

# Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciaria en la Cordillera Blanca

## Application of Teledetection to the multitemporary analysis of the glacier regression in la Cordillera Blanca

Recibido: 16/10/2008  
Aprobado: 26/01/2009

**Miguel Ernesto Alva Huayaney**  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
malvah@unmsm.edu.pe

**Juan Felipe Meléndez de la Cruz**  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
jmelendez@ree.gob.pe

### RESUMEN

Los cambios climáticos que se vienen sucediendo en nuestro planeta, nos permiten tener un acercamiento a lo que está ocurriendo en los glaciares de montaña de nuestro país, que se caracterizan por su fragilidad. La Cordillera Blanca constituye una de las más importantes áreas glaciares en nuestro país. La mayor parte de monitoreos se han realizado con trabajos de campo, donde muchas veces se presentan una serie de obstáculos para la colección de datos; de esta manera la Geomática mediante la Teledetección nos permite realizar monitoreos con mayor facilidad, mediante el empleo de imágenes satelitales para determinar el área de deshielo de los glaciares. Para el presente estudio se ha tomado como referencia los límites políticos de los distritos de Huaraz e Independencia, así como el empleo de distintas imágenes de satélite de los años 1989, 1998 y 2005, lo que nos permite analizar el comportamiento de la regresión glaciaria en un período de 16 años y predecir dicho comportamiento para 25 años (2014).

**PALABRAS CLAVE:** Teledetección, procesamiento digital de imágenes, regresión glaciaria, cambios climáticos.

### ABSTRACT

Climate changes that affect our planet nowadays, will lead us to approach to what is happening with the mountain glacial of our country, characterized by its fragility. The Cordillera Blanca is one of the most important glacial areas of our country. Most of the monitoring activities have been carried out on the field where many times a lot of obstacles to collect information are found. In this way, Geomatics, by means of Remote Sensing, helps us to conduct with greater ease the monitoring tasks, using satellite images to determine the melting area of the glaciers. For the study, political boundaries of Huaraz and Independencia districts, as well as the use of several satellite images of 1989, 1998 and 2005 have been considered as references, which help us analyse the behaviour of glacial regression in a period of 16 years and forecast such behaviour by 25 years (2014).

**KEY WORDS:** Remote Sensing, Digital Image Processing, Glacial Regression, Climate changes.

## INTRODUCCIÓN

Los glaciares y especialmente los tropicales, son excelentes indicadores de la evolución del clima, ecosistemas vulnerables y constituyen las reservas sólidas de agua dulce que son utilizadas para el consumo y actividades productivas tales como agricultura, hidroelectricidad, actividad minera y proyectos agroindustriales; éstos juegan un rol vital en el desarrollo socioeconómico de las poblaciones. La evidente disminución y pérdida de estas reservas como consecuencia del acelerado proceso de desglaciación y sus repercusiones, son motivo de una preocupación creciente en la comunidad científica del mundo estando íntimamente relacionados al aspecto del Cambio Climático Global.

En Sudamérica, los glaciares tropicales están emplazados entre Bolivia y Venezuela, cubriendo una superficie aproximada de 2758 km<sup>2</sup>,<sup>1</sup> distribuyéndose de la siguiente manera: Perú 71%, Bolivia 20%, Ecuador 4%, Colombia 4% y Venezuela 1%.

La Cordillera Blanca constituye la más importante área glaciar en nuestro país, siendo a la fecha el área de glaciares más extensa del Perú.

La zona en estudio se encuentra bajo la administración de Instituto Nacional de Recursos Naturales (Inrena), y corresponde al Parque Nacionales Huascarán, creado por D.S. N° 0622-75-AG del 1 de julio de 1975, con una superficie de 340,000 ha, de allí la importancia de su estudio para una mejor conservación y protección como parque natural y como área de reserva para la investigación y el turismo. Estas masas glaciares son relictos de la última glaciación, y debido al aumento térmico generalizado desde el año 1850 están en franco retroceso (fusión acelerada)<sup>2</sup>.

Por este motivo, el objetivo de esta investigación es el estudio multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca, distritos de Huaraz e Independencia períodos 1989, 1998 y 2005.

## PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS

Los glaciares de la Cordillera Blanca muestran valores recientes de retroceso de las masas de hielo, siendo considerables y acelerado en las últimas décadas. Es decir, hay una fusión natural de las masas glaciares producto de la desglaciación. Este proceso natural viene siendo acelerado por los procesos antrópicos que incrementan las temperaturas ambientales. Por lo tanto, es claro que el calentamiento en regiones de alta montaña conduciría a la reducción o desaparición de superficies significativas de nieve y hielo.

1 JORDÁN, 1991

2 FLÓREZ, Antonio: *Evolución de sus relieves y modelados*. Red de estudios de Espacio y Territorio, RET. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2003, 238 pp.

## MÉTODOS Y RESULTADOS

El Parque Nacional Huascarán se localiza dentro de la montaña conocida como la Cordillera Blanca, ubicada en el flanco occidental de los Andes; posee una orientación general SE - NW a lo largo de 180 kilómetros con una superficie de glaciares de 693.72 km<sup>2</sup> y un volumen estimado de 22,458 km<sup>3</sup>.

Políticamente se ubica en el departamento de Ancash y comprende las provincias de Huaraz, Recuay, Carhuaz, Huaylas, Yungay, Bolognesi, Huari, Asunción, Mariscal Luzuriaga y Pomabamba. Debido a que la Cordillera Blanca ocupa una gran extensión, sumado la falta de información satelital disponible, se definió como área de estudio para el presente trabajo la provincia de Huaraz, distritos de Huaraz e Independencia, dentro de las coordenadas 77°39'24" LW, 09°20'48" LS y 77°16'2" LW, 09°44'15" LS y comprende una superficie de 496 km<sup>2</sup>.

Para la determinación de la regresión glaciaria en el ámbito de estudio, ha sido necesaria la utilización de imágenes satelitales por varios motivos. Por un lado, se puede obtener información multitemporal, lo que permite una mejor comprensión de los procesos que actúan sobre la superficie terrestre y la evolución a la que están sometidos los elementos que sobre ella se encuentran. Por otro lado, otras de las ventajas de la percepción remota, es la de proveer de una visión sintética, integrada y uniforme de la superficie terrestre, la calidad geométrica que, a través de tratamientos informáticos, permite actualizar cartografías topográficas y temáticas automáticamente y la enorme riqueza de información sobre un mismo objeto, al ser registrado su comportamiento en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. Las imágenes proporcionadas por los satélites ofrecen una manera mucho más eficiente de estudiar los glaciares, ya que permiten calcular la altura del glaciar, la densidad de la nieve, el tamaño del grano, así como la calidad de la nieve sin ser absolutamente necesario acudir al área de estudio para comprobar los datos. Sin embargo, no puede medir el espesor de la masa glaciaria, es decir, a qué profundidad promedio se ubica el lecho rocoso (basamento), dato importante para estimar el balance hídrico multitemporal y calcular la pérdida del recurso agua. La cobertura nival está repartida por zonas características a lo largo de la superficie terrestre y por medio de las imágenes de satélite se puede obtener una visión panorámica de todas éstas. Por medio de los sensores ópticos-electrónicos se puede obtener información sobre regiones no visibles del espectro que con el ojo humano o la fotografía convencional no es posible detectar. Mediante la radiación microondas se puede ver a través de nubes tanto durante el día como por la noche.

Las imágenes de satélite utilizadas para este trabajo corresponden a los programas Landsat 5 (TM), SPOT 4 (XS) y ASTER (VIR). Se han considerado las

3 INRENA. Parque Nacional Huascarán. Plan Maestro 2003-2007, Lima, Perú. 2003. 220 pp.

bandas comunes a todos para poder homogeneizar el análisis espectral bajo las mismas características.

Bandas espectrales consideradas en el presente estudio:

**Banda Verde:** (0,52 a 0,60 micrones). Especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas y, al igual que la banda 1, para detectar la presencia o no de limonita.

**Banda Roja:** (0,63 a 0,69 micrones). Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas y para detectar limonita.

**Banda Infrarroja Cercano:** (0,76 a 0,90 micrones). Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

**Banda Infrarrojo Medio:** (1,55 a 1,75 micrones). Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.

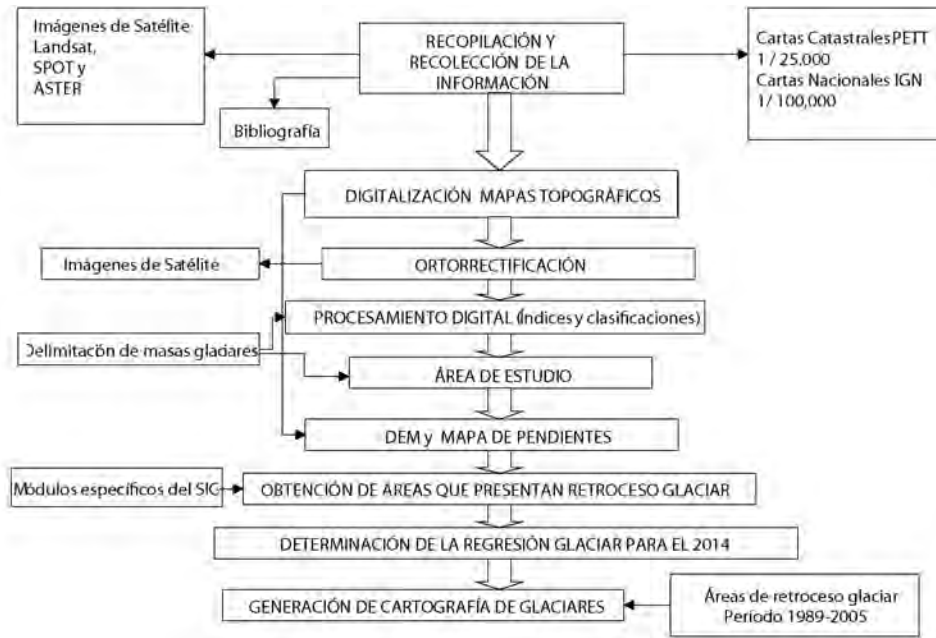
CUADRO 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES UTILIZADOS

| CARACTERÍSTICAS     | SENSOR                        |                            |                             |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|                     | LANDSAT 5 TM<br>(30/Dic/1989) | SPOT 4 XS<br>(01/Sep/1998) | ASTER VNIR<br>(11/Jul/2005) |
| BANDAS ESPECTRALES  | 7                             | 4                          | 14                          |
| VERDE               | 0.52 - 0.60                   | 0.50 - 0.59                | 0.52 - 0.60                 |
| ROJO                | 0.63 - 0.69                   | 0.61 - 0.68                | 0.63 - 0.69                 |
| INFRARROJO CERCANO  | 0.75 - 0.90                   | 0.79 - 0.89                | 0.78 - 0.86                 |
| INFRARROJO MEDIO    | 1.55 - 1.75                   | 1.58 - 1.73                | 1.60 - 1.70                 |
| RESOLUCIÓN ESPACIAL | 30, 120                       | 10, 20                     | 15, 30, 90                  |
| RESOLUCIÓN TEMPORAL | 17 días                       | 26 días                    | 16 días                     |
| TAMAÑO DE ESCENA    | 185 * 185 km                  | 60 * 60 km                 | 60 * 60 km                  |

La selección de bandas similares, nos ha permitido discriminar mejor diferentes tipos de cubiertas, hemos realizado distintos índices conocidos tales como los Índices de Nieve, de Agua y de Vegetación, a partir de cuyos resultados se fue integrando como capas de información temática para realizar clasificaciones supervisadas y no supervisadas considerando como factor auxiliar importante las pendientes para determinar en qué zonas ha sido mayor el retroceso glaciar.

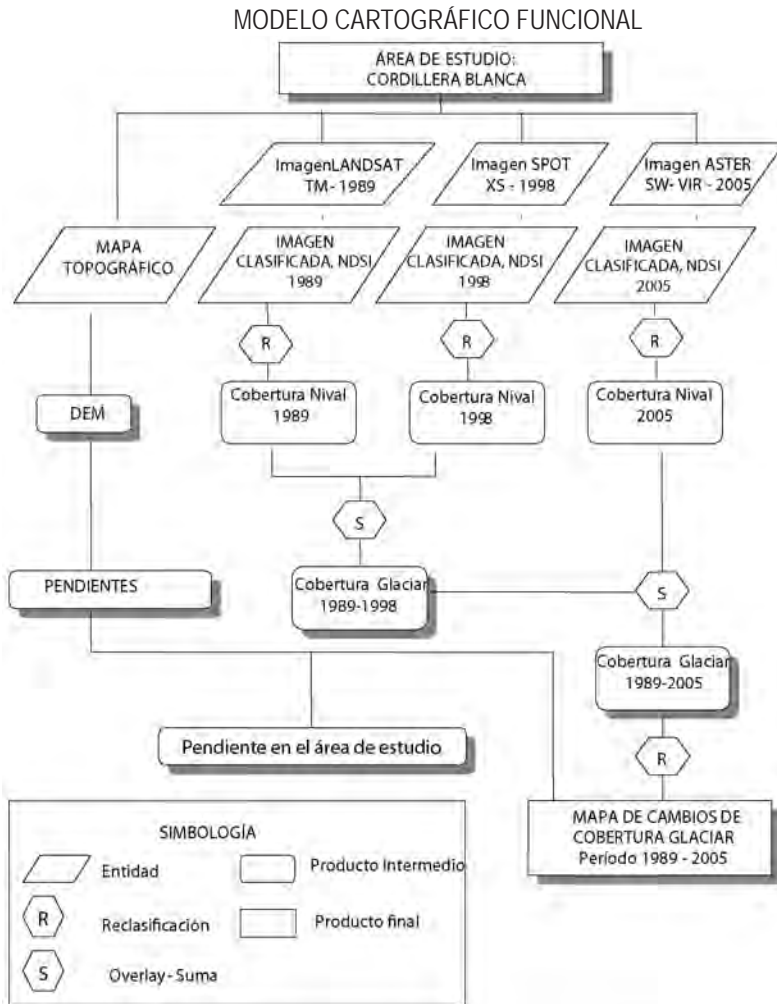
PROCESO METODOLÓGICO

Se tendrán en cuenta los siguientes pasos metodológicos:



1. Recopilación y revisión de la información existente del área
  - Bibliografía.
  - Mapas topográficos digitalizados del PETT a escala 1:25,000: 19h-II-SE-1972, 19i-III-SO-1972, 20h-I-NE-1972, 20i-IV-NO-1974).
  - Mapas topográficos digitales a escala 1:100,000 (19h, 19i, 20h, 20i).
  - Imágenes de satélite Landsat 5 TM (30-Dic-1989), SPOT 4 XS (01-Sep-1998) y ASTER (11/Jul/2005).
2. Escaneo y digitalización de mapas topográficos.  
Se escanearon planchas topográficas para la obtención de cartografía base en formato digitales. La digitalización permitió generar un Modelo Digital del Terreno (DEM) y un mapa de pendientes.
3. Ortorrectificación.  
A partir del DEM se realizó la ortorrectificación de las imágenes de satélite, para corregir las distorsiones de desplazamientos del relieve.
4. Delimitación de las masas glaciares.  
A través de procesos de índices de nieve, agua y clasificación supervisada, se obtiene las áreas ocupadas por las masas glaciares para los tres períodos definidos: 1989, 1998 y 2005.

5. Aplicación de software SIG-GIS para el modelamiento de las áreas que presentan retroceso glaciar.  
El programa de Sistema de Información Geográfica permitirá la superposición de las áreas ocupadas por glaciares para los tres momentos definidos de tal manera de mostrar la evolución que han sufrido las masas de hielo en las últimas décadas.
6. Proyectar escenarios futuros.  
Utilización de métodos matemáticos que permitan inferir el retroceso glaciar para el año 2014.
7. Elaboración de salidas gráficas, en donde estén representadas las áreas de retroceso glaciar obtenidas para el período 1989-1998-2005.



### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

#### *Proyección de escenarios futuros*

Para poder inferir cual será el retroceso glaciario para el año 2014 se realizaron una serie de cálculos que permitieron efectuar una aproximación de la cantidad de superficie glaciaria que se perderá.

En primer lugar se determinó una línea de tendencia, definida a partir de la cantidad de hectáreas que ocupaban los glaciares para los años 1989, 1998 y 2005.

Posteriormente se aplicó el método de interpolación aritmética para corroborar los valores obtenidos anteriormente. Se utilizó la siguiente fórmula<sup>4</sup>:

$$P_x = P_0 + \frac{P_1 - P_0}{n} * t$$

Donde:  
 P<sub>x</sub>: cantidad de hectáreas que se quieren conocer en el año x  
 P<sub>0</sub>: cantidad de hectáreas para el primer año  
 P<sub>1</sub>: cantidad de hectáreas para el último año  
 n: número de años entre P<sub>0</sub> y P<sub>1</sub>  
 t: número de años entre el primer año y el año que se quiere conocer (es decir entre P<sub>0</sub> y P<sub>x</sub>)

De esta manera la fórmula se desarrolla así:

$$P_x = 6781.09 + \frac{5098.37 - 6781.09}{16} * 25 = 4151.84 \text{ ha}$$

CUADRO 2. TENDENCIA DE RETROCESO QUE PRESENTAN LOS GLACIARES DE LA CORDILLERA, DISTRITOS DE HUARAZ E INDEPENDENCIA

| AÑO  | ÁREA (a) | PERÍMETRO (km) | REGRESIÓN GLACIAR (ha) |  |        | %     |
|------|----------|----------------|------------------------|--|--------|-------|
| 1989 | 6781.09  | 267.60         | 1487.6                 |  |        | 21.94 |
| 1998 | 5293.53  | 225.68         |                        |  | 195.16 |       |
| 2005 | 5098.37  | 187.82         |                        |  | 946.53 | 18.56 |
| 2014 | 4151.84  |                |                        |  |        |       |

#### *Influencia de las pendientes:*

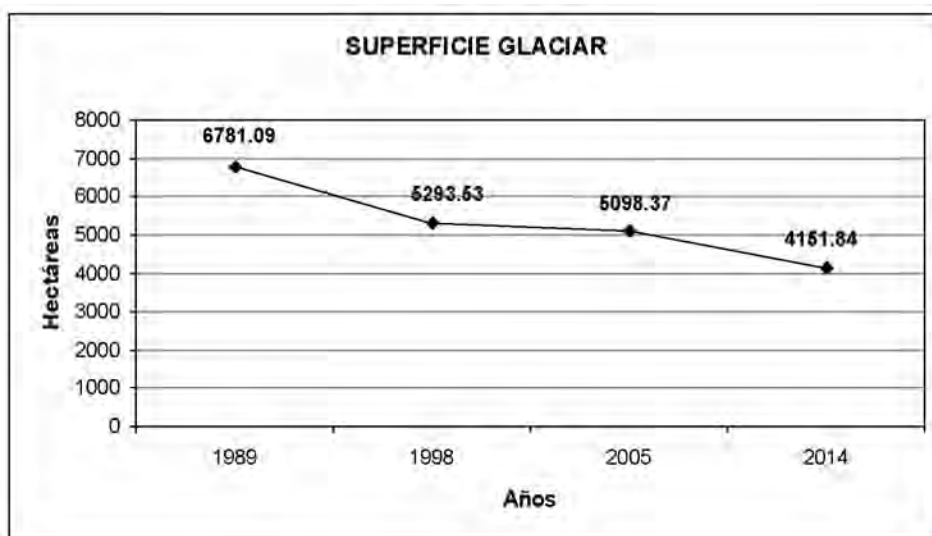
Por encima de los 35° la pérdida de glaciares es mayor, debido a la poca compactación de la capa nival y los procesos gravitatorios.

4 POSADA, Elena y otros. *Estudio multitemporal del retroceso glaciario a través de imágenes de sensores remotos y SIG en la sierra Nevada del Cocuy, Cordillera Oriental de Colombia, periodo 1960-2003*. UDFJC - IGAC. 2004. Santafé de Bogotá. Colombia.

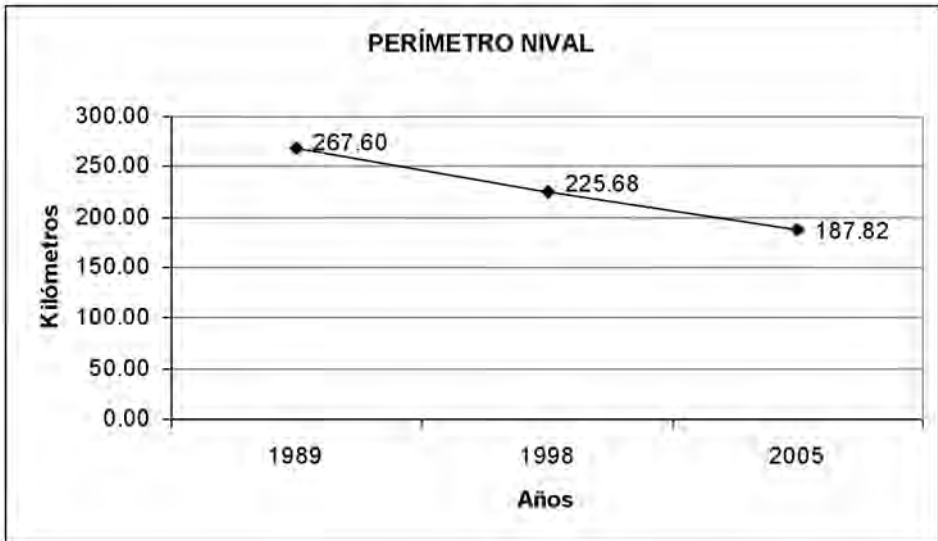
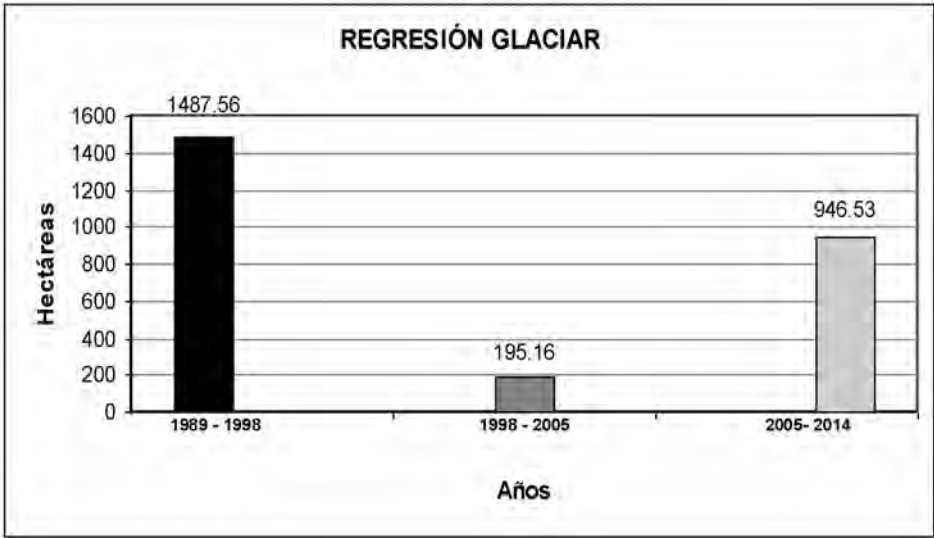
Los rangos de pendientes utilizados corresponden a una clasificación Alpina, considerando intervalos de 7°. A pendientes mayores de 28° empiezan los abarrancamientos de hielo, dependiendo de su grado de compactación.

| Attributes of Pendientes_1989_1998 |          |                |             |                          |               |  |
|------------------------------------|----------|----------------|-------------|--------------------------|---------------|--|
| OID                                | GRIDCODE | Count_GRIDCODE | First_Rango | Sum_Area_Km <sup>2</sup> | Sum_Hectareas |  |
| 0                                  | 1        | 2              | < 3.5°      | 0.0046                   | 0.4565        |  |
| 1                                  | 2        | 3              | 3.5 - 7°    | 0.0002                   | 0.0157        |  |
| 2                                  | 3        | 20             | 7 - 14°     | 0.1514                   | 15.136        |  |
| 3                                  | 4        | 28             | 14 - 21°    | 0.2609                   | 26.0934       |  |
| 4                                  | 5        | 50             | 21 - 28°    | 0.2834                   | 28.337        |  |
| 5                                  | 6        | 53             | 28 - 35°    | 0.5764                   | 57.6395       |  |
| 6                                  | 7        | 78             | 35 - 42°    | 0.7085                   | 70.8511       |  |
| 7                                  | 8        | 68             | 42 - 49°    | 1.3055                   | 130.5523      |  |
| 8                                  | 9        | 10             | > 49°       | 12.402                   | 1240.1996     |  |

| Attributes of Pendientes_1998_2005 |          |                |             |                          |               |  |
|------------------------------------|----------|----------------|-------------|--------------------------|---------------|--|
| OID                                | GRIDCODE | Count_GRIDCODE | First_Rango | Sum_Area_Km <sup>2</sup> | Sum_Hectareas |  |
| 0                                  | 1        | 1              | < 3.5°      | 0.0074                   | 0.7362        |  |
| 1                                  | 2        | 1              | 3.5 - 7°    | 0.0028                   | 0.2824        |  |
| 2                                  | 3        | 7              | 7 - 14°     | 0.2085                   | 20.8522       |  |
| 3                                  | 4        | 19             | 14 - 21°    | 0.2032                   | 20.3165       |  |
| 4                                  | 5        | 31             | 21 - 28°    | 0.2533                   | 25.3311       |  |
| 5                                  | 6        | 34             | 28 - 35°    | 0.1986                   | 19.8605       |  |
| 6                                  | 7        | 46             | 35 - 42°    | 0.2846                   | 28.4631       |  |
| 7                                  | 8        | 41             | 42 - 49°    | 0.4023                   | 40.2327       |  |
| 8                                  | 9        | 9              | > 49°       | 3.0929                   | 309.2944      |  |







*Incremento de lagunas*

Las imágenes multitemporales nos muestran claramente cual ha sido la pérdida de los glaciares, teniendo como referencia el año 1989, se puede observar que el límite nival ha ido disminuyendo y en algunos sectores desapareciendo; contrariamente, el nivel de las lagunas se ha ido incrementando considerablemente, poniendo en serio peligro la seguridad física de la ciudad de Huaraz, tal como ocurrió con el aluvión de 1941 que destruyó parte de la ciudad, producido por un desprendimiento del glaciar ocasionando una rotura del dique de la laguna de Palcacocha.

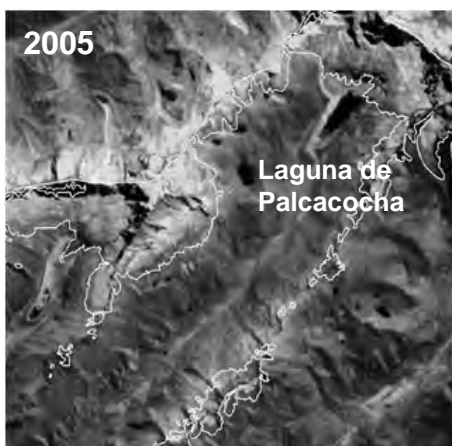
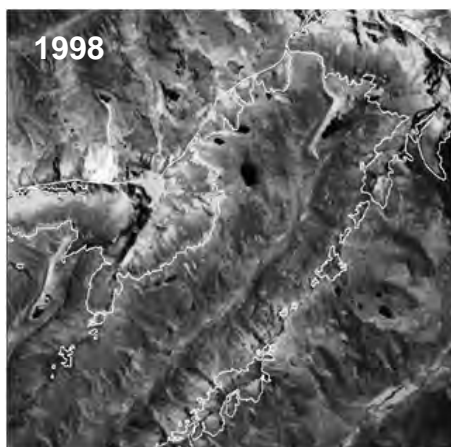
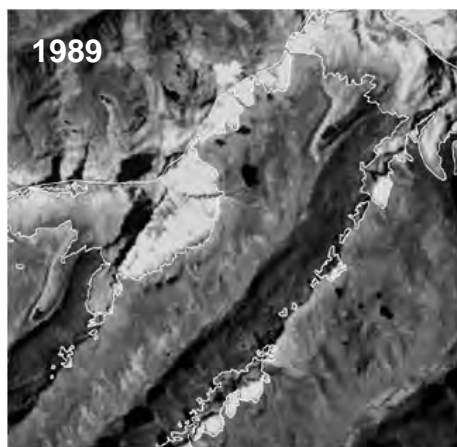
CUADRO 3. MUESTRA LA TENDENCIA DEL INCREMENTO DE LAS LAGUNAS, DEBIDO AL DESHIELO QUE PRESENTAN LOS GLACIARES DE LA CORDILLERA, DISTRITOS DE HUARAZ E INDEPENDENCIA

| AÑO  | ÁREA (ha) | PERÍMETRO (km) | INCREMENTO (ha) |
|------|-----------|----------------|-----------------|
| 1989 | 199.53    | 29.58          |                 |
| 1998 | 220.08    | 33.09          | 20.55           |
| 2005 | 286.38    | 35.53          | 66.30           |

FUENTE: Elaboración Propia

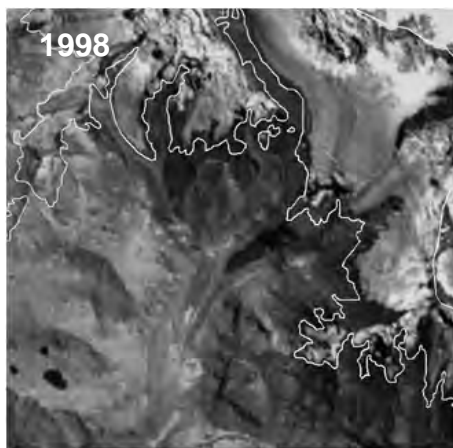
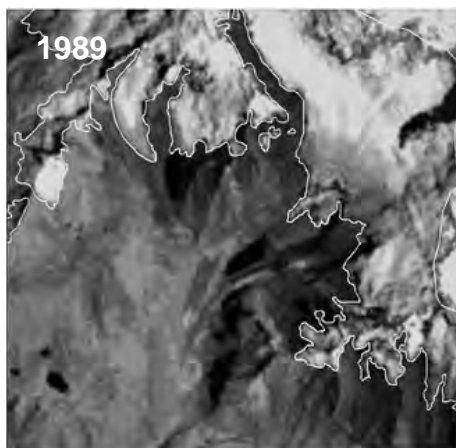
A: REGRESIÓN GLACIAR EN LA QUEBRADA COJUP, SECTOR LAGUNA PALCACOCHA

| 1989      |                | 1998      |                | 2005      |                |
|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| ÁREA (ha) | PERÍMETRO (km) | ÁREA (ha) | PERÍMETRO (km) | ÁREA (ha) | PERÍMETRO (km) |
| 7.81      | 1.76           | 12.54     | 2.07           | 41.71     | 3.45           |



B: REGRESIÓN GLACIAR EN LA QUEBRADA QUILCAYHUANCA, SECTOR LAGUNA CUCHILLACOCHA

| 1989      |                | 1998      |                | 2005      |                |
|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| ÁREA (ha) | PERÍMETRO (km) | ÁREA (ha) | PERÍMETRO (km) | ÁREA (ha) | PERÍMETRO (km) |
| 14.61     | 1.88           | 26.71     | 3.27           | 46.06     | 3.68           |



CONCLUSIONES

- La metodología permitió observar las variaciones en la extensión de las lenguas glaciares de la Cordillera Blanca desde 1989 al 2005. Estas variaciones se pueden deber al calentamiento global de la Tierra, al fenómeno del Niño y de la Niña sufrido en los últimos tiempos.
- La metodología utilizada para el presente trabajo ha permitido resultados satisfactorios, aunque hubiera sido mejor si se trabajaba con datos de un mismo Sensor para tener la misma referencia espectral, espacial y temporal.

- Las imágenes obtenidas a través de sensores remotos son una herramienta muy valiosa e imprescindible para realizar estudios de retrocesos glaciares, ya que permiten obtener resultados confiables en un tiempo récord, en comparación a otros métodos como la lectura directa en campo.
- Actualmente los glaciares ocupan una mayor extensión hacia el lado oriental (Marañón), comparada con la vertiente occidental; la razón es que sobre las cornizas abruptas (frente) occidentales la pendiente es subvertical y el hielo no puede acumularse, en consecuencia, el retroceso glaciar ha sido mayor en la vertiente occidental que en la oriental.
- Es evidente que existe un retroceso de las masas glaciares de alta montaña, el cual se comprueba con los resultados obtenidos en el presente trabajo, que a su vez confirma los resultados de otros estudios realizados por otros autores en diferentes lugares del mundo.
- La pendiente sí es una variable que influye en gran medida en el retroceso glaciar de la Cordillera Blanca, ya que se aprecia que en las zonas de altas pendientes (mayores a 35°) es donde el retroceso ha sido mayor en comparación a las zonas con pendientes menores (entre 0 -35°).

#### RECOMENDACIONES

- a. Realizar un levantamiento geomorfológico de los glaciares siguiendo el criterio de cuenca, destacando las siguientes unidades:
  - Circos glaciares.
  - Laderas con glaciares muy compactas.
  - Nivel de disección incluyendo los subglaciares.Con estos datos se pueden definir las áreas con mayor posibilidad de subsistir al retroceso glaciar.
- b. Instalar instrumentos meteorológicos en los glaciares a fin de conocer la precipitación y temperatura mensual y anual.
- c. No olvidar que existe una estación de verano (diciembre-abril) donde aumenta la temperatura.
- d. Existen levantamientos geomorfológicos a semidetalle de la Sub Cuenca del río Auqui y la quebrada Cojup que complementarán el presente estudio.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVA HUAYANEY, Miguel Ernesto y Juan Felipe MELÉNDEZ DE LA CRUZ  
2005 Aplicación de la Geomática en el análisis geomorfológico de la Cuenca de la Quebrada Cojup-Huaraz-Ancash. En *Investigaciones Sociales*. Lima: Instituto de Investigaciones Histórico Sociales, UNMSM.

CHUVIECO SALINERO, Emilio

2007 *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona: Ediciones Ariel Ciencia, 3ra. edición, 586 pp.

INRENA

2007 *Comportamiento y estado actual de Pastorruri*. Huaraz: Intendencia de Recursos Hídricos, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos.

SANTIAGO, Yonny; María SORIA; Elena POSADA y Joel GUILLÉN

2004 *Estudio multitemporal del retroceso glaciar a través de imágenes de sensores remotos y SIG en la sierra Nevada del Cocuy, Cordillera Oriental de Colombia, periodo 1960-2003*. Santafé de Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas / Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

SILVERIO, Walter y Jean-Michel JAQUET

*Aplicación de la Teledetección satelitaria para la estimación del retroceso glaciar en la Cordillera Blanca Perú, entre 1987 y 1996*. Suiza: Universidad de Ginebra.

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)

«Climate Change 2007: The Physical Science Basis». <http://www.ipcc.ch/> 18 pp.