

# INCIDENCIA DE LOS EVENTOS EL NIÑO Y LA NIÑA EN EL COMPORTAMIENTO DE GLACIARES TROPICALES EN PERÚ

## INCIDENCE OF EVENTS EL NIÑO AND LA NIÑA IN THE BEHAVIOR OF TROPICAL GLACIERS IN PERU

GILBERTO MEDINA<sup>1</sup> Y ABEL MEJÍA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA, TINGO MARÍA 156

<sup>2</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA, LIMA 12

### RESUMEN

Los eventos El Niño y La Niña en el Océano Pacífico tropical se dan de manera periódica y tienen una clara incidencia en el crecimiento y mantenimiento de la superficie glaciar de los nevados. Aplicando la técnica multifractal, el método de la caja de contar, la diferencia normalizada del índice de nieve NDSI y la relación de bandas de imágenes satelitales 3/5 se analizó el comportamiento de la superficie glaciar de dos nevados tropicales, el Huandoy y el Pastoruri, en la Cordillera Blanca de Perú, en años en que se presentaron los eventos El Niño y La Niña. Las modernas técnicas multifractales devinieron muy versátiles, prácticas y sensibles para mostrar la incidencia de los eventos El Niño y La Niña en el espectro multifractal y para estimar la superficie glaciar. El Huandoy y el Pastoruri disminuyeron aproximadamente un 10% de su área glaciar en un periodo de 22 años. La estimación de la superficie glaciar por métodos convencionales y multifractales resultó no significativa en un análisis como muestras relacionadas o pareadas, lo cual significa que es indistinto utilizar el SIG o multifractales para determinar el área glaciar. La dimensión  $D_0$  para la superficie glaciar fue de 1,8.

**Descriptores:** *El Niño y La Niña, cambio climático, retroceso glaciar, NDSI, relación de bandas 3/5, multifractales*

### ABSTRACT

*The events El Niño and La Niña in the tropical Pacific Ocean occur periodically over time and have a clear incidence on growth and maintenance of the glacier surface of snow-capped mountains. The behaviour of the glacier surfaces of two snowy tropics, the Pastoruri and the Huandoy, located in the Cordillera Blanca of Perú were studied in the years when the events El Niño and La Niña occurred. This study was done applying a multifractal technique, the method of box counting, the normalized difference snow index NDSI and the relationship of bands of satellital images 3/5. Multifractals modern techniques became very versatile, practical and sensitive in showing the impact of El Niño and La Niña in the multifractal spectral and for the estimation of glacier surface. The Huandoy and Pastoruri decrease in average glacier surface was 10% in the last 22 years. The estimation of glacier surface for the conventional or multifractal methods was not significantly different in analysis such as related samples, which means that there is no distinction when using the SIG or multifractals for determining the glacier area. The dimension  $D_0$  for the glacier surface was 1,8.*

**Keywords:** *El Niño and La Niña, climate change, glacier retreat, NDSI, ratio of bands 3/5, multifractals*

## INTRODUCCIÓN

Los cambios en la superficie de los glaciares son ampliamente reconocidos como los más confiables y fáciles de observar, y sirven de indicadores del cambio climático terrestre por ser particularmente sensibles a las variaciones en el clima [1].

Además, el uso de los recursos de agua glaciario tiene una importancia social y económica esencial en el Perú. En los Andes, el agua glaciario sostiene las actividades económicas, que van desde la crianza tradicional de truchas y cultivos hasta la atracción turística ligada al desarrollo local [2].

El mayor porcentaje de los glaciares tropicales del mundo está en la Cordillera de los Andes: el 71% en el Perú, el 20% en Bolivia, el 4% en Ecuador y otro 4% en Colombia [3].

Las técnicas multifractales permiten estimar la superficie de elementos fractales en forma probabilística y compararla con la obtenida por el sistema convencional (SIG).

En el presente trabajo se utilizaron imágenes satelitales de los años 1987, 1997, 2009 (El Niño), 1998 y 2000 (La Niña) y como año normal 1990. La resolución es 30 metros por píxel, y el método empleado fue el de *box counting* o método de la caja de contar, empleado para cuantificar los píxeles de la superficie glaciario. Asimismo, se usó el Índice de Diferencia de Nieve Normalizada (NDSI) y el ratio imagen o relación de bandas 3/5 para delimitar la superficie glaciario y discriminar la nieve de la posible presencia de nubes, roca o suelo.

El objetivo general de la investigación es la cuantificación de la superficie glaciario por métodos multifractales y convencionales en años en que se presentaron los eventos El Niño y La Niña en dos nevados de Perú: el Huandoy y el Pastoruri.

## MÉTODO EXPERIMENTAL

Se usaron imágenes correspondientes al Mapeador Temático Landsat TM5. Las imágenes Landsat son multiespectrales, compuestas de siete bandas. Usamos imágenes de los años 1987, 1988, 1990, 1997, 2000 y 2009, años en los que se produjo los

eventos El Niño (1987, 1997 y 2009), y La Niña (1988 y 2000), y 1990 como año normal.

Tabla 1: El Niño y La Niña desde 1950 al 2009.

El Niño			La Niña		
Débil	Mod	Fuerte	Débil	Mod	Fuerte
1951	1986	1957	1950	1954	1955
1963	1987	1965	1956	1964	1973
1968	1994	1972	1962	1970	1975
1969	2002	1982	1967	1998	1988
1976		1991	1971	1999	
1977		1997	1974	2007	
2004		2009	1984		
2006			1995		
			2000		

Fuente: Jan Null, CCM (disponible en <http://ggweather.com/enso/oni.htm>).

La siguiente figura muestra la ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña hasta el mes de marzo del 2010:

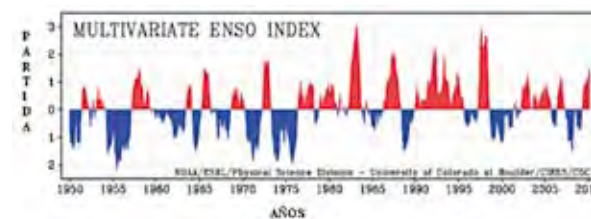


Figura 1: Años de ocurrencia de los eventos El Niño y la Niña en el Pacífico central-occidental.

Fuente: NOAA/ESRL/Physical Science Division, University of Colorado, disponible en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI/mei.html>, y corresponde al Niño del Pacífico central-occidental, conocido como El Niño 3,4, mientras que nuestra costa pertenece al Niño 1+2.

Las imágenes de satélite fueron obtenidas del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, Brasil), en <http://www.inpe.br/>, y corresponden a imágenes LANSAT TM5. La resolución espacial de 1 píxel equivale a 30 m.

Como se aprecia en la tabla 2, las imágenes pertenecen a la estación de invierno en Perú, entre fines de mayo a agosto. También se utilizaron registros históricos de temperatura mensual y precipitación de estaciones cercanas a los glaciares. Las coordenadas geográficas del glaciario Huandoy se

hallan entre  $-8^{\circ} 55' 57''$  y  $-9^{\circ} 3' 43''$  de Latitud Sur, y Longitud Oeste entre  $-77^{\circ} 43' 23''$  y  $-77^{\circ} 33' 34''$ . Las coordenadas geográficas del glaciar Pastoruri se hallan entre  $-9^{\circ} 53' 51''$  y  $-9^{\circ} 56' 54''$  de Latitud Sur, y Longitud oeste entre  $-77^{\circ} 13' 52''$  y  $-77^{\circ} 10' 12''$ .

Tabla 2: Fuente de las imágenes satelitales.

Nevado Huandoy			Nevado Pastoruri		
Ruta	Fuente	Fecha	Ruta	Fuente	Fecha
8/66	I N P E -Brasil	31-05-1987	8/67	I N P E -Brasil	31-05-1987
8/66	I N P E -Brasil	06-09-1988	8/67	I N P E -Brasil	17-05-1988
8/66	I N P E -Brasil	10-07-1990	8/67	I N P E -Brasil	10-07-1990
8/66	I N P E -Brasil	30-08-1997	8/67	I N P E -Brasil	27-06-1997
8/66	I N P E -Brasil	21-07-2000	8/67	I N P E -Brasil	21-7-2000
8/66	I N P E -Brasil	30-07-2009	8/67	I N P E -Brasil	28-6-2009

En el presente trabajo se utilizaron las bandas 2, 3 y 5 de los años indicados. Obtenidas las imágenes satelitales, se georreferenciaron con la carta nacional a escala 1:100 000 y adaptaron al formato WGS 84. Se combinó en tres bandas (RGB) y se cortó la imagen a una escala redonda; por ejemplo, 600x400 pixeles para el Huandoy y 300x200 pixeles para el Pastoruri. Luego se separaron las bandas (banda 2 (b2), banda 3 (b3) y banda 5 (b5)) y se estimaron las características de la superficie glaciar, usando:

a) El NDSI (por sus siglas en inglés, Índice Normalizado de Diferencia de Nieve), comúnmente empleado para la detección de nieve. Este método ayuda a diferenciar entre cobertura de nubes, nieve o hielo [4].

El NDSI se halla tomando la diferencia normalizada de las bandas Landsat 2 y 5, empleando la siguiente ecuación:

$$NDSI = (b2 - b5) / (b2 + b5) \quad (1)$$

El NDSI está basado en la respuesta espectral particular de nieve con alta reflectancia en el espectro visible y el infrarrojo inferior.

b) El ratio imagen 3/5 es una simple razón entre las bandas Landsat 3 y 5. El ratio imagen 3/5 es un excelente indicador de nieve y hielo.

El más efectivo índice para el mapeo glaciar automatizado es el ratio imagen 3/5, y para discriminación de nieve o hielo, en regiones de sombras, tierra o roca. La razón de bandas 3/5 fue aplicada a escenas Landsat usando las bandas 3 (0,63–0,69  $\mu\text{m}$ ) y la banda 5 (1,55–1,75  $\mu\text{m}$ ):

$$\text{Ratio} = (b3) / (b5), \quad (2)$$

empleando el ratio imagen 3/5, por resultar mejor el perfil horizontal; binarizamos la imagen con el programa ImageJ, y en el programa Mass, especial para fractales, hallamos el espectro fractal. Exportamos la tabla a la hoja de cálculo y allí elaboramos las gráficas (a)  $\alpha$  vs  $f(\alpha)$  y (b)  $q$  vs  $Dq$ , determinando enseguida su dimensión fractal.

La ecuación básica de la teoría fractal expresa la relación entre el número y el tamaño de los objetos [5]:

$$N(\epsilon) \sim \epsilon^{-D_0}, \quad (3)$$

donde  $N(\epsilon)$  es el número de objetos,  $\epsilon$  es la escala, y  $D_0$  es la dimensión fractal. La técnica de la caja de contar se usa a menudo para estimar las propiedades a escalar y la dimensión fractal. El  $D_0$  de un conjunto (por ejemplo una imagen) logra, a través de la caja de contar, cubrir el conjunto con cajas de tamaño  $\epsilon$ , y contar el número de cajas ( $N(\epsilon)$ ) que contienen al menos algún pixel con medida en el contexto de la imagen, entonces:

$$D_0 = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\text{Log}N(\epsilon)}{\text{Log}(\epsilon)}. \quad (4)$$

La dimensión  $D_0$  representa la pendiente negativa de  $\log N(\epsilon)$  versus  $\log(\epsilon)$ .

Los fractales físicos son estadísticamente autosimilares solo en un rango definido de escalas.

En un sistema homogéneo, la probabilidad ( $P$ ) de una cantidad medida (unidad de medida) varía con la escala  $\epsilon$  como:

$$P(\epsilon) \sim \epsilon^D, \quad (5)$$

donde  $D$  es la dimensión fractal.

### Multifractales

Para sistemas heterogéneos o no uniformes, la probabilidad varía como:

$$P_i(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-\alpha_i}, \tag{6}$$

donde  $\alpha_i$  es el exponente de Lipschitz–Hölder o fuerza de singularidad. El parámetro  $\alpha_i$  cuantifica el grado de regularidad en la localización  $x_i$ . El número de cajas  $N(\alpha)$  donde la probabilidad  $P_i$  tiene una fuerte singularidad se encuentra a escala como:

$$N(\alpha) \sim \varepsilon^{-f(\alpha)}, \tag{7}$$

donde  $f(\alpha)$  puede ser considerada como la dimensión fractal generalizada del conjunto de cajas con singularidades  $\alpha$ . El exponente  $\alpha$  puede tomar valores del intervalo  $\alpha_{-\infty}, \alpha_{+\infty}$ , y  $f(\alpha)$ .

Los conjuntos multifractales también pueden ser caracterizados sobre la base de las dimensiones generalizadas del  $q^{th}$  momento ordenado de una distribución,  $D_q$ , definida como:

$$D_q = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left( \frac{1}{q-1} \frac{\log \mu(q, \varepsilon)}{\log(\varepsilon)} \right), \tag{8}$$

donde  $\mu(q, \varepsilon)$  es la función partición:

$$\mu(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} P_i^q(\varepsilon) \tag{9}$$

La dimensión generalizada  $D_q$  es una función monótona decreciente para todo real  $q$ s dentro del intervalo  $<-\infty, +\infty>$ . Las escalas de la función partición:

$$\mu(q, \varepsilon) \sim \varepsilon^{\tau(q)}, \tag{10}$$

donde  $\tau(q)$  es el exponente de correlación del  $q^{th}$ , momento ordenado definido como:

$$\tau(q) = (q-1)D_q. \tag{11}$$

La conexión entre los exponentes energía  $f(\alpha)$  (ecuación (7)) y  $\tau(q)$  (ecuación (10)) se hace vía la transformada de Legendre [6] :

$$f(\alpha(q)) = q\alpha(q) - \tau(q) \tag{12}$$

y

$$\alpha(q) = -\frac{d\tau(q)}{dq}. \tag{13}$$

$f(\alpha)$  es una función descendente cóncava con un máximo en  $q = 0$ . Cuando  $q$  toma los valores de  $\alpha = 0, 1$  o  $2$ , la ecuación (8) se reduce a:

$$D_0 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log(N(\varepsilon))}{\log(\varepsilon)},$$

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon) \log(\mu_i(\varepsilon))}{\log(\varepsilon)},$$

$$D_2 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log(C(\varepsilon))}{\log(\varepsilon)}, \tag{14}$$

respectivamente, con  $C(\varepsilon)$  siendo la función correlación.

Los valores  $D_0, D_1$  y  $D_2$  son conocidos como la dimensión capacidad, la dimensión entropía y la dimensión correlación, respectivamente. La dimensión capacidad provee información global (o promedio) acerca de un sistema. La dimensión entropía está relacionada, como su nombre lo indica, a la información de la entropía. La dimensión correlación  $D_2$  está ligada matemáticamente con la función correlación y calcula la correlación de medidas contenidas en una caja de tamaño  $\varepsilon$ . La relación entre  $D_0, D_1$ , y  $D_2$  es:

$$D_2 \leq D_1 \leq D_0, \tag{15}$$

donde la igualdad  $D_0=D_1=D_2$  ocurre solamente si el fractal es estadísticamente o exactamente autosimilar y homogéneo.

La distribución espacial de la concentración de nieve fue particionada en cajas de tamaño  $L$ . La medida normalizada  $\mu_i(q, L)$  fue calculada para valores de  $q$  que varía con pasos 0,1:

$$\mu_i(q, L) = \frac{P_i^q(L)}{\sum_{i=1}^{N(L)} P_i^q(L)} \tag{16}$$

donde  $P_i(L)$  es la fracción (o probabilidad) de contener nieve en cada  $i^{th}$  caja de tamaño  $L$ . El espectro multifractal fue calculado como:

$$\sum_{i=1}^{N(L)} \mu_i(q, L) \log[\mu_i(q, L)] \text{ vs } \log(L) \tag{17}$$

y

$$\sum_{i=1}^{N(L)} \mu_i(q, L) \log[P_i(L)] \text{ vs } \log(L) \tag{18}$$

Desde la elección de un rango de escala apropiada, es un paso crucial en el análisis multifractal. El valor máximo de  $L$  y  $q$  que puede ser usado en las ecuaciones (17) y (18) fue impuesto por el comportamiento lineal de la función. Para todo  $q$  considerado:

$$\sum_{i=1}^{N(L)} \mu_i(q, L) \log[\mu_i(q, L)] \text{ vs } \log(L) \quad \text{y}$$

$$\sum_{i=1}^{N(L)} \mu_i(q, L) \log[P_i(L)] \text{ vs } \log(L) \quad (19)$$

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En las imágenes digitalizadas que se muestran a continuación se observa una visión gráfica de la desglaciación:

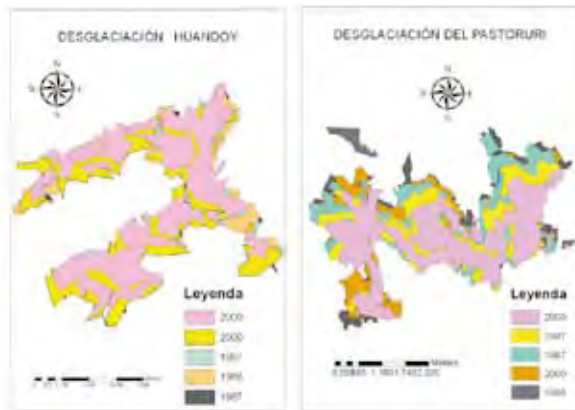


Figura 2: Desglaciación de los nevados Huandoy y Pastoruri.

En forma complementaria, en la tabla 3 se cuantifica la desglaciación:

Tabla 3: Variación del área glaciar obtenida por a) SIG y b) Multifractales.

(a)

Glaciar Huandoy			Glaciar Pastoruri		
Año	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)	Año	Área (m <sup>2</sup> )	Pérdida de área (%)
1987	65 299 379	100	1987	8 932 439	100
1988	67 757 652	103	1988	10 583 321	118
1990	78875185	121	1990	11 578 327	130
1997	59 382 852	91	1997	8 039 674	90
2000	68 681 259	105	2000	9 232 224	103
2009	59 028 118	90	2009	7 911 194	89

(b)

Glaciar Huandoy			Glaciar Pastoruri		
Año	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)	Año	Área (m <sup>2</sup> )	Pérdida de área (%)
1987	67 233 095	100	1987	8 639 518	100
1988	71 384 464	106	1988	10 017 083	116
1990	78 097 045	116	1990	11 641 904	134
1997	63 323 149	94	1997	8 531 790	99
2000	75 792 163	113	2000	10 040 891	116
2009	61 454 290	91	2009	7 797 165	90

La tabla 3 indica que el Huandoy y el Pastoruri disminuyeron aproximadamente un 10% de su área glaciar en un periodo de 22 años. La estimación de la superficie glaciar por métodos convencionales y multifractales resultó no significativa en un análisis como muestras relacionadas o pareadas, lo cual significa que es indistinto utilizar el SIG o multifractales para determinar el área.

**Comportamiento del clima en la zona de los glaciares**

Las influencias del cambio climático en el retroceso glaciar se reportan en varios estudios que muestran la tendencia creciente de la temperatura media global [7]. Para el entorno del glaciar Huandoy se encontró:

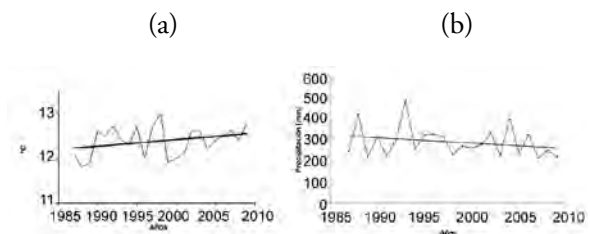


Figura 3: Tendencia de la temperatura y precipitación en el entorno del Huandoy.

La tendencia en el intervalo de tiempo 1968-2009, describe un incremento de la temperatura media anual de alrededor de 1,58 °C, mientras que la precipitación media anual ha disminuido en 9,37 mm anuales. Asimismo para la zona de Recuay, adyacente al glaciar Pastoruri, se aprecia:

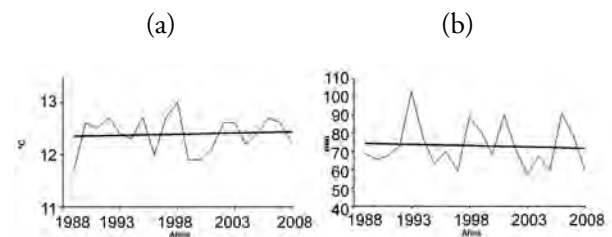


Figura 4: Tendencia de la temperatura y precipitación en el entorno del Pastoruri.

Para la zona cercana al glaciar Pastoruri, la temperatura tiende ligeramente a aumentar, mientras que la precipitación tiende a decrecer.

La figura 5a, presenta los valores del NDSI y la figura 5b presenta la imagen de la razón 3/5:

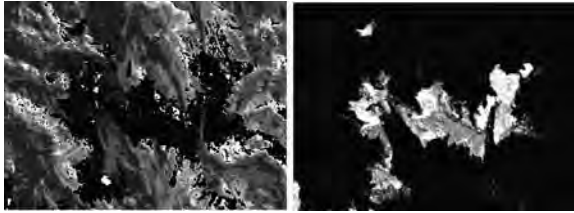


Figura 5: (a) NDSI (b) Ratio 3/5

El NDSI y el ratio Imagen 3/5 son frecuentemente usados para identificar la cobertura glaciara.

Como se aprecia en las figuras 5 y 6, el método del ratio imagen 3/5 resultó mejor que el NDSI para la eliminación de sombras como nubes [8], pues las variaciones en 6(b) son más suaves, es decir menos bruscas que en 6(a).

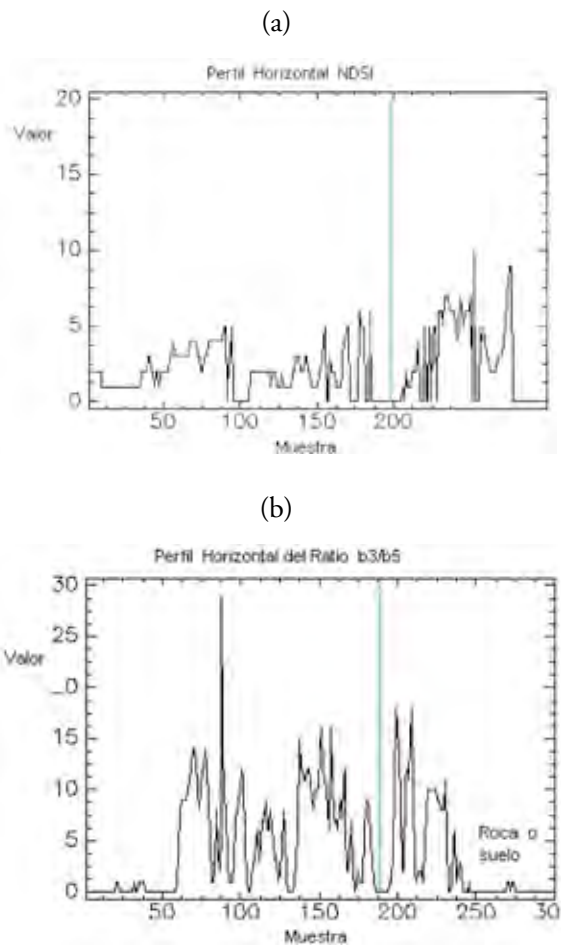


Figura 6: Perfil horizontal (a)NDSI (b) ratio 3/5.

La caracterización multifractal es la siguiente:

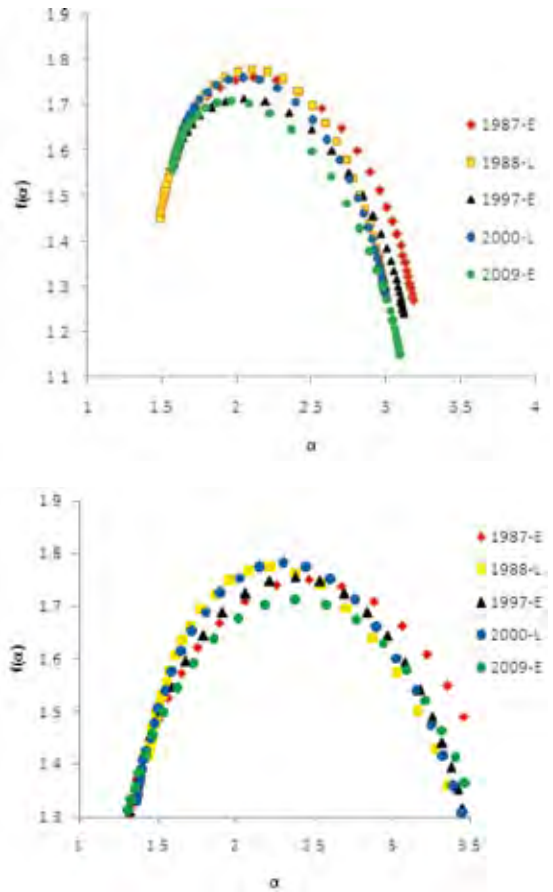


Figura 7: Espectros multifractales para el Huandoy y Pastoruri, respectivamente.

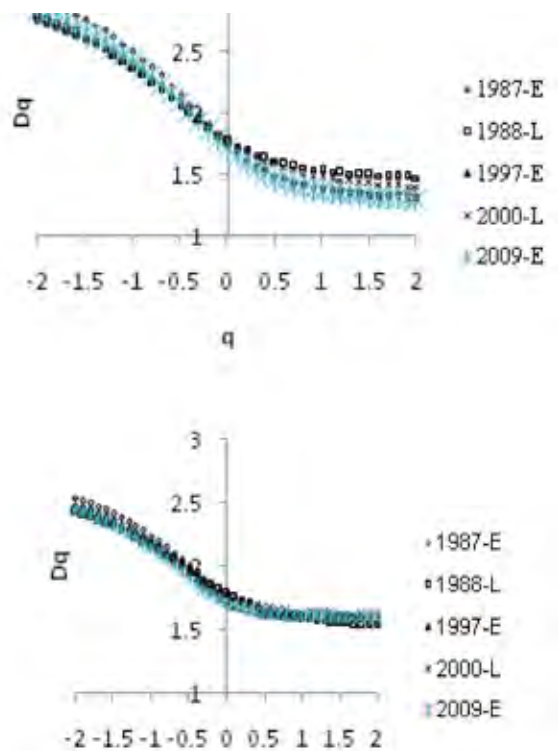


Figura 8: Función Dq para el Huandoy y Pastoruri, respectivamente.

Los espectros multifractales de la figura 7 nos indican que para los años 1987, 1997 y 2009 hay una pérdida mayor de masa glaciar, debido al fenómeno El Niño, mientras que en los años 1988 y 2000, años en que se presentó La Niña, hay un mantenimiento o recuperación del glaciar.

El gráfico de la función  $q$  vs  $Dq$  de la figura 8 nos permite determinar la dimensión fractal ó  $D_0$ .

La figura 8 nos muestra que la dimensión  $D_0$  para la superficie glaciar es de 1,8, tanto para el nevado Pastoruri como para el Huandoy.

### CONCLUSIONES

Las modernas técnicas multifractales devinieron muy versátiles, prácticas y sensibles para mostrar la incidencia de los eventos El Niño y La Niña en el espectro multifractal y para estimar la superficie glaciar.

El derretimiento de los glaciares es afectado en parte por El Niño

El Huandoy y el Pastoruri disminuyeron aproximadamente un 10% de su área glaciar en un periodo de 22 años.

La estimación de la superficie glaciar por métodos convencionales y multifractales resultaron no significativas en un análisis como muestras relacionadas o pareadas, significando que es indistinto utilizar el SIG o multifractales para determinar el área.

La dimensión  $D_0$  para la superficie glaciar fue de 1,8, para el Huandoy y el Pastoruri.

### AGRADECIMIENTOS

Al Centro Internacional de la Papa, por facilitarnos el uso y manejo del software MASS.

### REFERENCIAS

- [1] J. Morris, "Retreat of Tropical Glaciers in Colombia and Venezuela from 1984 to 2004 as Measured from ASTER and Landsat Images", 63rd Eastern Snow Conference, Newark, Delaware, U.S.A, 2006.
- [2] P. Chevallier, B. Pouyaud, W. Suarez, Climate Change Impact on the water resources from the mountains in Peru. Trabajo presentado en el OECD Global Forum on Sustainable Development: Development and Climate Change, OECD, París, 2004.
- [3] SENAMHI, Guía básica de meteorología general, Dirección General de Meteorología, Perú, 2005.
- [4] A. Posadas, R. Quiroz, R. Zorogastúa y C. León Velarde, Multifractal characterization of the spatial distribution of ulexite in a Bolivian salt flat, International Journal of Remote Sensing 26(3), 2005.
- [5] J. Feder, Fractals, NewYork, Plenum Press, 1988.
- [6] A. Posadas, D. Giménez y R. Protz, Multifractal characterization of soil pore systems, Soil Science Society of America Journal, 67, 2003.
- [7] B. Bates, S. Kundzewics y J. Palutikof, Climate change and water, Documento técnico del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, IPCC Secretariat, Ginebra, 2008.
- [8] C. Vargas, C. Villon y J. Pasapera, Comparación de técnicas para el mapeo de cobertura glaciar con imágenes LANDSAT y ASTER en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú, Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoramiento Remoto, Natal, Brasil, INPE, 2009.

E-mail: gmeddiaz@gmail.com