011



ANEXO E. Glaciar del VNH en 2016

