

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISTINTOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE GLACIAR EN EL PIRINEO AXIAL ARAGONÉS A PARTIR DE IMÁGENES LANDSAT

IGNACIO C. MAESTRO CANO*

JORGE A. RECIO RECIO**

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría

Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera, s/nº 46022 Valencia, España

* igmaeca@doctor.upv.es ** jrecio@cgf.upv.es

RESUMEN

La estimación de la superficie glaciar a partir de imágenes Landsat constituye un problema para el cual parece no existir una solución óptima. Dependiendo de las características de los glaciares estudiados se obtienen resultados dispares, aún empleando métodos similares. La mayor parte de los trabajos hasta ahora publicados se centran en glaciares extensos (polares y alpinos). El propósito principal del presente trabajo es examinar el potencial y las posibles deficiencias que las actuales metodologías puedan poseer para el análisis de aparatos glaciares de poca extensión. Los resultados, parecen indicar la idoneidad de la *ratio* entre las bandas 4 y 5 de Landsat, como método para la extracción automática de superficies glaciares. Por último, se proponen algunas soluciones y mejoras, en especial en lo referente a la elección del umbral para cada *ratio*, así como el empleo de ciertas operaciones típicas de los SIG.

Palabras clave: Glaciar, NDSI, Landsat, teledetección, Pirineos.

ABSTRACT

The estimation of the glacier area from Landsat images constitutes a problem for which it does not seem to be only one optimal solution. Depending on the analyzed glacier characteristics, different results can be obtained, even with similar methods. Many works have been published about this subject, but most of them are focused on vast glaciers (polar and alpinos). The main purpose of this paper is to examine the potential and possible shortcomings of the present methodologies for the analysis of small glacier systems. Our results seem to indicate the suitability of the ratio between Landsat bands 4 and 5 as the best method for the automatic extraction of glacier areas. Finally, several solutions and enhancements are proposed, particularly the choice of an optimal threshold value for each ratio, with the aid of some GIS common operations.

Keywords: Glacier, NDSI, Landsat, remote sensing, Pyrenees.

1. Introducción

El inventariado de la superficie glaciada es de gran importancia por varias razones. Por una parte permite realizar una estimación de la cantidad disponible de agua sobre la superficie terrestre, y por otra, está demostrando constituir un indicador válido de la evolución del cambio climático (que, por cierto, se deja sentir primero y de forma más dramática en glaciares de menor extensión, como es el caso que nos ocupa).

Los glaciares estudiados son los más meridionales de Europa y están situados en siete macizos montañosos pirenaicos ubicados en la provincia de Huesca, entre los valles del río Gállego por el oeste y Noguera Ribagorzana por el este. Estos volúmenes permanentes de hielo están protegidos desde 1990 con la figura de Monumentos Naturales. La altitud de los mismos oscila entre 2700 m. y 3000 m., perteneciendo a los términos municipales, de oeste a este, de Sallent de Gállego, Panticosa, Torla, Bielsa, San Juan de Plan, Sahún, Benasque y Montanuy ([figura 1](#)).

Se dispone de registros glaciares correspondientes a los Pirineos desde finales del siglo XIX (datos de Schrader quien, en 1894, estimó una superficie total superior a las 1500 ha). En cuanto a imágenes Landsat podemos remontarnos como mucho hasta 1972, en el caso de imágenes MSS (Multi-Spectral Scanner) o a 1982 para el de TM (Thematic Mapper). Vemos pues que una primera problemática que se plantea es la escasa separación temporal existente para poder realizar estudios cronológicos acerca de la evolución glaciar que ofrezcan resultados con la suficiente significación.

Los fundamentos teóricos de la extracción automática de las superficies cubiertas por nieve o hielo, parten en nuestro caso de la respuesta espectral de ambos elementos (nivel de reflectancia según la longitud de onda, [figura 2](#)). En nuestro trabajo nos interesará el comportamiento de la nieve y el hielo para las longitudes de onda que vienen definidas por las distintas bandas de que dispone el sensor Thematic Mapper del satélite Landsat.

Como se observa en la [figura 2](#), la reflectancia de la nieve/hielo aumenta conforme disminuye la longitud de onda, especialmente por debajo de 0,8-1,2 μm (de ahí su color blanco dentro del espectro visible), poseyendo una muy baja reflectancia para longitudes de onda superiores a 1,5 μm . Esta considerable y característica diferencia en su respuesta es la que será aprovechada para distinguir aquellas zonas de la imagen que están cubiertas por nieve/hielo de aquellas otras que no lo están.

Del diagrama espectral de la nieve/hielo también se desprende (aunque no quede reflejado en la [figura 2](#)) que es posible la utilización de imágenes tomadas mediante sensores de radar de apertura sintética (SAR), tanto en la banda C (de 5,8 cm), como en la L (de 23,5 cm). No obstante, en nuestro caso la imagen de que se dispuso fue una escena Landsat tomada el 17 de julio de 1989 (esta fecha resulta aceptable para nuestras intenciones, dado que se considera que es entre mayo y septiembre cuando la nieve remanente es la considerada "perpetua", como sucede en el caso de los glaciares).

Un aspecto de gran interés sería el de la diferenciación, no ya de la superficie cubierta o no por el hielo de los glaciares, sino ir un paso más adelante llegando a diferenciar (y cartografiar) las

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

distintas *facies* glaciares que pueden encontrarse en éstos. Esto es posible mediante el empleo de las mencionadas imágenes radar, capaces de penetrar en las capas no superficiales del hielo o nieve y de reflejar, por tanto, su variada estructura. En esta dirección Fahnestock y otros (1993, 1530-1534) ya han confirmado que es posible diferenciar, por ejemplo, entre nieve húmeda y nieve seca (lo que equivale a decir entre interior y perímetro del glaciar, dado que se supone que dicho perímetro se encuentra habitualmente en fusión).

2. Metodología

Un primer problema que se ha de resolver al tratar de reconocer sobre una imagen las áreas cubiertas de nieve o hielo, es el de la distinción entre éstas y aquellas cubiertas por las nubes. No obstante, este problema queda fácilmente resuelto por el hecho de que, mientras que las nubes (salvo algunas excepciones como son las finas capas de cirros) poseen una elevada reflectancia en el infrarrojo medio, con la nieve sucede lo contrario.

Las metodologías basadas en lo hasta aquí expuesto son utilizadas en la actualidad para el cartografiado de superficies glaciares. En concreto, las que se van a comparar en el presente trabajo se emplean desde 1985 y son las más ampliamente utilizadas hasta el momento.

Se ha aprovechado la característica de una alta reflectancia en el espectro visible (para lo cual podemos usar una cualquiera de las tres primeras bandas de Landsat) junto con una fuerte absorción en el infrarrojo cercano/medio (bandas 4 y 5, respectivamente). Ambas características son reunidas en un único parámetro, *ratio* o índice.

Así, los *ratios* empleados han sido los siguientes:

A. $R_{35} = \frac{TM3}{TM5}$ (Rott, 1994, 217-226).

B. $R_{45} = \frac{TM4}{TM5}$ (Hall *et al.*, 1987, 104-108).

C. *Normalized-Difference Snow Index*, $NDSI = \frac{TM2 - TM5}{TM2 + TM5}$. Este parámetro es un análogo del NDVI (*Normalized-Difference Vegetation Index*).

En los tres casos se aplicó a la imagen un umbral con la intención de obtener una máscara para utilizarla sobre la imagen original. A continuación se describe cada uno de los tres métodos empleados.

2.1. Método A

Rott (1994, 217-226) utilizó el umbral $TM3/TM5 > 1,3$ para nieve/hielo y si además se cumple:

- $R(TM3) > 0,48$, se considera que es nieve.

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

- $R(TM3)$ entre 0,32 y 0,48 se considera que es nieve envejecida (*firn*¹).
- $R(TM3) < 0,32$ se considera que es hielo.

En nuestro caso se ha comprobado que el criterio más adecuado resulta ser el primero². En consecuencia, se seleccionó aquellos píxeles de la imagen cuyo valor de *ratio* era superior a 1,3 (los valores de esta *ratio* oscilaron entre 0,13 y 26) y, sobre esta primera selección, se definió un nuevo umbral, de modo que únicamente quedaran aquellos píxeles cuyo valor de reflectancia para la banda 3 fuera superior a 0,48 (equivalente a un nivel digital de 132³).

Un efecto que es interesante tener en cuenta a la hora de utilizar esta metodología, es que, ya sea por la antigüedad en sí u otros factores (entre los que destaca la ocultación de su superficie por derrubios), la reflectancia de la nieve disminuye con el tiempo. Mientras que una nieve reciente puede alcanzar fácilmente valores de reflectancia superiores al 80%, ésta puede caer por debajo del 40% tras la metamorfosis sufrida por los cristales de nieve con el tiempo. Esta caída de la reflectancia resulta mucho más marcada para el infrarrojo medio, haciendo que la *ratio* entre esta banda (la 5) y cualquiera de las visibles (por ejemplo, la 3, como en el caso del presente método) aumente sobremanera.

La superficie clasificada como glaciar según este método resultó de 764,3 ha. Si bien, si consideramos únicamente aquellas zonas que han sido catalogadas de forma oficial como glaciar, la extensión queda limitada a 446,6 ha. Aquellos píxeles clasificados como glaciares no incluidos en la delimitación oficial, son rechazados ya que son píxeles aislados que no forman ninguna agrupación significativa.

2.2. Método B

Jacobs y otros (1997, 98-102) emplearon el siguiente umbral para la *ratio* definida inicialmente por Hall (1987, 104-108): $TM4/TM5 > 1$ para la nieve o el hielo. En la gráfica de respuesta espectral ([figura 2](#)) se observa que el cociente entre los valores de las bandas 4 y 5 es superior a 1 para el caso de la nieve y el hielo. Esto sugiere la utilización de un umbral mayor que, por tanto, será más selectivo.

Del análisis de las zonas ocupadas por glaciares se comprobó que la mayor parte de los píxeles tenían un valor del índice igual o superior a 3. Es por esta razón que se efectuó una nueva prueba utilizando este nuevo valor de umbral.

En este caso, la superficie clasificada como glaciar fue de 699,3 ha. si se tienen en cuenta todas y cada una de las parcelas clasificadas como glaciar dentro de la zona de estudio, si bien si

¹ Con este término se conoce a determinado estadio intermedio entre la nieve y el hielo. Es una nieve que, transcurrida la estación cálida, se ha tornado más compacta que la nieve reciente.

² La razón por la cual esto sucedía así no ha podido ser perfilada, si bien pudiera deberse a las peculiares respuestas espectrales de las áreas glaciares poco extensas.

³ Para la conversión de reflectancia a nivel digital y viceversa, se ha empleado la metodología propuesta por Chuvieco (2002), que hace uso de los coeficientes obtenidos por Gilabert *et al.* (1986, 237-250).

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

consideramos únicamente aquellas que han sido catalogadas de forma oficial como glaciar la extensión queda limitada a 425,1 ha.

2.3. Método C

En cuanto al NDSI, el valor umbral tomado ha sido el elegido para el proyecto MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) cifrado en 0,4 (Andrew *et al.*, 1998, 363-366)⁴.

El principal problema que surge mediante el empleo de este índice es la confusión que se produce entre áreas cubiertas de hielo y zonas de umbría. En efecto, tras aplicar un primer umbral fijado en un valor de 0,4, se comprobó que este límite era el más adecuado para la detección de las áreas cubiertas por glaciares, pero que bajo esta clasificación surgían nuevos perímetros que se identificaron como zonas de sombra. No obstante, se adoptó la siguiente solución: dado que se trataba de eliminar aquellas zonas no expuestas a la radiación solar directa (las zonas de sombra), se realizó un segundo enmascaramiento según el cual se eliminaran de la selección previa aquellas zonas cuya reflectancia fuera inferior a 0,18.

Según este último criterio, la superficie glaciar dentro de la zona de estudio resultó de 843,3 ha, aunque, si nos restringimos a aquellas que han sido catalogadas de forma oficial como glaciar, la extensión queda limitada a 465,7 ha.

Una vez vista cada una de las metodologías a analizar, hay que mencionar que, a pesar de la relativa precisión de sus resultados es indiscutible que pueden ser depuradas, mediante la utilización de ciertos criterios, visuales o espaciales, fáciles de llevar a la práctica de forma semiautomática mediante cualquier SIG.

Las operaciones que se realizaron para la eliminación de los polígonos erróneos fueron las siguientes: eliminación de aquellos polígonos cuya altura media fuera inferior a los 2000 m. (se considera que en nuestras latitudes no existen glaciares por debajo de esa altura), y de aquellos polígonos cuya superficie fuera inferior a una hectárea.

2.4. La información de referencia

Una vez determinadas las superficies estimadas según cada uno de los tres métodos a comparar, únicamente faltaba definir una información que pudiera ser utilizada como patrón de referencia fiable o "verdad terreno" correspondiente a los distintos glaciares estudiados. Establecer esta superficie "verdadera" es una tarea realmente difícil dado que las fuentes consultadas, varían de forma ostensible entre sí, estando tomadas todas ellas de datos oficiales.

⁴ En realidad las bandas correspondientes para el sensor MODIS no son la 2 y la 5, como ocurre en Landsat, sino la 4 (0,545-0,565 μm) y la 6 (0,1628-0,1652 μm), sin embargo, esto no supone mayor problema (al contrario, la resolución espacial del MODIS es de sólo 250 m.).

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

En concreto, las tres fuentes consultadas fueron las siguientes:

1. Ley 2/1990, de 21 de marzo, del Gobierno de Aragón, de declaración de Monumentos Naturales de los glaciares pirenaicos (Boletín Oficial de Aragón del 28 de marzo de 1990, nº 36/1990). Superficies referidas a 1990.
2. Instituto Aragonés de Estadística. Información estadística de Aragón, 17 de mayo de 2002. Características generales de los glaciares y heleros del Pirineo aragonés (tomada de Chueca y Lampre, 1994). Superficies referidas a 1992.
3. Decreto 271/2002, de 23 de julio, del Gobierno de Aragón, por el que se modifica y amplía la superficie protegida de los Monumentos Naturales de los Glaciares Pirenaicos, se establecen sus zonas periféricas de protección y se aprueba el plan de protección pirenaicos (Boletín Oficial de Aragón del 9 de agosto de 2002, nº 94/2002). Superficies referidas a 1995.

Una hipótesis que podría explicar esta discrepancia sería, a la vista de los datos de las distintas fuentes, el hecho de que la mayoría de los glaciares descritos son de escasa dimensión y son precisamente este tipo de glaciares los que presentan una mayor sensibilidad a las variaciones meteorológicas entre los distintos años. Reforzando esta hipótesis, se observa que en la mayoría de los glaciares más extensos (Llardana, Literola, Aneto, Barrancs y Tempestades) sí se obtiene una evolución coherente con el paso de los años (esto es, una disminución progresiva de la superficie glaciar: véanse la [figura 5](#) y la [tabla 1](#)).

La única solución adoptable es, desde nuestro punto de vista, realizar una comparación de las superficies tomando como referencia las tres fuentes de información por separado y, tras un análisis cuidadoso, establecer las oportunas conclusiones.

3. Resultados

Para el cálculo de las superficies se optó por convertir los polígonos ráster extraídos de la imagen, en polígonos vectoriales (coberturas en formato *shape* de ArcView 3.2[®] de ESRI) y efectuar el cálculo de las superficies por ellos definidas. Un ejemplo se observa en la [figura 6](#).

A la hora de comparar las superficies glaciares obtenidas con las disponibles (véanse las [tablas 2](#), [3](#) y [4](#)), se debe tener en cuenta la regresión que ha existido en los glaciares. Teóricamente, las superficies obtenidas pueden resultar algo mayores al ser la imagen de una fecha anterior a los datos que se ofrecen de forma oficial (fundamentalmente si las comparamos con los datos de 1995, véase la [tabla 4](#)).

Como se puede apreciar en las respectivas tablas ([2](#), [3](#) y [4](#)), si consideramos que los datos de los tres años disponibles son igualmente fiables, puede decirse que, en promedio, los métodos que han conseguido mejores resultados han sido el B (la *ratio* entre las bandas 4 y 5) y el C (NDSI), ambos con discrepancias entorno al 30%, mientras que el que peor ha funcionado ha sido el A (*ratio* entre las bandas 3 y 5), cuya discrepancia aumenta hasta el 41%.

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

En cambio, si consideramos los resultados extraídos de la imagen como fiables, independientemente del método empleado, una primera conclusión a la que se podría llegar es que los datos oficiales más exactos son los correspondientes al año 1990 (que ofrecen discrepancias de entre el 24 y el 29% de la superficie observada), empeorando los de años posteriores. Esta conclusión, sin embargo, ha de tomarse con suma precaución dado que se desconocen los métodos empleados en cada una de las campañas de medición (véase el siguiente apartado: Conclusiones).

Por último, para asegurar la fiabilidad de nuestras conclusiones, se realizó una búsqueda de material fotográfico que permitiera la verificación de los polígonos extraídos con cada uno de los métodos empleados mediante simples técnicas fotointerpretativas. Así pues se pudo encontrar material válido para los siguientes glaciares: Frondiellas, Brecha Latour, Infiernos, Perdido Superior e Inferior, Añisclo NE., La Munia, La Paúl, Barrancs, Aneto, Tempestades, Vignemale y Petit Vignemale (de estos dos últimos no se disponía de datos de superficie, no obstante, dada la claridad del material encontrado sirvieron para verificar la adecuación de los límites extraídos automáticamente a la realidad). En todos los casos, salvo en el glaciar de la Brecha Latour para el que se encontró una ligera mejora empleando el método del NDSI, se observaron unos límites mejor aproximados mediante la utilización del método B. Como ejemplo de la utilidad de este método visual de verificación puede observarse la [figura 7](#).

4. Conclusiones

Lo primero que hay que reconocer es que no se han obtenido unos resultados excesivamente espectaculares. Creemos que ello se debe principalmente a la dimensión de los glaciares analizados, mucho más discretos que los habitualmente estudiados mediante las técnicas aquí descritas (tengamos en cuenta que el 85% de los glaciares estudiados posee una extensión inferior a 20 ha y en el 68% ésta es inferior a 10 ha, unos 10x10 píxeles), que contrasta con la resolución espacial disponible, de 30 m.⁵ Por otra parte, la discrepancia existente entre los diferentes datos oficiales consultados no ofrece un excesivo margen de confianza. Ello es debido a la tendencia anómala en la evolución de los glaciares (de avance, en lugar de regresión), que se observa a partir de los datos de 1990 y 1992.

Es evidente, que la delineación de los glaciares (o de cualquier otra superficie a clasificar) mediante técnicas de teledetección, con una determinada resolución espacial dada, funciona mejor en la observación de grandes extensiones de glaciar (cosa comprensible dado que parece lógico pensar que los problemas de falta de precisión de los *ratios* empleados surjan en el delineado de los contornos y no en las zonas interiores). En este caso, según han pasado los años y las superficies glaciares han disminuido sensiblemente su extensión, la capacidad de las metodologías empleadas se ha visto perjudicada. La solución a este problema es clara: optar por el empleo de imágenes con una mayor resolución espacial y que dispongan de información de ventanas similares, dentro del espectro electromagnético, a las del satélite Landsat (por ejemplo, imágenes de SPOT o Ikonos).

⁵ De hecho, esto prácticamente descarta el posible uso de la banda 6 ya que, su resolución da un tamaño de píxel de 1,4 ha, que es el tamaño de algunos de los glaciares buscados (de hecho el mayor representaría tan sólo 69 píxeles, esto es, 8x8 píxeles).

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

Una vez matizado todo lo anterior, las conclusiones son que la metodología que ofrece mejores resultados es la que emplea una *ratio* de reflectancias entre las bandas 4 y 5, si bien también se obtienen resultados satisfactorios mediante la utilización del NDSI. Se ha evidenciado que los peores resultados para el cartografiado de glaciares han sido obtenidos mediante el empleo de la *ratio* entre las bandas 3 y 5. Este resultado está en coherencia con las apreciaciones de Hall (1987, 104-108), según las cuales la *ratio* TM4/TM5 es la mejor para distinguir entre las distintas *facies* del hielo y la nieve especialmente en zonas de sombra.

En cuanto a las conclusiones que pudieran derivarse acerca de la evolución de los glaciares del Pirineo axial ([figura 8](#)) y que pudieran cuantificar de alguna manera la magnitud de la regresión observada en los últimos años (especialmente en los últimos 20), éstas resultarían aventuradas, dada la escasa separación temporal existente entre las imágenes empleadas (del año 1989) y los datos de los que se disponía (como mucho correspondientes a 1995).

En conclusión, puede considerarse la metodología propuesta adecuada para el cartografiado de glaciares, siendo necesario únicamente tomar la precaución inicial de seleccionar la resolución espacial de las imágenes a emplear de acuerdo con la extensión de los glaciares que se desea cartografiar.

Referencias bibliográficas

- Andrew G. K., Hall, D. K. y Riggs, G. A. (1998): "Global snow cover monitoring using MODIS", *Ponencia en el 27º Simposio Internacional de Teledetección del Medio Ambiente de Tromso*. 8-12 de junio, pp. 363-366.
- Chueca, J. y Lampre, F. (1994): *Los glaciares altoaragoneses, Cuadernos Altoaragoneses de Trabajo*, 21. Huesca, Instituto de Estudios Altoaragoneses.
- Chuvieco Salinero, E. (2002): *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona, Barcelona, Ariel.
- Decreto 271/2002, de 23 de julio, del Gobierno de Aragón, por el que se modifica y amplía la superficie protegida de los Monumentos Naturales de los Glaciares Pirenaicos, se establecen sus zonas periféricas de protección y se aprueba el plan de protección pirenaicos* (Boletín Oficial de Aragón del 9 de agosto de 2002, nº 94/2002).
- Fahnestock, M., Bindschandler, R., Kwok, R. y Jezek, K. (1993): "Greenland ice sheet surface properties and ice dynamics from ERS-1 SAR imagery", *Science*, 262, 3, pp. 1530-1534.
- Gilabert, A., Gandía, S., Segarra, D., Meliá, J. (1986): "Análisis multitemporal de los valores de reflectividad en cultivos de cítricos mediante el sensor TM", *I Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*. Barcelona, Institut d'Investigacions Geològiques Jaume Almera (CSIC), pp. 237-250.
- Hall, D. K., Ormsby, J. P., Bindschadler, H. y Siddalingaiah, H. (1987): "Characterization of snow and ice reflectance zones on glaciers using Landsat TM data", *Annals of Glaciology*, 9, pp. 104-108.
- Jacobs, J. D., Simms, E. L. y Simms, A. (1997): "Recession of the southern part of Barnes Ice Cap, Baffin Island, Canada, between 1961 y 1993, determined from digital mapping of Landsat TM", *Journal of Glaciology*, 43, pp. 98-102.

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

Klein, A. G., Hall, D. K y Riggs, G. (1998): "Improving snow-cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model", *Hydrological Processes*, 12 (10-11), pp. 1723-1744.

"Ley 2/1990, de 21 de marzo, de declaración de Monumentos Naturales de los glaciares pirenaicos del Gobierno autonómico de Aragón". *Boletín Oficial de Aragón* del 28 de marzo de 1990, nº 36/1990.

Rott, H. (1994): "Thematic studies in alpine areas by means of polarimetric SAR and optical imagery", *Advances in Space Research*, 14, pp. 217-226.

TABLAS

Tabla 1. Evolución de los principales glaciares a partir de la información consultada

Glaciar/helero	1990	1992	1995	Variación 90-92	Variación 90-95
Frondiellas N.	7	8,4	7,2	1,4	0,2
Brecha Latour	4	6,6	1,0	2,6	-3,0
Oriental Infiernos	6	7,7	5,0	1,7	-1,0
Central Infiernos	9	11,9	9,6	2,9	0,6
Clot de la Hount	2	2,9	2,2	0,9	0,2
Robiñera	5	6,9	6,0	1,9	1,0
Posets	13	10,9	11,8	-2,1	-1,2
la Paul	8	13,9	12,2	5,9	4,2
Llardana	23	21,9	17,8	-1,1	-5,2
Literola	16	5,1	3,8	-10,9	-12,2
Tempestades	34	29,8	21,2	-4,2	-12,8
Barrancs	28	16,5	14,5	-11,5	-13,5
Aneto	132	99,0	89,9	-33,0	-42,1
Maladeta	60	68,9	49,0	8,9	-11,0
Coronas	13	16,8	6,5	3,8	-6,5
Alba	3	4,1	1,9	1,1	-1,1
Salenques	12	17	4,2	5,0	-7,8

NOTA: Todas las superficies en ha.

Tabla 2. Superficies según los métodos estudiados comparadas con los datos de 1990

Macizo	1990 (ha)	A (ha)	B (ha)	C (ha)	Diferencia A (ha)	Diferencia B (ha)	Diferencia C (ha)	Diferencia A (%)	Diferencia B (%)	Diferencia C (%)
Balaitus	11	12,5	8,4	9	1,5	2,6	2	13,6	23,6	18,2
Picos del Infierno	15	8,7	12,5	9,7	6,3	2,5	5,3	42	16,7	35,3
Vignemale	2	2,8	1	1,3	0,8	1,0	0,7	40,0	50,0	35,0
La Munia	5	3,1	4,3	5,1	1,9	0,7	0,1	38,0	14,0	2,0
Posets	44	25,9	37,5	39,8	18,1	6,5	4,2	41,13	14,8	9,5
Perdiguero	16	14,7	6,1	7,5	1,3	9,9	8,5	8,1	61,9	53,1
Aneto-Maladeta	282	250,7	219,8	244,7	31,3	62,2	37,3	11,1	22,1	13,2
	<u>375</u>	<u>318,4</u>	<u>289,6</u>	<u>317,1</u>				<u>27,7</u>	<u>29</u>	<u>23,8</u>
								Promedio:		

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

Tabla 3. Superficies según los métodos estudiados comparadas con los datos de 1992

Macizo	1992 (ha)	A (ha)	B (ha)	C (ha)	Diferencia A (ha)	Diferencia B (ha)	Diferencia C (ha)	Diferencia A (%)	Diferencia B (%)	Diferencia C (%)
Balaitus	20,8	15,2	10	10,9	5,6	10,8	9,9	26,9	51,9	47,6
Picos del Infierno	26,3	12,8	17,3	18,8	13,5	9	7,5	51,3	34,2	28,5
Vignemale	12,4	4	4,8	5,8	8,4	7,6	6,6	67,7	61,3	53,2
Monte Perdido	85,3	98,8	105	10	13,5	19,7	33,85	15,8	19,9	32,2
La Munia	6,9	3,1	4,3	5,1	3,8	2,6	1,8	55,1	37,7	26,1
Posets	61,9	33,7	44,7	48,4	28,2	17,2	13,5	45,6	51	30,2
Perdiguero	17,4	30,8	26,4	25,6	13,4	9	8,2	77	29,2	31,1
Aneto- Maladeta	264,7	251,7	221,8	246,6	13	42,9	18,1	4,9	16,2	6,8
Total:	495,7	450,1	434,3	480,4				Promedio: 43,0	37,7	32,0

Tabla 4. Superficies según los métodos estudiados comparadas con los datos de 1995

Macizo	1995 (ha)	A (ha)	B (ha)	C (ha)	Diferencia A (ha)	Diferencia B (ha)	Diferencia C (ha)	Diferencia A (%)	Diferencia B (%)	Diferencia C (%)
Balaitus	8,2	12,5	8,4	9	4,3	0,2	0,8	52,4	2,4	9,8
Picos del Infierno	19,5	12,8	17,3	18,8	6,7	2,2	0,7	34,4	11,3	3,6
Vignemale	2,2	2,8	1	1,3	0,6	1,2	0,9	27,3	54,5	40,9
La Munia	6,0	3,1	4,3	5,1	2,9	1,7	0,9	48,3	28,3	15,0
Posets	41,8	25,9	37,5	39,8	15,9	4,3	2	38	10,3	4,8
Perdiguero	10	24,2	13	19,7	14,2	3	9,7	142	30	97
Aneto- Maladeta	188,2	251,7	221,8	246,6	63,5	33,6	58,4	33,7	17,9	31,0
Total:	275,9	335,0	303,3	340,3				Promedio: 53,7	22,1	28,9

FIGURAS



Figura 1. Mapa de la zona de estudio y de localización de los distintos macizos analizados.

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

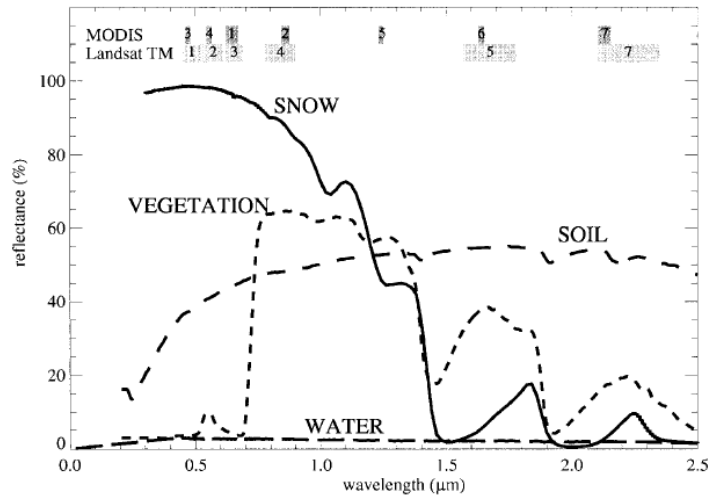


Figura 2. Gráfica de respuesta espectral de la nieve comparada con la correspondiente al suelo desnudo, la vegetación y las superficies de agua. [Klein, *et al.*, 1993, 1723-1744]

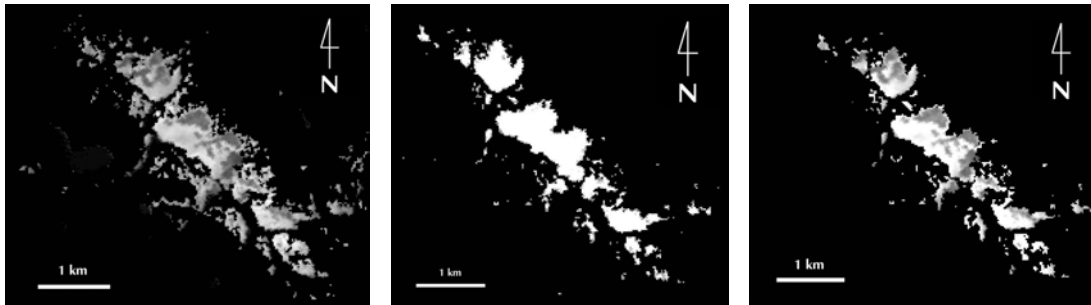


Figura 3. Resultados obtenidos según los tres métodos analizados (A, B y C, de izquierda a derecha) para la zona del macizo de Aneto-Maladeta.

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, n° 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

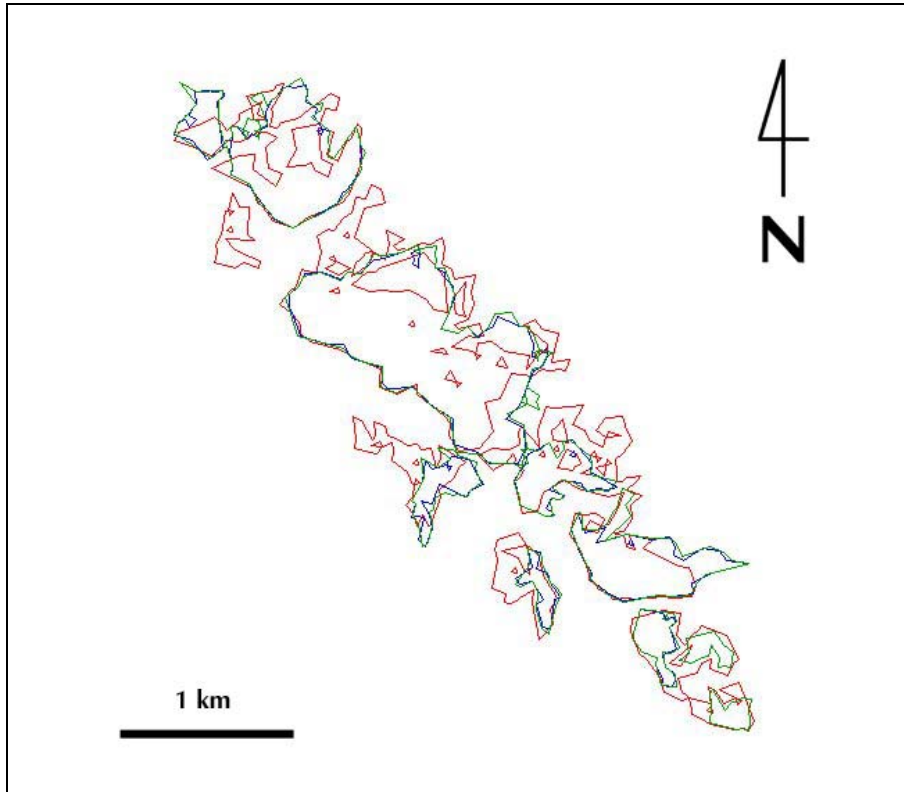


Figura 4. Resultados de la [figura 3](#) superpuestos, en formato *shape* de Arcview (rojo: método A, azul: método B, verde: método C).

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

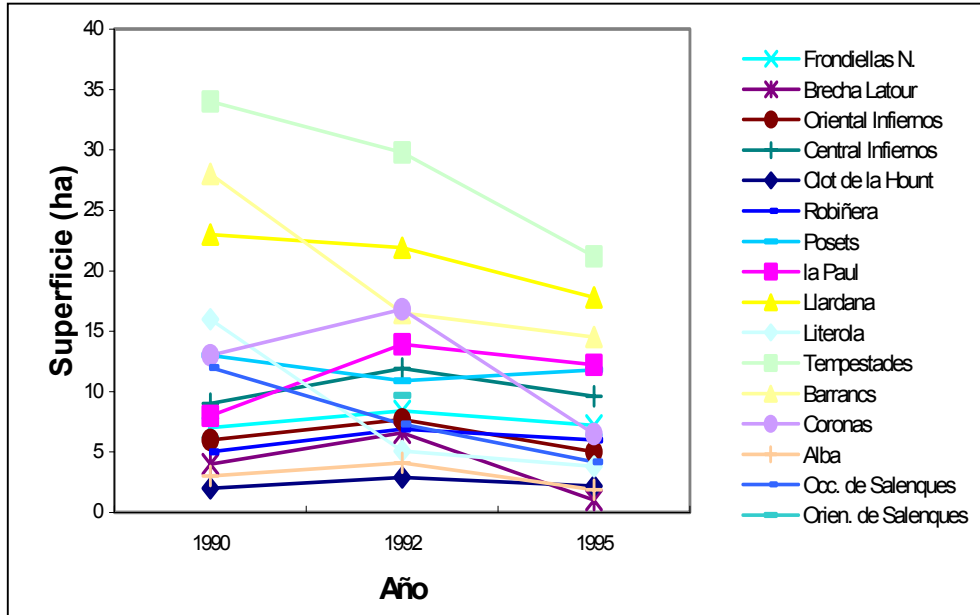


Figura 5. Superficies obtenidas mediante los tres métodos estudiados comparadas con los datos de 1990 (superficie en ha).

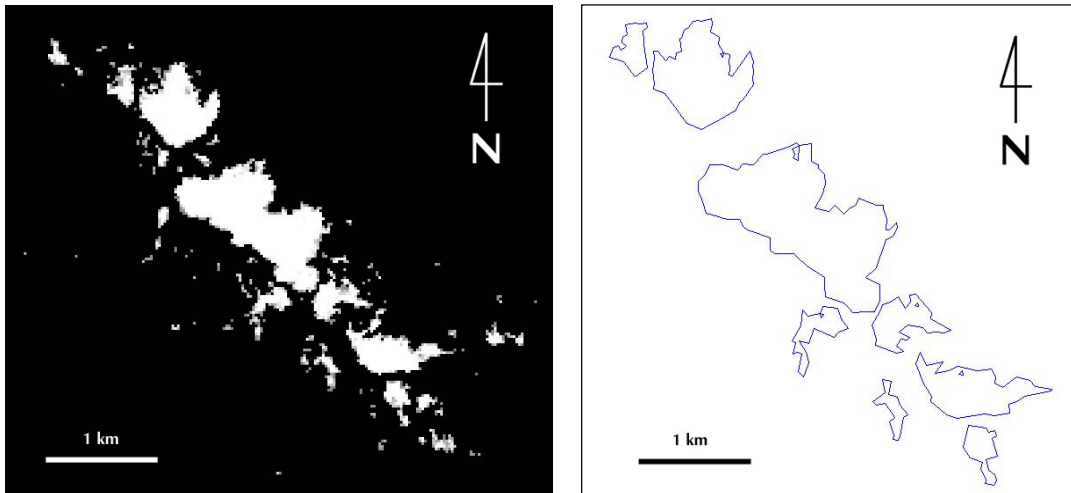


Figura 6. Resultado para el macizo del Aneto-Maladeta sobre la imagen Landsat y una vez convertido a formato vectorial *shape*.

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004): "Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 79-92. ISSN: 1578-5157

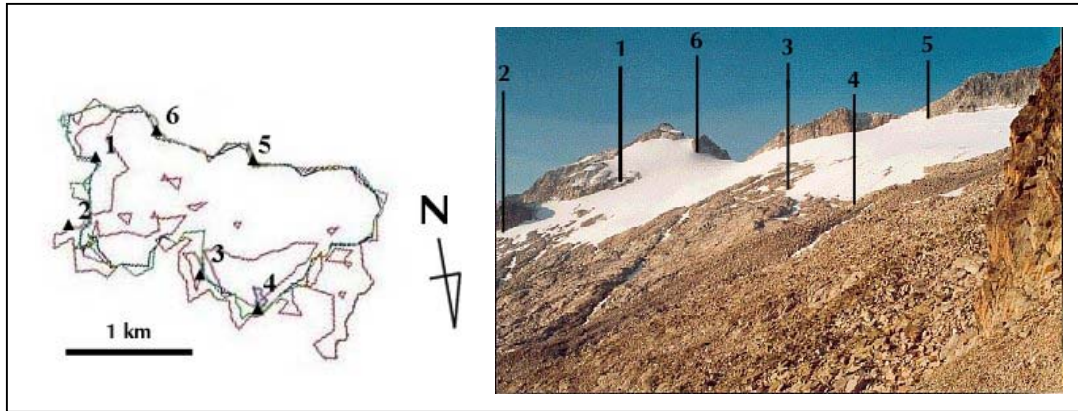


Figura 7. Fotointerpretación del perímetro obtenido, según los tres métodos analizados, del glaciar de Aneto (rojo: método A, azul: método B, verde: método C). Obsérvese que del método A resulta un perímetro repleto de anomalías, mientras que los otros métodos ofrecen un perímetro similar, más próximo al real (foto de la derecha).

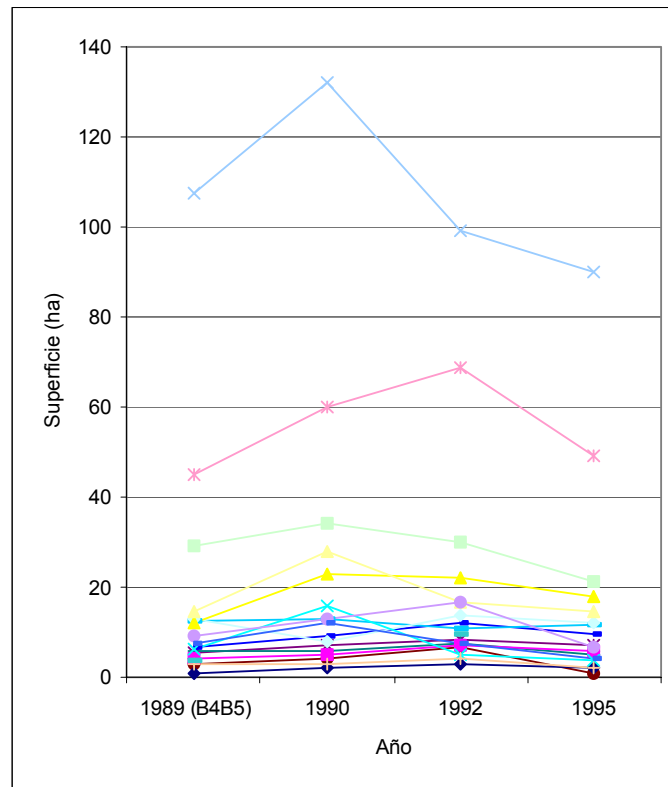


Figura 8. Evolución de la superficie (en ha) de los glaciares estudiados desde 1989 (tomando los resultados obtenidos mediante el empleo del método B), hasta el año 1995.