

Dinámica y distribución espacial de los glaciares en la Cordillera Blanca – Huaraz, Perú (1970 - 2003)

Alex Zambrano Ramírez
Tulio Chávez Espíritu
César Portocarrero Rodríguez
Karina Ccopa Astete

Autoridad Nacional del Agua – ANA
Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos
Av. Confraternidad Internacional Oeste N°167 - Huaraz, Perú
glaciologia@ana.gob.pe

Abstract. It is showed the behavior of the glacier dynamics in the Cordillera Blanca located in the western branch of the Northern Andes of Peru, between 1970 and 2003, as are the evolutionary processes on its surface, number of glaciers, fragmentation and extinction . As well as identifying their areas of influence in recent periods, in the main watersheds (Pacific and Amazon) . The information in the 70's was obtained from technical reports made by the UGRH - Hidrandina S.A. which were based on aerial photographs between 1962 and 1970. For 2003, the information was generated using digital processing techniques of satellite images (Aster and SPOT-5) and algorithms like NDSI (Normalized Difference Snow Index), and subsequently integrated into Geographic Information Systems. For the characterization and classification of glaciers was taken the advice of the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS). As a result for the year 2003 has been estimated an glacier area of 527.62 km² , distributed mostly in the Santa River basin (68.2%) which drains its waters into the Pacific Ocean. As a result of the dynamics of these glaciers in the last 33 years, was determined that 141 glaciers disappeared, 112 bodies were fragmented, meaning a loss of 27% (195.75Km²) of the total area from the amount obtained in the 70s (723.37 km²).

Keywords: NDSI, GLIMS, ASTER, SPOT, Glacier Dynamic, Fragmentation.

1. Introducción

La Cordillera Blanca se localiza en los Andes Centrales del continente Sudamericano, sus límites están comprendidos entre las coordenadas de 07°41'31" a 10°10'57" Latitud Sur y 76°54'57" a 78°18'1" de Longitud Oeste. Esta región de los Andes en territorio peruano se divide en tres sectores: Norte, Centro y Sur. Los glaciares de La Cordillera Blanca se encuentran en el ramal occidental del sector Norte y se prolonga en dirección N30°O, desde el nevado Rajutuna hasta el nevado Pelagatos, con una longitud lineal aproximada de 210 Km.

La Cordillera Blanca es el sistema montañoso que actúa como divisoria de aguas entre las vertientes continentales del Pacífico y del Atlántico, destacándose el Sistema glaciar Huascarán como el mas alto de los glaciares tropicales del mundo, con una altitud aproximada de 6,701 m.s.n.m. En la Cordillera se encuentra el conjunto de glaciares de montaña de mayor extensión de la zona tropical del planeta ^[1,2]. Numerosos ecosistemas terrestres y acuáticos de gran valor ecológico, paisajístico, ambiental y económico se distribuyen a lo largo de ella, así como un gran potencial hídrico de sus cuencas hidrográficas y la gran incidencia de desastres asociados a la dinámica de los glaciares y lagunas propiciaron la investigación glaciológica en el Perú. En la década de los 70 la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, siendo parte del Instituto de Geología y Minería, ve ampliada su gestión a nivel nacional, iniciándose los primeros estudios de los glaciares de todas las cordilleras nevadas del Perú, realizándose el primer Inventario Nacional de Glaciares el cual tuvo una duración de 13 años, ya formando parte de la Empresa eléctrica Hidrandina S.A, donde se identificaron 722 glaciares con una superficie aproximada de 723.37 Km² ^[3].

En los últimos años se han llevado a cabo investigaciones científicas que han cuantificado en forma parcial los glaciares de la Cordillera Blanca, siendo relevante para el objetivo el uso de tecnologías espaciales, para la identificación de los glaciares y caracterización morfométrica

de los mismos ^[4,5,6], el objetivo del presente trabajo es estimar la pérdida de la superficie glaciar, describir sus características morfométricas y su distribución hidrográfica en el ámbito de la cordillera.

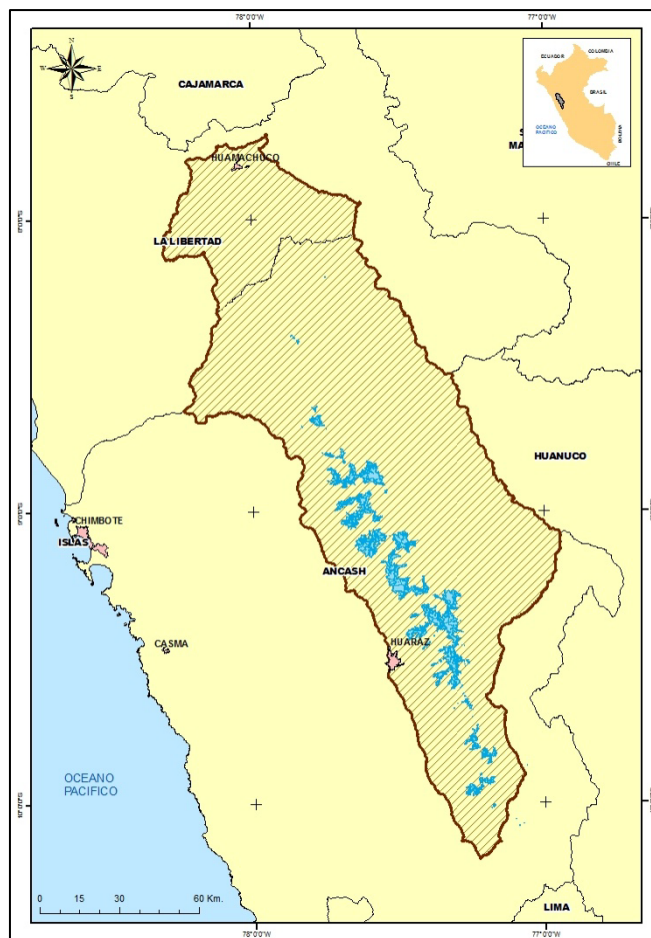


Figura1. Mapa de Ubicación

2. Metodología

El trabajo se basó en el uso de técnicas de teledetección espacial, información de campo y herramientas informáticas, todas ellas integradas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que facilitó la extracción, manipulación, análisis, actualización y edición de la información cartográfica y temática.

La cobertura cartográfica del ámbito de estudio se logró mediante el empalme de 35 cartas nacionales topográficas de escala 1:100,000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) usándose la proyección cilíndrica Transversal Mercator, el sistema de coordenadas UTM Zona 18 Sur y el Datum WGS84, y fueron utilizadas en diferentes etapas y procesos, como la generación del modelo de elevación digital que permitió la corrección geométrica (ortorectificación) de 15 imágenes satelitales ópticas de 60x60 Km, 13 escenas del sensor Aster y 2 escenas del sensor Spot5, con resolución espacial de 15 y 10 m. respectivamente, lográndose un error de ajuste menor a 2 píxeles (30 m. y 20 m. para ambas imágenes respectivamente).

Para la selección de imágenes satelitales se consideró: (a) la mínima presencia de nubes, (b) correspondencia a un mismo año base y (c) la época del invierno austral. Se estableció como año base del inventario el 2003, debido a la disponibilidad de las escenas en el ámbito de estudio.

El procesamiento de las imágenes satelitales se realizó usando las herramientas del software ENVI + IDL, y la integración de los datos y construcción de la base cartográfica y temática fue realizada utilizando las funciones del software ArcGIS.

Se han registrado las áreas glaciares con una superficie mínima de 0.005 Km², definida en función al área mínima cartografiable y las características regionales de los glaciares de nuestro ámbito de estudio. Conforme sugiere la guía del Proyecto GLIMS [8], la discriminación de las “masas de nieve y hielo expuestas o visibles” se realizó mediante el algoritmo NDSI (Normalized Difference Snow Index) desarrollado por Dozier (ecuación 1), puesto que permite su adecuada discriminación de otras coberturas de la superficie del terreno [9].

$$NDSI = \frac{\rho_{vis} - \rho_{ir}}{\rho_{vis} + \rho_{ir}} \quad (1)$$

Donde:

ρ_{vis} , Reflectancia en la Banda visible

ρ_{ir} , Reflectancia en la Banda infrarroja

Aplicando éste algoritmo se supera con éxito los problemas de saturación de las áreas sombreadas, el hielo marginal y algunos cuerpos de agua [6,9,10], seguidamente se aplico un umbral de 0.4 para la extracción de superficies continuas de hielo/nieve para cada imagen, este valor fue probado en el campo. Posteriormente, se procedió a delimitar y dividir cada glaciar mediante herramientas de geo-procesamiento e interpretación de diferentes capas de información. Se realizó un análisis multi-temporal de la cobertura glaciar para encontrar persistencia de la cobertura glaciar y evitar confusiones de las áreas glaciares con superficies de nieve temporales.

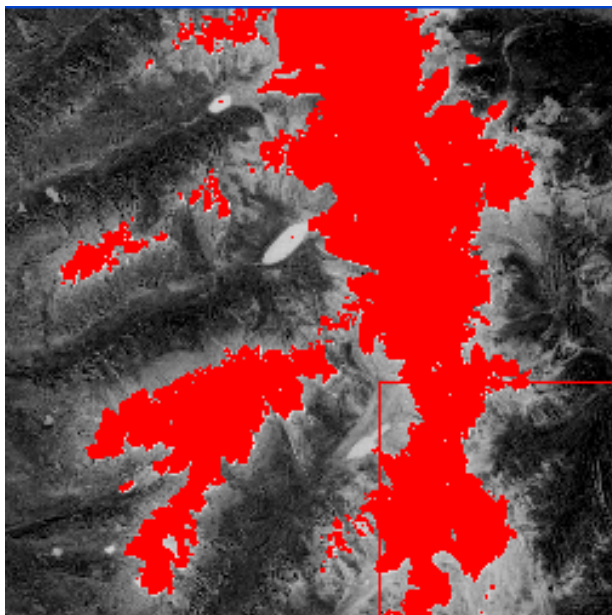


Figura 2. Imagen NDSI, aplicación con 0.4 de umbral para extraer cobertura glaciar

En algunos casos excepcionales como “glaciares cubiertos” sus límites fueron obtenidos a través de la digitalización directa, mediante el análisis visual de las imágenes satelitales sobre diversas combinaciones en falso color dependiendo del sensor.

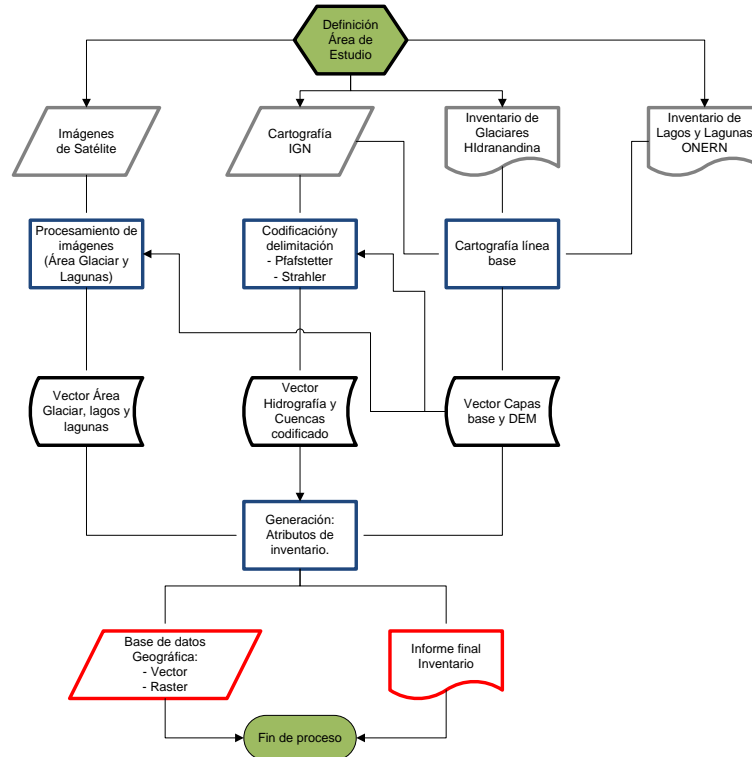


Figura 3. Diagrama de Flujo

3. Discusión y Resultados

Resultado del trabajo en La Cordillera Blanca se ha obtenido una superficie glaciar de 527.62 Km², que concentra el 68.2% en la cuenca del río Santa, 31.3% en la cuenca del río Marañón y 0.5% en la cuenca del río Pativilca. El número total de glaciares en la Cordillera Blanca se ha determinado en 755, los que se encuentran distribuidos en 548 glaciares en la cuenca del río Santa, 10 glaciares en la cuenca del río Pativilca, 197 glaciares en la cuenca del río Marañón.

Los glaciares varían en tamaño desde los 0.005 a 14.79 Km² de superficie, en términos generales los glaciares con una superficie menor al 1 Km², son los que predominan y representa el 81% con respecto a la cantidad total. El gran aporte en superficie de los glaciares mayores al 1 Km² resulta indudable en los sistemas glaciares del sector central y sur de la cordillera (Santa Cruz, Huandoy, Huascarán, Huantsan, Chinchey), en tanto que en el extremo norte (Pelagatos, Pacra, Champará y Pilanco) los glaciares pequeños controlan la superficie de la masa total del sistema. Los glaciares pequeños (<= 1 Km²) se concentran en mayor porcentaje (75%) en el sector occidental de la cordillera, al igual que los glaciares grandes (> 1 Km²) (71%); cabe resaltar que los glaciares más extensos de la cordillera se localizan en la vertiente del Marañón (Jankapampa 1: 14.79 Km² y Copap: 12.09 Km²) (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de los glaciares por vertiente y cuenca hidrográfica

Vertiente	Cuenca	$\leq 1 \text{ Km}^2$	$> 1 \text{ Km}^2$
		%	%
Occidental (Pacífico)	Santa	73.0	71.4
	Pativilca	1.6	0.0
Oriental (Atlántico)	Marañón	25.4	28.6
Total		100.0	100.0

Según la clasificación GLIMS, el 92% de los glaciares inventariados son clasificados como de *montaña*, es decir se encuentran adheridos a los flancos de laderas y no muestran una cuenca definida; el 6% son de tipo *valle* con un área de acumulación claramente definida y delimitada topográficamente, por lo general sobre un valle preexistente; y finalmente, el 2% son *glaciares cubiertos*, parcial o totalmente por escombros, polvo transportado, principalmente inactivos.

La cuenca del río Santa concentra el mayor porcentaje de glaciares tipo *montaña* (71%), de tipo *valle* (86%) y casi la totalidad de superficie de los *glaciares cubiertos*. La ubicación preponderante de los glaciares de *valle* y de los *glaciares cubiertos* en el sector occidental de la cordillera, es un aspecto relacionado con las características topográficas de su territorio, un declive oriental empinado opuesto a un declive occidental más suave ^[14]. Los glaciares de *montaña*, en gran proporción cuentan con un área de drenaje y zona de acumulación identificable (cuenca simple), algunos de ellos son glaciares colgados (Ice Apron) cuyos espesores delgados están adheridos a los flancos de montaña con mucha pendiente. Las características frontales de los *glaciares de montaña* son en la mayoría de los casos irregulares (abiertos), su perfil longitudinal presenta variaciones de pendiente dentro del cuerpo glaciar de tipo cascada en mayor grado. En cuanto al *tipo de alimentación*, principalmente es por acumulación de nieve y mínimamente por avalanchas. Los *glaciares de valle* son cuerpos que se extienden a lo largo de cuencas de tipo simple y compuestas, en ambos casos alimentan a una misma lengua o frente que se prolonga. Como consecuencia el total de sus frentes son confinados, hacia un canal de drenaje. El *perfil longitudinal* predominante es de tipo cascada y al igual que los *glaciares de montaña* tienen morrenas laterales y lateral/terminal principalmente, el tipo de alimentación es por nieve. Los *glaciares cubiertos* o también denominados por algunos autores como “*debris covered glacier*”, corresponden a un piso morfoclimático glaciar, inactivos y de pendientes más suaves ^[7], fueron clasificados como cuerpos remanentes, desconectados de su área de acumulación que por lo general fueron abandonados por un glaciar en retroceso, sin frentes definidos, con un gran porcentaje de cobertura de escombros sobre su superficie, distribuidos en su zona de ablación.

Comparando la superficie glaciar registrada en la década de 1970 ^[3] y los resultados del inventario actual, La Cordillera Blanca ha perdido aproximadamente el 27% (195.75 Km²) de su área glaciar total. Esta evolución ha significado la desaparición de glaciares, la retracción progresiva de sus frentes y en algunos casos su fragmentación (Gráfico 01).

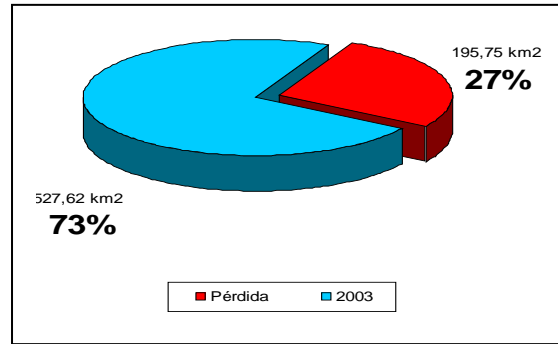


Gráfico 1. Superficie glaciaria en el 2003 en relación al Inventario de los años 1970.

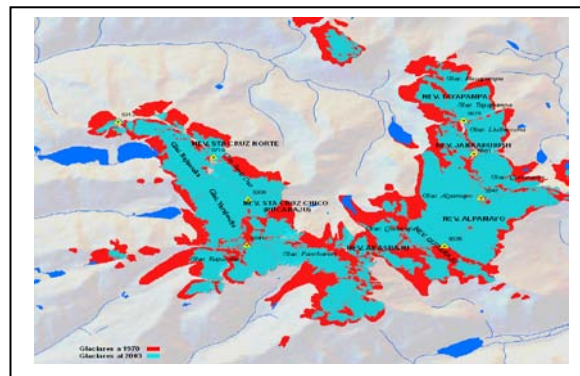


Figura 4. Dinámica de los glaciares de los años de 1970 y 2003 (Vista parcial del sistema glaciar Santa Cruz)

Los procesos de retracción de los frentes glaciares en la Cordillera Blanca han implicado cambios muy drásticos en la geometría de los glaciares, al igual que en otras cordilleras tropicales [15]. El retroceso de la lengua glaciar ha transformado antiguos glaciares de valle a glaciares de montaña, y en algunos casos ha dado lugar a glaciares cubiertos desconectados, como se muestra en la Figura 4.

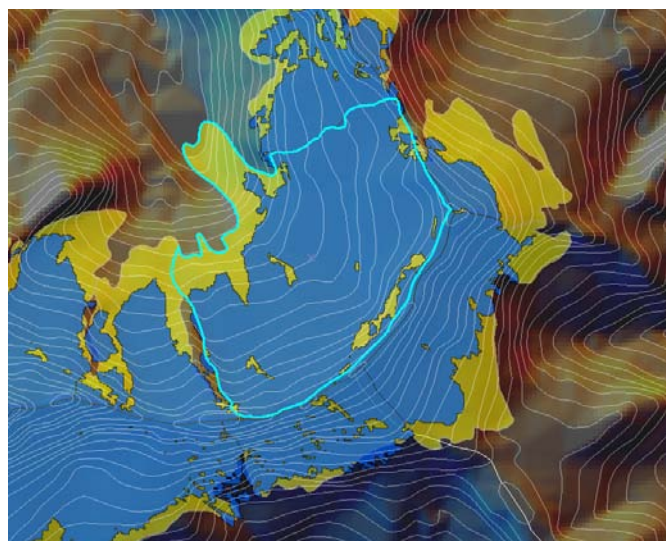


Figura 5. Retracción de un Glaciar de Valle en el sistema de montañas Hualcan (código: 1D371GGAA2) a un Glaciar de Montaña (codigo GLIMS: G282589E9266S)

La recesión de los glaciares es un proceso generalizado para la cordillera, es así que la altitud mínima de los frentes glaciares se encuentra en niveles cada vez más elevados, siendo significativo el incremento de los glaciares cuyas altitudes mínimas se localizan en los rangos de los 5,001 a 5,500 msnm. (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución de los glaciares según rangos de altitud mínima y por inventario.

Rangos de Altitud Mínima (msnm)	Inventario 1970 %	Inventario 2003 %
4,000 - 4,500	7	2
4,501 - 5,000	85	61
5,001 - 5,500	8	36
5,501 - 6000	0	1
Total	100	100

Mientras el área glaciár se ha reducido, el número de glaciares se ha incrementado debido a un proceso de fragmentación. Este proceso es parte de la dinámica que vienen experimentando los glaciares y se produce como consecuencia de una inicial separación de los cuerpos glaciares principales para formar otros cuerpos independientes y la progresiva reducción o adelgazamiento de su espesor, proceso más intenso en glaciares pequeños^[16]. En La Cordillera Blanca, éste fenómeno afectó en mayor proporción a los glaciares que en el inventario de los años 1970 alcanzaban una superficie menor a los 5 Km².

Tabla 3. Glaciares del inventario del 1970, según rangos de superficie y proceso de fragmentación observado al 2003.

Rangos de superficie (Km ²)	Nº Fragmentos					Total Glaciares
	2	3	4	5	6	
<1	55	7				62
1.1 - 5	31	6	4		1	42
5.1 -10	7					7
>10	1					1
Total	94	13	4	0	1	112

4. Conclusiones

Finalmente en el periodo evaluado (2003) en la Cordillera Blanca se ha registrado 755 glaciares con una superficie total de 527.62 Km², siendo la cuenca del río Santa la que concentra el 68% de esta superficie y el 73% del número total de glaciares.

Los glaciares de tipo montaña se hallan en flancos escarpados y cumbres empinadas, se refugian en laderas orientadas al Sur y Sur-Este. Los glaciares de tipo valle se desplazan sobre cuencas simples y compuestas, alimentando a una misma lengua que se prolonga hacia un frente definido, con pendientes que van desde suaves a muy escarpadas y una orientación predominante Nor-Oeste, Oeste y Sur-Oeste; y mientras que los glaciares cubiertos total o parcialmente por escombros, se localizan en topografías de pendientes muy suaves con orientación predominante Norte, Nor-Este a Este.

En las 3 últimas décadas La Cordillera Blanca ha experimentado intensa dinámica y procesos físicos (recesión, fragmentación, extinción de glaciares) que han conducido a la pérdida progresiva de su superficie glaciár en el orden del 27% (195.75 km²). Siendo los glaciares pequeños (menores a 1 Km²) los que han mostrado mayor dinamismo en su estructura, sus características morfométricas y su permanencia en los últimos 33 años, y por

ende han sido los más vulnerables y continúan siendo los mejores indicadores de la sensibilidad de la Cordillera Blanca a la variabilidad climática.

Igualmente, los procesos de fragmentación afectaron a glaciares, que en la década del 70 alcanzaban una superficie menor a los 5 Km². De otro lado, procesos intensos de ablación y retracción provocaron la desaparición de 141 glaciares de montaña ubicados principalmente en la cuenca del río Santa.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la Universidad de OHIO de EEUU y el IRD (L'Institut de recherche pour le développement de Francia), por la proporción de imágenes de satélite ASTER y SPOT-5, quienes hicieron posible este trabajo de investigación, y al proyecto GLIMS por su asesoría.

Referencias

- [1] Hans Kinzl and Erwin Schneider. (1950). Cordillera Blanca (Perú). Universitäts-Verlagwagner. Innsbruck. 167p.
- [2] Georg Kaser and Henry Osmaston. (2002). Tropical Glaciers. International Hydrology Series. UNESCO. 203 p.
- [3] Ames, Alcides (1989). Inventario de Glaciares del Perú. 1era Parte. Cordilleras: Blanca, Huallanca, Huayhuash, Raura, La Viuda, Huagoruncho, Central, Huaytapallana, y Chonta.
- [4] Georges, Christian (2004). 20th-Century Glaciar Fluctuation in the tropical Cordillera Blanca, Perú. *Artic, Antarctic, and Alpine Research*, v. 36, n. 1, p. 100-107, 2004.
- [5] Racoviteanu, Andina. Decadal Changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Perú, derived from Spot 5 satellite image and photography. *Journal of Glaciology*, v. 54, n. 186, p. 499-510, 2008.
- [6] W. Silverio, J-M. Jaquet (2005). *Remote Sensing of Environment* 95, p. 342-350.
- [7] Úbeda, J., 2007. Caracterización Geomorfológica del sector septentrional de la Zona Volcánica Central de los Andes Centrales. Planteamiento de un caso de estudio: el sistema glaciar del complejo volcánico Nevado Coropuna. Trabajo de investigación para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados, Universidad Complutense de Madrid, Madrid (España), 312 p.
- [8] Andreas Käab, Bill Manley, Frank Paul, Bruce Raup. GLIMS Algorithm document. <http://www.geo.unizh.ch/~kaeaeb/glims/algor.html>.
- [9] R.W. Sidjak and R.D Wheate. Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data. *Int. J. Remote Sensing*, 1999, v. 20, n. 2, p. 273-284.
- [10] Racoviteanu, Adina (2008). Decadal changes in glaciar parameters in the Cordillera Blanca, Perú, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, Vol. 54, No. 186.
- [11] B. Raup, A.Racoviteanu, S. Jodha, S. Khalsa, C. Helm, R. Armstrong, Y. Arnoud. The GLIMS geospatial glaciar database: A new toll for studyng glaciar change. *Elsevier. Global and Planetary Change* 56 (2007) p.101-110.
- [12] Ministerio de Agricultura, INRENA. (2007). Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Perú. Memoria descriptiva. 29p.
- [13] B. Raup, S. Jodha (2007). Glims Analysis Tutorial. GLIMS.
- [14] Ames, Alcides y Francou, Bernard. (1995). Cordillera Blanca. Glaciares en la Historia. *Bull. Inst. Fr. Études andines*. 24(1). p. 37-64.
- [15] Comunidad Andina (2007). ¿El fin de las cumbres nevadas?. Glaciares y cambio climático en la Comunidad Andina. 103p.
- [16] A. Kulkarni, I.M. Bahuguna, B.P. Rathore, S.K. Singh, S.S. Randhawa, R.K. Sood, S. Dhar. (2007). Glaciar retreta in Himalaya using Indian Remote Sensing Satellite Data. *Current Science*, v. 92, n. 1. 10. p. 69-74.