

Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá - Colombia, 1986-2007*

Glacier retreat in the Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá - Colombia, 1986-2007

Germán Herrera**
Jorge Ruiz**

Resumen

En el presente artículo, se examinó el retroceso del glaciar tropical en la Sierra Nevada del Cocuy, al noreste de los Andes colombianos, mediante la utilización de tres imágenes de satélite: *LANDSAT, TM* y *ETM+*, órbita 7 fila 56, adquiridas en enero de 1986, 2003 y 2007, aunque en esta época del año la probabilidad de detectar nieve en lugar de hielo es reducida. La imagen *LANDSAT 7 ETM+*, para 2007, fue restaurada en *ADOBE PHOTOSHOP* usando la metodología del llenado de huecos: este procedimiento llena los faltantes de información con las celdas al norte y al sur del píxel. Las tres imágenes de satélite fueron utilizadas para determinar el área glaciar, manteniendo constante la resolución espectral y espacial. El área de nieve se extrajo, mediante el uso de clasificación no supervisada de las bandas 5, 4 y 3, produciendo una firma espectral muy característica en *ERDAS IMAGINE v. 9.0*. Adicionalmente, se calculó un índice usando la banda 4 sobre la banda 5 (es decir, infrarrojo cercano sobre infrarrojo medio); dicho cálculo fue efectuado en *IDRISI*. Para los valores anteriores, este índice hace evidente la presencia de nieve y hielo. Los resultados de la clasificación no supervisada se compararon contra los del índice y, si eran apropiados, recodificados a la clase de nieve; el mismo procedimiento se

* La versión inglesa de este artículo fue publicada en: Ruiz, J. and Herrera, G. 2008 Tropical glacier retreat in the Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá, Colombia, 1986-2007. *Papers of Applied Geography Conferences* 31:52-58.

** Programa de Estudios de Posgrado en Geografía, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC e Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC.
Correo: ruizlmc7@gmail.com

corrió para cada una de las tres imágenes. La proporción de retroceso del glaciar fue más del doble para los cuatro años, 2003-2007, comparados con el lapso de 1986-2003. Así como prácticamente todos aquellos analizados, este estudio exhibió una tendencia lineal en la pérdida del glaciar; si la tendencia para el período 2003-2007 continúa, el glaciar desaparecería en aproximadamente 20 años. El retroceso más dramático se ha observado sobre el costado occidental de las pendientes, aunque también es intrigante la diferencia considerable en el área del glaciar de 1986, comparada con los otros estudios. El retroceso glaciar tiene varias implicaciones bajo el prisma de la geografía aplicada. De una parte, es probable que la fusión del glaciar aumente el riesgo de aludes, como se ha observado en Huascaran, Perú. Por otro lado, los lagos se harán más comunes y, a la larga, la pérdida de este depósito probablemente impactará los asentamientos humanos e incluso las prácticas agrícolas a más baja altura.

Palabras clave: Calentamiento global, Colombia, glaciares, Sierra Nevada del Cocuy, teledetección.

Abstract

We examined tropical glacier retreat in the Sierra Nevada del Cocuy, on the northeastern Colombian Andes. We used three LANDSAT TM and ETM+ satellite images, Path 7 row 56, acquired in January of 1986, 2003 and 2007. This time of the year the probability of detecting snow rather than ice is reduced. The LANDSAT 7 ETM+ for 2007 was restored in ADOBE PHOTOSHOP using the gap fill methodology. This procedure fills in the missing information with cells north and south of the pixel. Snow area was extracted using an unsupervised classification of bands 5, 4, and 3, resulting in a very characteristic spectral signature in ERDAS IMAGINE v. 9.0. Additionally, an index was calculated using band 4 over band 5 (*i.e.*, the near infrared over the middle infrared). Index calculation was done in IDRISI. In values above one, this index makes evident the presence of snow and ice. The results of the unsupervised classification were compared against those of the index and, if appropriate, recoded to the ice class. The same procedure was run for each of the three images. The rate of glacier retreat more than doubled in the four years, 2003-2007, compared to 1986-2003. This study, as well as practically all in the set, exhibited a linear trend in glacier loss. Should the 2003-2007 trend continue, the glacier would disappear in approximately 20 years. The most dramatic retreat has been observed on the gentle western slopes. Also intriguing is the considerable difference in glacier area around 1986, compared to other studies. Glacier retreat has several implications under the prism of applied geography. From one end, glacier melting is likely to increase the risk of avalanches, such as it has been observed in Huascaran, Peru. On the other hand, lakes will become more common and on the long run, the loss of this reservoir is likely to impact human settlements and even agricultural practices at lower elevations.

Key words: Colombia, glaciers, global warming, Sierra Nevada del Cocuy, remote sensing.

1. Introducción

De todos los cambios atribuibles a la variación climática, el encogimiento del glaciar tropical está, quizás, entre los más dramáticos; en efecto, las líneas de equilibrio en estos glaciares son muy sensitivas al cambio de la temperatura (Mark, 2008; Kaser and Georges, 1999). Los glaciares tropicales son una rareza y Colombia es afortunada al tener seis remanentes con área glaciaria total calculada al 2003, en cerca de 55 km² (Ceballos *et al.*, 2006).

El glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy, localizado al noreste del país es, de lejos, el más extenso. Le sigue en tamaño la *Sierra Nevada de Santa Marta*, con el pico más alto de Colombia pero, también, el

macizo más alto en la tierra enfrentado al océano (Ruiz, 1991). Esta sierra tiene una forma triangular y está localizada al norte del país, bordeada por el mar Caribe (Figura 1). Los cuatro glaciares remanentes se encuentran sobre volcanes activos: *Nevaldo del Ruiz*, famoso por el desastre de 1985, y el *Nevaldo Santa Isabel*. Los rangos de elevación van desde los 5.110 m, para el *Nevaldo Santa Isabel*, hasta el *Pico Bolívar* con 5.777 m, sobre la *Sierra Nevada de Santa Marta*.

Unos pocos artículos han sido publicados sobre la dinámica glaciaria en Colombia, particularmente para el *Nevaldo del Huila* y la *Sierra Nevada de Santa Marta* donde, más que su remota localización, es el malestar político el principal obstáculo para el trabajo de campo.

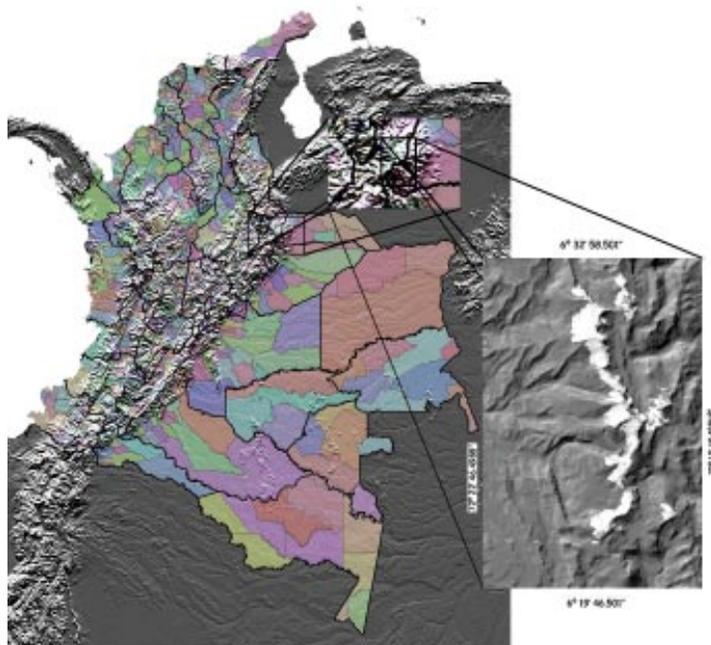


Figura 1. Localización de la Sierra Nevada del Cocuy en Boyacá y Arauca, Colombia

Aquí, se presenta un estudio de 20 años (1986-2007), el cual argumenta que el retroceso glaciar en la *Sierra Nevada del Cocuy* ha acelerado su rata anual más del doble y desaparecería si continúa en la proporción mostrada durante los últimos cuatro años. Además, se estima que el glaciar es considerablemente más pequeño que lo previamente informado por varios estudios; así, el coeficiente de la regresión lineal sugiere que el glaciar desaparecería completamente para el 2075, bajo el supuesto que continúe la tendencia para el periodo 1986-2007.

La *Sierra Nevada del Cocuy* está localizada al norte de la cordillera oriental, en el noreste de los departamentos de Boyacá y Arauca, grandes divisiones político administrativas en Colombia, aproximadamente centrada a los $6^{\circ}27'$ latitud norte y los $72^{\circ}17'$ longitud oeste (Figura 1). La Sierra es parte de un parque nacional de 3.000 km², creado en 1970.

El área del glaciar, para el 2007, se ha estimado en 17.2 km², corriendo en una dirección sur-norte con 22 crestas nevadas a lo largo de un corredor de 22 km. En 1985, Florez (1991) reportó dos pequeños glaciares 10 km al norte de la sierra principal: *Alto Peña Colorada* y *Sierra de la Nievécita*, ahora extintos.

Muchos de los picos más altos se encuentran en el departamento de *Boyacá*, en tanto que la parte sur se ubica sobre el departamento de *Arauca*. Este es el glaciar continuo más largo de

Suramérica al norte del Ecuador; más grande que los contiguos de Mesoamérica y EUA. La mayor elevación es el pico Ritacuba Blanco, que se encuentra a 5.330 m de altura. Florez (1991), estimó que hace aproximadamente 35.000 años, la masa de hielo comenzó a formarse a 2.700 msnm y, en algún momento después, hace 1.850 años, los glaciares empezaron a encogerse desde los bordes externos de las morrenas del Neoglacial (Van Der Hammen *et al.*, 1980).

2. Materiales y Métodos

Cuatro imágenes de satélite se tomaron como fuente para la observación del glaciar. Tres imágenes *LANDSAT, Path 7 Row 56*, todas de la estación seca en enero de 1986, 2003 y 2007, sin cobertura de nubes sobre el glaciar. En esta época del año la probabilidad de detectar nieve en lugar de hielo es reducida. La imagen *LANDSAT 7 ETM+*, para 2007, fue restaurada en *ADOBE PHOTOSHOP* usando la metodología del llenado de huecos. Este procedimiento llena los faltantes de información con las celdas al norte y al sur del píxel. Estas tres imágenes fueron utilizadas para determinar el área glaciar, manteniendo constante la resolución espectral y espacial.

Una cuarta imagen, *SPOT 5*, del 2007, fue usada para medir la elevación de la línea de nieve con mayor precisión. Datos digitales de elevación de 90 m de resolución, producidos por la NASA, fueron obtenidos del SRTM (CGIAR, 2008). El objetivo del *DEM*, fue ayudar

en el seguimiento de la línea de nieve, la cual puede cambiar con respecto a la orientación de la pendiente. Las imágenes *LANDSAT* de 1986 y 2007, fueron georreferenciadas en *ERDAS IMAGINE 9.0* a la imagen del 2003, usando el Sistema de Coordenadas *UTM*, zona 18 norte y el Datum *WGS 84*. Así mismo, se usó una combinación de fotointerpretación y procesamiento digital para la estimación del área glaciar.

Las áreas de nieve fueron extraídas mediante el uso de un método de clasificación no supervisado, sobre una combinación de las bandas 543, resultando una *muy característica firma espectral* en *ERDAS IMAGINE v. 9.0*. Adicionalmente, se calculó un índice con el uso de la banda 4 sobre la banda 5, *i.e.*, el infrarrojo cercano sobre el infrarrojo medio. El cálculo del índice se efectuó en *IDRISI*. Este índice hace evidente la presencia de nieve y hielo en valores por encima de 1.

Los resultados de la clasificación no supervisada fueron comparados contra aquellos del índice y, si eran apropiados, recodificados como nieve. El mismo procedimiento fue efectuado para cada una de las tres imágenes. En términos absolutos, tales como la pérdida de área anual, medida en km² por año, como es usada por Ceballos y otros colegas (2006), puede estar desencaminada al hacer comparaciones de glaciares de tamaño variable, como es el caso colombiano. Consecuentemente, la rata de deforestación propuesta, *r*, por Dirzo

y García (1990), fue usada para medir el retroceso glaciar:

$$r = 1 - [1 - ((A1 - A2)/A1)]^{1/t}$$

En donde:

r es la rata anual de encogimiento glaciar

A1 es el área glaciar en el tiempo 1

A2 es el área glaciar en el tiempo 2

t es el número de años entre las dos observaciones.

El área glaciar para cada ventana, fue introducida al *SPSS v. 12*, y se calcularon curvas de regresión, linear, logarítmica, logística, crecimiento y exponencial, con un nivel *alfa* de significancia de L 5%, para aceptar la regresión. El siguiente paso, fue determinar cuándo podría extinguirse el glaciar, sobre la base de la curva de regresión seleccionada. Finalmente, los resultados obtenidos fueron comparados con las pocas investigaciones sobre áreas glaciares llevadas a cabo en Colombia.

3. Resultados

La rata de retroceso glaciar es más del doble, en los cuatro últimos años, 2003-2007 comparada con 1986-2003 (Tabla 1). Este estudio, como prácticamente todos en el grupo, exhibió una tendencia lineal en la pérdida glaciar. De continuar esta tendencia, el glaciar desaparecería en aproximadamente 20 años. El retroceso más dramático se observa sobre las pendientes suaves al occidente (Figura 2). También es intrigante la considerable diferencia entre el área glaciar de 1986,

comparada con los resultados de Florez (1991) y Gillen *et al.* (2004), (Figura 2). El glaciar estimado de este estudio es 27% menos, y 12% menos que el reportado por Ceballos y otros colegas (2006).

De los cinco estudios, el resultado de éste es únicamente sobrepasado en términos de estimación de área glaciar y rata de retroceso. La reducida área glaciar tiene un profundo efecto sobre

la constante y el coeficiente de la línea de regresión de mínimos cuadrados. Entonces, el tiempo para que el glaciar se extinga, de acuerdo con este estudio, es bastante conservador; solamente los datos de Florez (1991) proporcionan un gran lapso de tiempo para que desaparezca el glaciar (Tabla2). A equivalente latitud, se encontró que la línea de hielo tiende a estar más alta sobre el oeste, que sobre las pendientes al este.

Tabla 1. Área glaciar en hectáreas, según estudios seleccionados, en el área de la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá - Colombia (1955-2007) y Rata anual de Encogimiento Glaciar, *r*

Study	Periodo de tiempo	Área inicial en ha	Área final en ha	t	r
Este estudio	1986-2003	2.813	2.079	17	1,76
Este estudio	2003-2007	2.079	1.715	4	4,70
Florez, 1991	1978-1986	3.833	3.570	7	1,01
Morris <i>et al.</i> , 2006	1959-1973	3.912	2.800	14	2,36
Morris <i>et al.</i> , 2006	1973-1999	2.800	2.039	26	1,21
Morris <i>et al.</i> , 2006	1999-2003	2.039	1.630	4	5,44
Ceballos <i>et al.</i> , 2006	1955-1986	3.890	3.140	31	0,69
Ceballos <i>et al.</i> , 2006	1986-1994	3.140	2.370	8	3,46
Ceballos <i>et al.</i> , 2006	1994-2003	2.370	1.980	9	1,98
Guillen <i>et al.</i> , 2004	1960-1986	4.888	3.565	18	1,74
Guillen <i>et al.</i> , 2004	1986-2003	3.565	2.452	17	2,18

COLOR

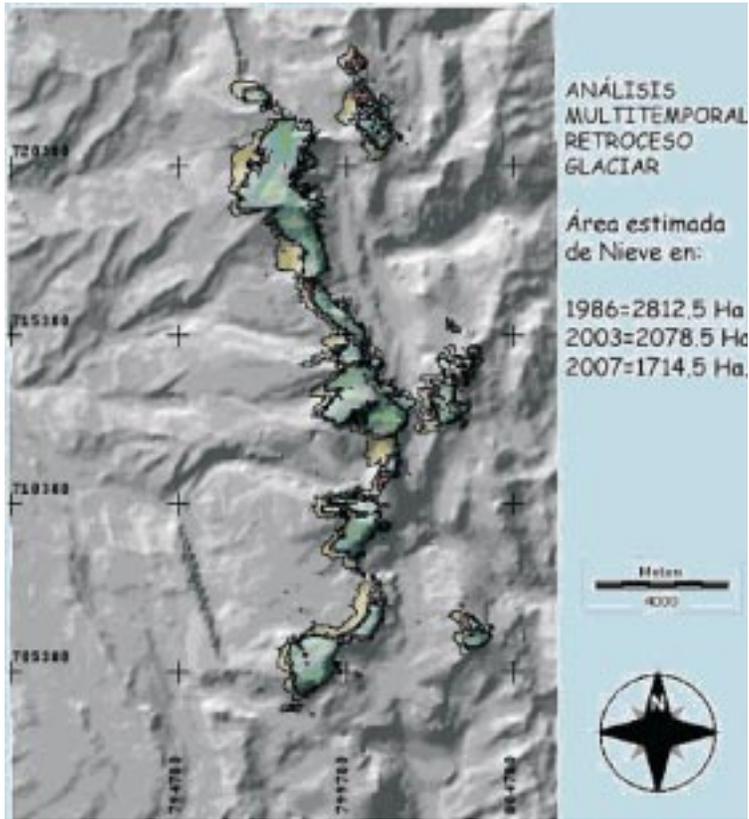


Figura 2. Retroceso Glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia 1986-2003 (en amarillo 1986; en rojo 2003; en verde 2007)

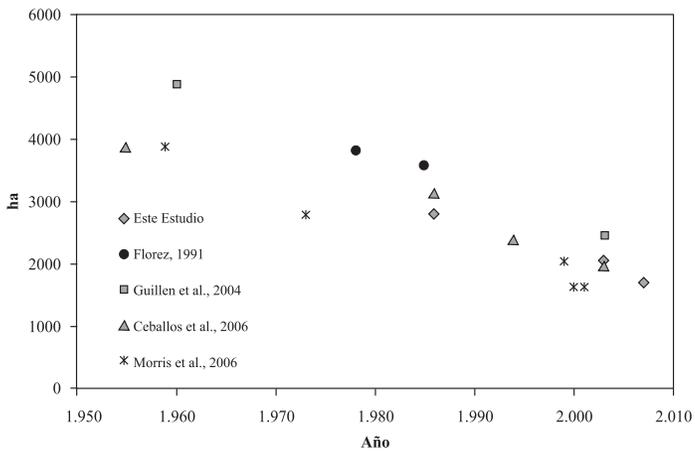


Figura 3. Encogimiento Glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, de acuerdo con cinco estudios

Tabla 2. Regresión Lineal Constante y Coeficiente; estimación del año cuando desaparecería el glaciar

Estudio	Regresión lineal		Fecha inicial + (Constante/-coeficiente) = Fecha estimada cuando desaparecería el glaciar
	Constante	Coeficiente	
Este estudio	4.414	-49,54	$1.986 + 89 = 2.075$
Ceballos <i>et al.</i> , 2006	4.034	-39,00	$1.955 + 103 = 2.058$
Morris <i>et al.</i> , 2006	3.993	-49,12	$1.959 + 81 = 2.040$
Guillen <i>et al.</i> , 2004	5.252	-56,42	$1.960 + 93 = 2.053$
Florez, 1991	4.734	37,57	$1.978 + 126 = 2.104$

4. Discusión

La rata de pérdida glaciar obtenida en este estudio para el periodo más reciente, 2003-2007, es extremadamente preocupante, en tanto predice la extinción del glaciar para la próxima generación. El escenario de esta reducida área, así como una levemente alta rata de retroceso glaciar, fue estimado por Morris y otros colegas (2006), en donde aparece que la rata de pérdida de nieve tiene una tendencia positiva; es decir, en general, las observaciones recientes parecen ser mayores que las históricas. Si se considera la rata observada para 1986-2007, el glaciar existiría hasta 2075, pero esto parece ser improbable; así, surgiría la pregunta, acerca de la validez de una línea para predecir el comportamiento del glaciar. Un glaciar podría alcanzar un umbral, después del cual la retirada podría ser una curva en lugar de una línea.

Es muy deseable acortar el espacio de tiempo de las observaciones para que no

se diluyan las tendencias en los largos periodos de observación, recientes e históricos. Este es, por ejemplo, el caso de Ceballos y otros colegas (2006), con un periodo de tiempo de 31 años entre sus dos observaciones. Una posible solución a este aspecto, sería obtener las imágenes de satélite desclasificadas por el Servicio Geológico Norteamericano, particularmente para los años sesenta y setenta.

El estudio de los glaciares colombianos no es una tarea fácil. Sería deseable interpretar la variación de los datos de retroceso y establecer causas y efectos. Así, serían contestadas muchas preguntas. ¿Por qué el retroceso del glaciar es en el Nevado del Huila, un volcán activo; es considerablemente bajo, en comparación a lo observado para la Sierra de Nevada de Santa Marta y la Sierra Nevada del Cocuy? ¿Y en las dos sierras, por qué Santa Marta exhibe una tercera rata de retirada más alta, comparada con el Cocuy? ¿El aumento de la temperatura parece ser

un factor contribuyente, con un aumento de aproximadamente un grado en los últimos 25 años; pero, es esto suficiente? ¿Qué papel juega la humedad y el cambio de cobertura de la tierra? En el caso del de Nevado Huila, la cobertura circundante del bosque podría jugar un efecto amortiguador, no presente en los otros glaciares, que igual disminuye el impacto de la actividad volcánica en la fusión del glaciar.

El retroceso del glaciar tiene varias implicaciones, bajo el prisma de la geografía aplicada. De un lado, el deshielo probablemente va a aumentar el riesgo de avalanchas, tal y como se ha documentado para el Huscarán, en Perú (Kaser y Osmaston, 2002). De otro lado, las lagunas van a ser más comunes y, a largo plazo, la pérdida de esta reserva hídrica muy probablemente va a modificar las prácticas agrícolas y

asentamientos humanos en pisos térmicos inferiores.

5. Agradecimientos

Agradecemos los comentarios a una versión anterior, hechos por la Dra. Lisa Harrington del Departamento de Geografía de la *Kansas State University*, Manhattan, Kansas, EUA, así como de otros dos pares evaluadores anónimos. Esta es una publicación oficial del grupo de investigación Caldas, registrado en COLCIENCIAS como COL0021613. Agradecemos al Instituto Geográfico Agustín Codazzi, www.igac.gov.co/, por facilitarnos la imagen *SPOT* del 2007; al proyecto *GLCF* de la *Universidad de Maryland*, por facilitarnos las imágenes *Landsat*, <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/> y, finalmente, a la organización CGIAR, por facilitarnos el Modelo Digital de Elevación, <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

Literatura citada

- Ceballos, J. L.; Euscategui, C.; Ramirez, J.; Cañon, M.; Huggel, C.; Haerberli, W. y Machguth, H. 2006. *Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia*. *Annals of Glaciology*, 43:194-201.
- CGIAR. 2008. <http://srtm.csi.cgiar.org/>. Se tuvo acceso en abril del 2008.
- Dirzo, R. y García, M. C. 1990. *Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical area in shoutheast Mexico*. *Conservation Biology*, 6:84-90.
- Florez, A. 1991. La Sierra Nevada del Cocuy, Chita o Güicán. *EPG-Geografía*, 1(2)7-18.
- Guillen, J. J.; Santiago, J. A. y Soria, M. V. 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 para el periodo 1960-2003. Bogotá, D.C.: *Graduate Dissertation*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas-IGAC.

Kaser, G y Osmaston, H. 2002. *Tropical Glaciers*. New York, NY: Cambridge University Press.

Kaser, G. y Georges, C. 1999. *On the mass balance of low latitude glaciers wit particular consideration of the Peruvian Cordillera Blanca*. *Geographical Analysis*, 81A(4):643-651.

Mark, B. G. 2008. *Tracing tropical Andean glaciers over space and time: Some lessons and transdisciplinary implications*. *Global and Planetary Change*, 60:101-114.

Morris, J. N.; Poole, A. J. y Klein, A. G. 2006. *Retreat of Tropical Glaciers in Colombia and Venezuela from 1984 to 2004 as Measured from ASTER and Landsat Images*. In: *Proceedings of the 63rd Eastern Snow Conference*. Newark, Delaware: 180-191.

Ruiz, J. 1991. *The roof of Colombia*. *The Alpine Journal*, 95(339): 150-156.

Van Der Hammen, T.; Barelds, J.; De Jong, H. y De Veer, A. 1980. *Glacial sequece and environmental history in the Sierra Nevada del Cocuy (Colombia)*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 32:247-340.

Fecha de recepción: 28 de julio de 2008
Fecha de aprobación: 2 de septiembre de 2008