

|                         |    |     |       |         |      |
|-------------------------|----|-----|-------|---------|------|
| Cuadernos I. Geográfica | 17 | 1-2 | 47-67 | Logroño | 1991 |
|-------------------------|----|-----|-------|---------|------|

## PAUTAS DE FLUJO EN UN GLACIAR ROCOSO ACTIVO (SKJOLDALUR, ISLANDIA): APLICACION DE TECNICAS LIQUENOMETRICAS

**Javier CHUECA CIA\***

*RESUMEN.- La utilización de técnicas liquenométricas en el glaciar rocoso activo de Skjöldalur I (Islandia) ha permitido cuantificar la existencia de importantes diferencias en su dinámica superficial. El estudio se llevó a cabo partiendo de un muestreo suficientemente representativo constituido por una malla de 48 puntos de control repartidos por la superficie del glaciar rocoso. En cada una de las localidades se obtuvieron medidas de los diez diámetros más largos de *Rhizocarpon geographicum* (s.l.) y de sus porcentajes de cubrimiento. El tratamiento estadístico de los datos (a partir de la realización de un análisis de la varianza tri-direccional y de tests de significación no-paramétricos) confirmó la presencia de líneas de flujo preferencial en las pautas de movimiento del glaciar rocoso, atribuibles a una distribución irregular del núcleo interno de hielo.*

*SUMMARY.- The use of lichenometric techniques in the active Skjoldalur I rock glacier (Iceland) has allowed us to quantify the existence of significant differences in its superficial dynamics. The study was carried out starting from a sufficiently representative sampling procedure constituted by a grid of 48 control-points scattered through the rock glacier surface. In each localitie the ten largest *Rhizocarpon geographicum* (s.l.) diameters and the cover percentage was measured. Data statistical treatment (from a three-way ANOVA analysis and application of non-parametric tests) confirmed the presence of preferential flow lines in the rock glacier movement patterns attributed to an irregularly distributed ice-core.*

**Palabras clave:** Glaciar rocoso, liquenometría, pautas de flujo, Islandia.  
**Key words:** Rock glacier, lichenometry, flow patterns, Iceland.

### 1. Introducción

Durante el verano de 1990 —y dentro del marco de una expedición organizada por el Dpto. de Geografía de la Queen's University de Belfast— se llevaron a cabo trabajos rutinarios de monitorización de una serie de glaciares rocosos situados en la zona septentrional de Islandia (valles de Glerardalur-

---

\* Departamento de Geografía Universidad de Zaragoza.

Skjöldalur). Además de reevaluar las pautas generales de movimiento, se efectuó un análisis de su estructura en profundidad mediante la utilización de sondeos con radar y se trabajó en la determinación de las características del flujo superficial por medio de técnicas liquenométricas.

Un adelanto de la metodología utilizada en la elaboración de este último apartado fue ya presentado con antelación (CHUECA, J. , 1990 b). En este artículo exponemos, más minuciosamente, los resultados obtenidos tras el tratamiento estadístico de los datos recogidos en el glaciar rocoso de Skjöldalur I, y su plasmación cartográfica de detalle. Nuestro estudio se enmarca en una línea de investigación más amplia desarrollada por miembros del Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza (CHUECA, J. , 1990 a; 1991; CHUECA, J. y JULIÁN, A. , 1991) centrada en la utilización de técnicas de datación relativas —a partir, fundamentalmente, del empleo de la liquenometría— aplicables a depósitos holocenos recientes localizados en ámbitos de media-alta montaña.

## 2. El glaciar rocoso de Skjöldalur I: situación y características generales

El glaciar rocoso objeto de estudio se ubica (Fig. 1) en el tramo superior del valle de Skjöldalur, en la región de Eyjafjardarsysla, al norte de Islandia ( $18^{\circ} 23' 56''$  O;  $65^{\circ} 29' 24''$  N). Situado en el interior de un pequeño circo de cabecera abierto hacia el norte (Fot. 1), está intrínsecamente relacionado —al igual que



Foto 1.- Fotografía aérea vertical de la zona de estudio. Escala aprox. 1:37.000.

## PAUTAS DE FLUJO EN UN GLACIAR ROSOSO ACTIVO

ocurre con diferentes morfologías del mismo tipo localizadas a lo largo de la cabecera del valle— con un glaciar residual de modestas dimensiones (0,118 km<sup>2</sup>) en trance de desaparición (Fot. 2). La existencia de un compacto núcleo de hielo interno aflorante en ciertos sectores del glaciar rocoso ha coadyuvado al desarrollo de un importante dinamismo traducido en un complejo cuerpo de cordones y surcos. En superficie, el predominio corresponde a las fracciones más gruesas, con abundancia de grandes bloques angulosos de dimensiones métricas y escasa presencia de matriz fina. Esta se ve incrementada en las proximidades del talud frontal, apareciendo en profundidad en determinados tramos del glaciar rocoso donde, por procesos de lavado ligados al agua de fusión o a periodos de lluvias estacionales, puede llegar a acumularse en forma considerable.

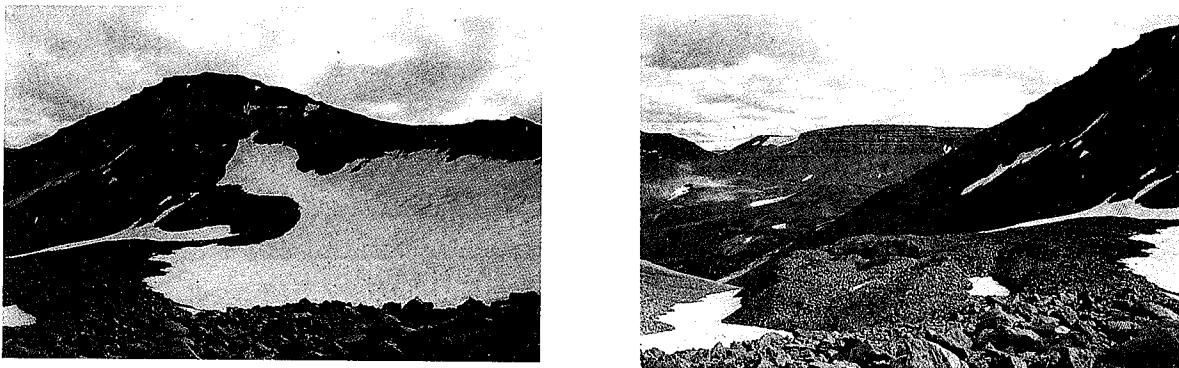


Foto 2.- Vista general del sistema glaciar-glaciar rocoso.

Si genéticamente el glaciar rocoso puede adscribirse al grupo de los g.r. con núcleo de hielo (ice-cored rock glacier de POTTER, N., 1972), morfológicamente es un neto ejemplo de g.r. linguoide (tongue-shaped rock glacier de WAHRHAFTIG, C. y Cox, A., 1959). Ocupa un área de 0,134 km<sup>2</sup>, oscilando sus dimensiones entre los 620 m de anchura en la zona de raíz y los 730 m de longitud máxima (Fot. 2). El talud fronto-lateral —con una altura relativa de más de 30 m— muestra signos inequívocos de actividad (micro-desprendimientos superficiales, ausencia total de tapiz vegetal, elevado valor de pendiente, etc.). Altitudinalmente, se extiende desde los 880 hasta los 960 metros s.n.m, estando las planicies somitales que lo enmarcan a una altura cercana a los 1.300 m (Sgraudur, 1.276 m).

Desde un punto de vista geomorfológico, el área se inscribe en pleno dominio de las condiciones sub-árticas, en una zona intensamente glaciada hasta época reciente con numerosos vestigios conservados en forma de pequeños glaciares de circo (Fot. 1), en la que las morfologías de detalle relacionadas con un activo periglacialismo —microfiguraciones y suelos ordenados en los rellanos ubicados a mayores alturas, mantos, terrazas y lóbulos de gelifluxión, en los espacios transicionales con elevadas pendientes, céspedes almohadillados (thufur) en los

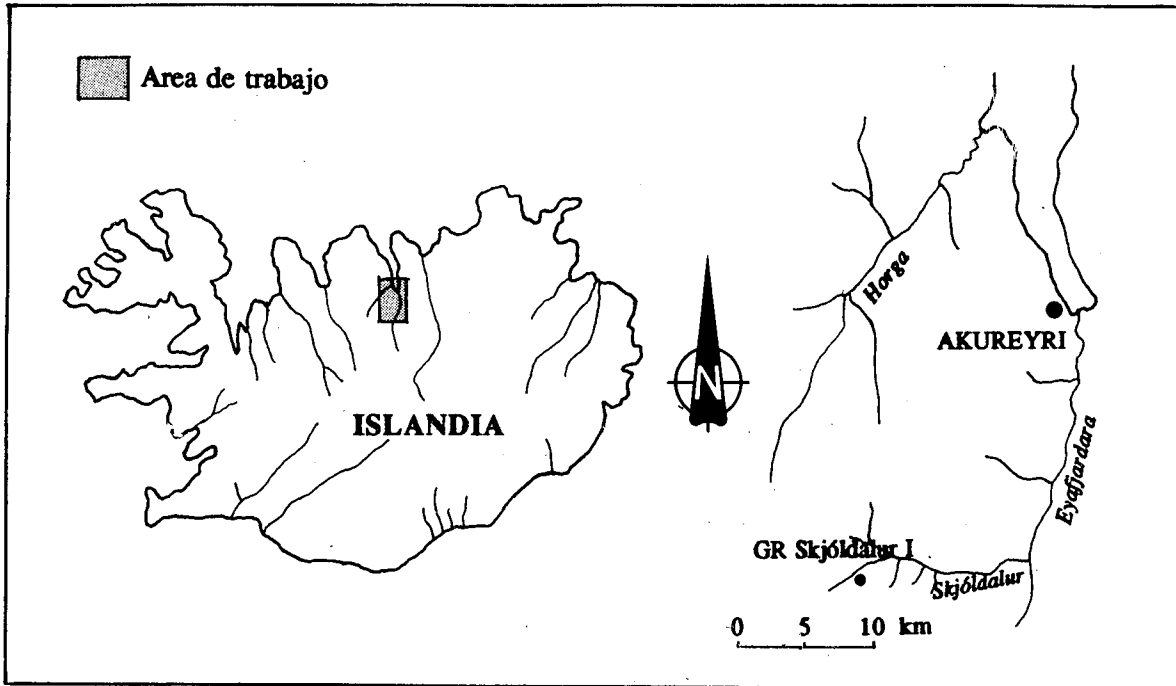


Fig. 1.- Localización del área de trabajo.

fondos de los valles— ocupan lugar preponderante (Fig. 2). No obstante, la relativamente alta cantidad de precipitaciones (en torno a los 2.000 mm anuales en el área de trabajo) y la existencia tan sólo estacional de temperaturas bien por debajo de los 0°, matizan fuertemente la crudeza del clima, haciendo escaso el desarrollo de pergelisoles —y de las morfologías características de un periglaciario estricto a ellos asociadas— en el sector analizado. A un nivel estructural, predominan las formas tabulares horizontales y sub-horizontales construidas a partir de la sucesión monótona de series de rocas extrusivas del Terciario superior (basaltos, fundamentalmente) con origen en el volcanismo fisural —aún hoy en extremo activo— característico de toda la isla.

### 3. Análisis liquenométrico

El potencial de la liquenometría como técnica de datación absoluta y/o relativa ha sido reconocido desde antiguo por los geomorfólogos. Con frecuencia se ha utilizado para cuantificar movimientos diferenciales en distintas morfologías —fundamentalmente presentes en el dominio ártico-alpino— (morrenas, glaciares rocosos, canchales, deslizamientos, etc.) a partir de la obtención de estimaciones de crecimientos relativos. La longevidad de los líquenes en estos ámbitos

PAUTAS DE FLUJO EN UN GLACIAR ROSOSO ACTIVO

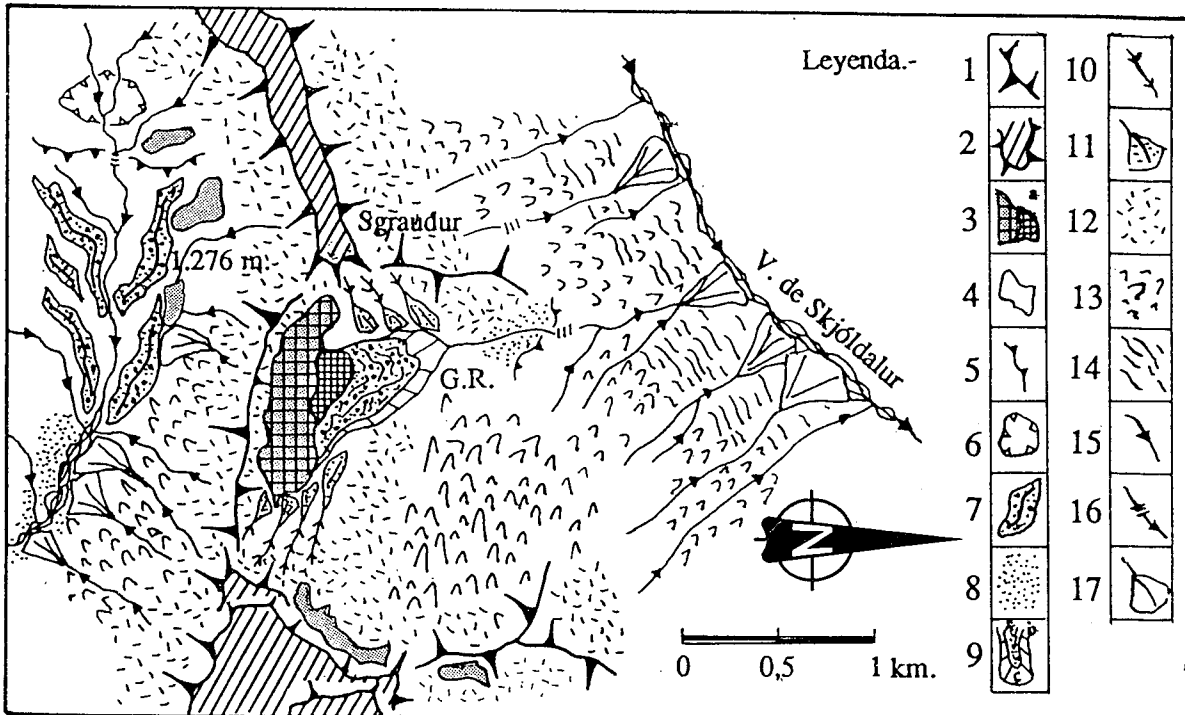


Fig. 2.- Esquema geomorfológico del área de trabajo. Leyenda: 1) Cresta divisoria interglaciaria en basaltos. 2) Plataforma somital en basaltos. 3) Superficie del glaciar: a.- depresión en cuchara. 4) Neveros residuales. 5) Umbrales en circos. 6) Depresiones de sobreexcavación. 7) Morrenas. 8) Tills indiferenciados. 9) Glaciares rocosos: a.- cordones internos; b.- cordón principal; c.- talud fronto-lateral. 10) Canales de aludes. 11) Conos de bloques. 12) Canchales funcionales. 13) Lóbulos de solifluxión. 14) Terracillas. 15) Red fluvial. 16) Cambios bruscos de pendiente. 17) Conos con predominio de finos.

puede alcanzar — en casos extremos — varios milenios aunque, en la mayoría de los casos, su utilidad con grados de fiabilidad elevados se ve limitada a los últimos 700-500 años. Los depósitos recientes asociados a la última pulsación fría marcada por la Pequeña Edad del Hielo han sido, de esta forma, los más frecuentemente analizados a partir de técnicas liquenométricas.

Su aplicación en trabajos de geomorfología llevados a cabo en Islandia es relativamente numerosa (EYLES, N., 1978; GORDON, J. E. y SHARP, M., 1983; MAIZELS, J. K. y DUGMORE, A. J., 1985; THOMPSON, A. y JONES, A., 1986; CASELDINE, C. J., 1985, 1987, 1988; etc.), centrándose en la datación de procesos (pautas de retirada de los hielos glaciares) y formas (terrazas proglaciares, depósitos de sandur, glaciares rocosos) de origen glaciar a partir del establecimiento de las correspondientes curvas de crecimiento de varias especies. En todos los ejemplos citados — dada su extrema ubicuidad en la isla y especiales pautas de crecimiento — se ha utilizado el subgénero *Rhizocarpon* en un sentido lato como grupo básico.

### 3.1. Taxonomía

Pese a existir varios trabajos dedicados específicamente a la identificación del subgénero *Rhizocarpon* y sus agregados (RUNEMARK, H., 1956; THOMSON, J. W., 1967; INNES, J. L., 1982, 1983 b, 1985 b; BENEDICT, J. B., 1988; POELT, J., 1988), la caracterización en el campo del *R. geographicum* a un nivel de especie es especialmente complicada, y requiere la utilización de un análisis microscópico de detalle que haría difíciles las tareas de muestreo. Así, en una buena parte de estudios liquenométricos —y el nuestro entre ellos (Fot. 3)— se trabaja conjugando diferentes especies de *Rhizocarpon* y asumiendo que, probablemente, los talos de mayor tamaño pertenecen a una misma especie de crecimiento más rápido y diferenciado. Sin embargo, en algunos trabajos se ha demostrado que no todos los especímenes del subgénero *Rhizocarpon* crecen a la misma velocidad (LUCKMAN, B. H., 1977; DUFORD, J. M. y OSBORN, G. D., 1978), y que incluso pueden existir importantes diferencias en las pautas de desarrollo de la sección *Alpicola* y la sección *Rhizocarpon* (INNES, J. L., 1982, 1983 b). De hecho, INNES, J. L. (1982), basándose en estudios llevados a cabo en Escandinavia comprobó que hasta alcanzar diámetros de aproximadamente 70 mm el grupo *R. geographicum* crece más rápido que el grupo del *R. alpicola*, invirtiéndose en ese momento la tendencia. La utilización de más de una especie de *Rhizocarpon* en una datación puede dar lugar, por tanto, a interpretaciones equivocadas



Foto 3.- *Rhizocarpon geographicum* sensu lato.

#### PAUTAS DE FLUJO EN UN GLACIAR ROSOSO ACTIVO

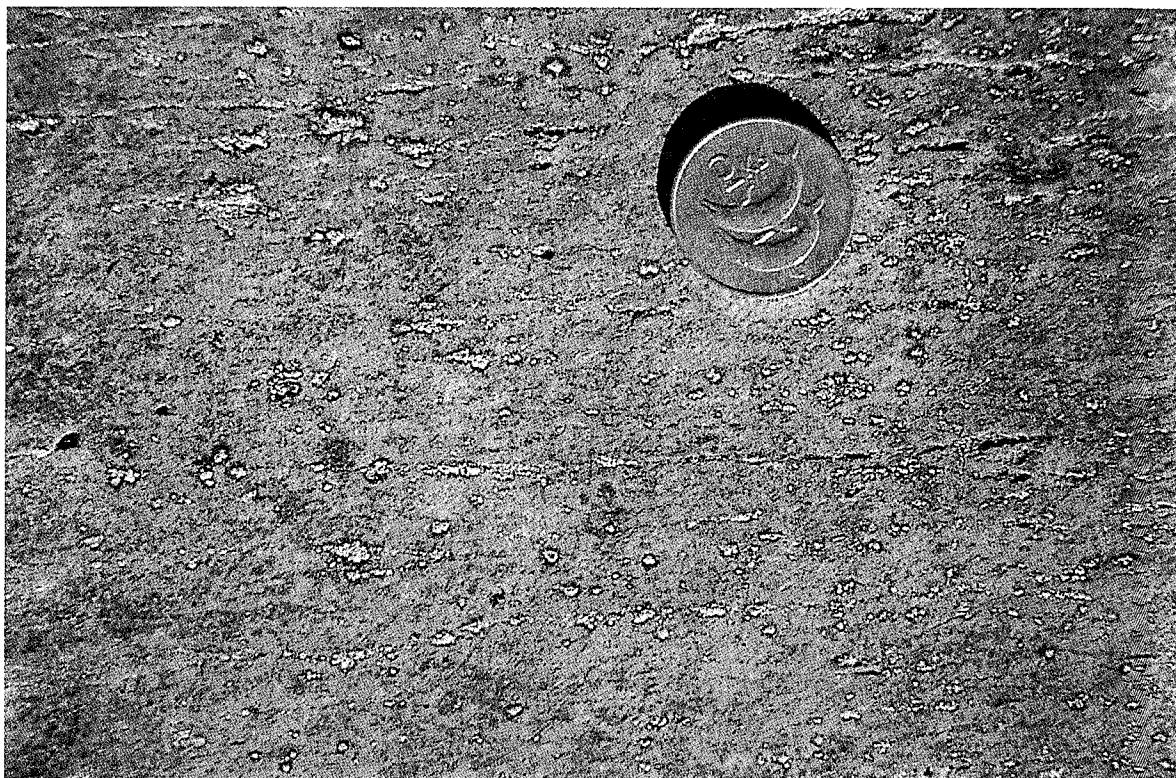


Foto 4.- Modificaciones en el crecimiento normal del talo.

puesto que la curva de crecimiento obtenida con especies agregadas adquiere una forma sigmoideal doble que altera la proyección de las verdaderas tasas de desarrollo.

Para intentar cuantificar la presencia de diferentes especies de *Rhizocarpon* en nuestra zona de trabajo procedimos a la identificación posterior en el laboratorio –siguiendo la metodología propuesta por BENEDICT, J. B., (1988) y POELT, J., (1988)– de 10 muestras recogidas aleatoriamente en distintos sectores del glaciar rocoso. Cada una de ellas fue clasificada a un nivel de especie o subespecie, localizándose *R. inarense*, *R. geographicum* ssp. *arcticum*, *R. macrosporum* y *R. geographicum* ssp. *boreale*. En total, la sección *Rhizocarpon* representaba el 50 % del total muestral, la sección *Superficial* el 25 % y la sección *Alpicola* el 25 %. Los datos vienen a ser similares a los expuestos por ANDRE, M. F., (1986) o WERNER, A., (1990) en sus trabajos llevados a cabo en las Islas Spitsbergen, o por GORDON, J. E. y SHARP, M., (1983) y THOMPSON, A. y JONES, A. (1986) en Islandia. En nuestro estudio, por otro lado, buena parte de las dificultades mencionadas con anterioridad han quedado obviadas, puesto que en ningún caso los valores máximos de los especímenes de *Rhizocarpon* medidos excedían los 55 mm, situándose por tanto dentro de los márgenes de fiabilidad que INNES, J. L. (1982) considera aceptables para el grupo *R. geographicum* en Escandinavia.

### 3.2. Metodología

La estrategia a adoptar de cara a la cuantificación de las dimensiones idóneas a medir en cada una de las muestras ha sido hasta la fecha frecuente objeto de controversia. Un buen resumen de las distintas opciones disponibles puede encontrarse en los trabajos recopilatorios de LOCKE, W.W. et al., (1979) o INNES, J. L. (1985 a). Como aproximación general, los primeros proponen la medición del círculo mayor inscrito (parámetro equivalente al diámetro menor) en un número determinado de especímenes – generalmente del orden de 5 a 10, seleccionados entre los de mayores dimensiones presentes en cada una de las localidades de estudio – mientras que el segundo aboga por la utilización de los diámetros mayores como medida estadística y racionalmente más adecuada. Otra opción – bastante más laboriosa y de interpretación algo más complicada – utilizada desde hace relativamente poco tiempo (INNES, J. L., 1983 a, 1986 c; LOCKE, W. W., 1983; BALLANTYNE, C. K. , 1990) tiene en cuenta las distribuciones de tamaño-frecuencia (size-frequency distributions) presentes en una población completa de líquenes localizable en un espacio dado y generalmente coincidente con cada uno de los puntos de control utilizados en el estudio (INNES, J. L., 1986 c).

En nuestro trabajo, y partiendo de una litología de asentamiento uniforme en todos los casos (basaltos no-vesiculares de grano fino) los métodos básicos utilizados fueron dos: en primer lugar, siguiendo las recomendaciones de INNES, J. L. (1986 a), se procedió a la identificación de los diez diámetros más largos de *Rhizocarpon* localizables en cada uno de los puntos de control, midiéndolos mediante un calibre con una precisión aproximada de  $\pm 0,01$  mm, y obteniendo posteriormente su valor medio. El problema de los talos múltiples o coalescentes se evitó seleccionando únicamente aquéllos que presentaban morfologías circulares o cuasi-circulares (INNES, J. L., 1986 b). En segundo lugar, y de forma complementaria, se analizaron los porcentajes de cubrimiento en 20 bloques de cada una de las localidades, siguiendo el método propuesto por LOCKE, W. W. et al. (1979) e INNES, J. L. (1986 c).

Las localidades de estudio ascendieron a un total de 48, distribuidas en una serie de 11 transectos realizados en dirección normal a la del flujo del glaciar rocoso (Fig. 3), procurando que todo tipo de microambientes (cordones, surcos, talud fronto-lateral) tuviera una adecuada representación. La elevada densidad de localidades por metro cuadrado hizo prácticamente irrelevantes los problemas asociados a la existencia de talos anómalos, ajustándonos así a las indicaciones de INNES, J. L. (1984) acerca del tamaño muestral óptimo. El área de cada localidad fue definida a partir del trabajo de PARSON C. G. (1987), que sugiere –trabajando en morfologías similares a la nuestra, de pequeño tamaño– una superficie de 50 m<sup>2</sup> como más conveniente. Se utilizaron para ello círculos móviles de 4 m de radio que permiten una agilidad de movimiento muy superior a los tradicionales reticulados.



PAUTAS DE FLUJO EN UN GLACIAR ROSOSO ACTIVO

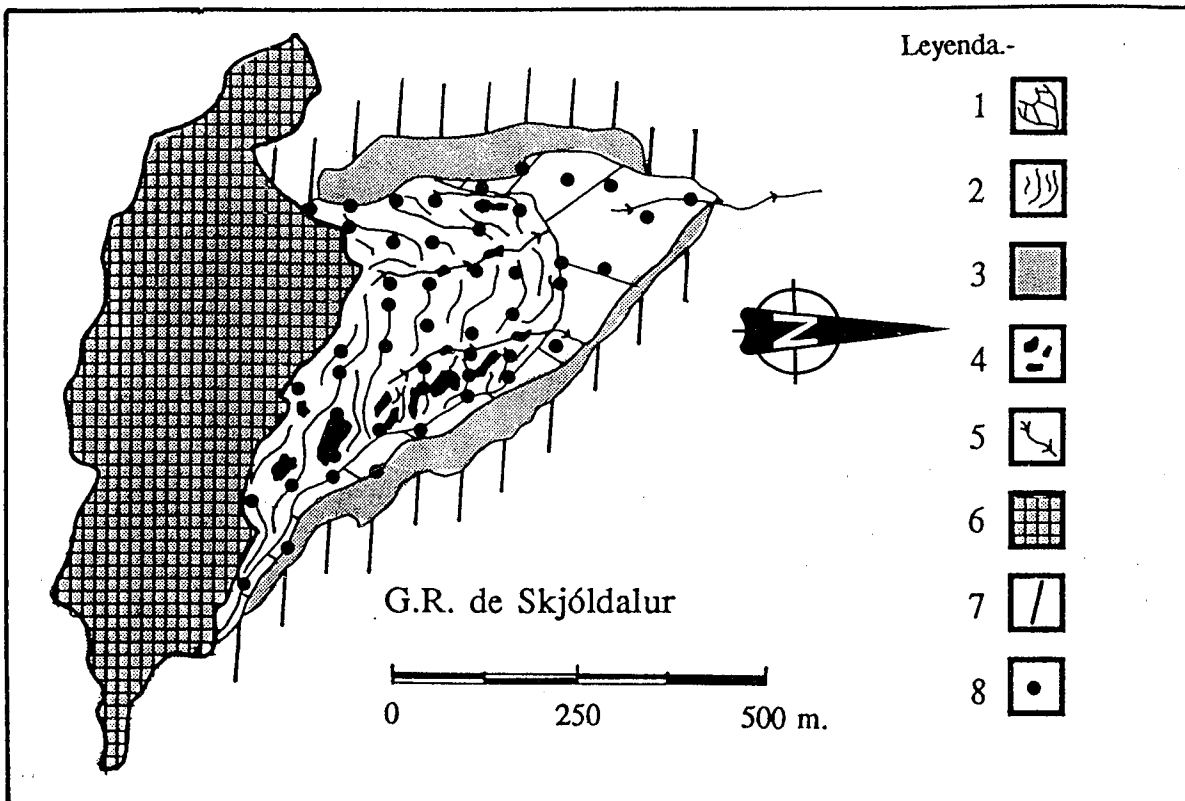


Fig. 3.- Detalle del glaciar rocoso de Skjöldalur I con la malla de localidades de estudio. Leyenda: 1) Talud fronto-lateral. 2) Cordones internos. 3) Cubierta nivosa lateral. 4) Hielo aflorante. 5) Canales de drenaje superficiales. 6) Glaciar. 7) Transectos. 8) Localidades de medición.

Entre los problemas que fueron surgiendo mientras llevabamos a cabo el muestreo —frecuentemente citados en la literatura, y de difícil solución— destacan los siguientes: a) presencia de un crecimiento inducido de los *Rhizocarpon* siguiendo diferencias microtexturales en la superficie de la roca que provocan alteraciones en el desarrollo elipsoideo normal del talo (Fot. 4) (INNES, J. L., 1986 b); b) existencia de sectores concretos en los que el estado de alteración de los basaltos —básicamente debido a la aparición estacional de un manto nivoso— hace imposible el crecimiento de los líquenes, o coadyuva a su desaparición (Fot. 5) (BENEDICT, J. B., 1990); c) funcionamiento de un activo frost-shattering que ha podido provocar que los líquenes de mayor tamaño estén actualmente confinados en los bloques más grandes, a pesar de que éstos pueden no haber sido los asentamientos de la colonización más antigua (INNES, J. L., 1985 a); d) localización de diferencias en los porcentajes de cubrimiento de localidades próximas ligadas a factores microclimáticos-topográficos locales (el efecto green zone de HAINES-YOUNG, R. H., 1983, mencionado con posterioridad por varios autores; INNES, J. L., 1985 c).



Foto 5.- Alteraciones en un cordón de basaltos del sector distal.

#### **4. Determinación de pautas de movimiento superficial**

Para proceder a la determinación de la posible existencia de pautas de flujo diferencial en la superficie del glaciar rocoso de Skjöldalur I utilizamos dos vías diferentes y complementarias. Por un lado, realizamos un análisis estadístico detallado de los datos obtenidos – tras llevar a cabo el muestreo que más arriba hemos mencionado – en el área de estudio, intentando detectar la existencia de irregularidades en la distribución de los tamaños y porcentajes de cubrimiento de las especies utilizadas. El análisis incluye un análisis de la varianza en tres direcciones, en el que se contemplan los aspectos relacionados con la ubicación longitudinal y transversal, así como con la microlocalización, de cada uno de los 48 puntos de control. La significación estadística de los resultados ofrecidos por el ANOVA es posteriormente confirmada a partir de la utilización del test no-paramétrico de Kruskal-Wallis. Por otro lado, las ya citadas irregularidades se han plasmado de forma gráfica mediante la elaboración de una cartografía de isopletas que viene a dotar de un sentido visual a los resultados estadístico-cuantitativos anteriores.

#### 4.1. Análisis estadístico

El empleo de análisis estadísticos complejos [a partir de la utilización de aplicaciones específicas ya tradicionales en este campo: CHARANAL (*Character Analysis*), GRAPH (*Similarity Cluster Analysis*), CLUSTR (*Cluster Analysis*); o de los paquetes estadísticos más generales: SPSS, BMDP, MINITAB, StatView 512+] en los trabajos de geomorfología relacionados con la utilización de técnicas de datación relativa es abundante. La mayoría de estudios utiliza diversos métodos de clasificación (análisis de asociación, análisis discriminantes, *clusters*) o de condensación de los datos (análisis factorial, componentes principales, etc.) para conseguir agrupar y delimitar en lo posible diversos conjuntos homogéneos localizables en las áreas de trabajo. La elaboración de mapas de facies dentro de espacios reducidos, basándose en criterios fundamentalmente cronológicos es uno de los fines más perseguidos (CARROLL, T., 1974; MILLER, C. D., 1979; HARBOR, J. M., 1986; DOWDESWELL, J. A., 1982, 1984; DOWDESWELL, J. A. y MORRIS, S. E., 1983), centrándose — como es lógico — en las últimas etapas del Cuaternario.

El análisis de la varianza (ANOVA) — método empleado en este estudio — es frecuentemente utilizado para discriminar si  $k$  muestras, medidas, como mínimo, en escala de intervalos y normalmente distribuidas, proceden de la misma población. El test comprueba esta probabilidad descomponiendo la varianza global de la población en dos grupos: varianza entre muestras y varianza dentro de las muestras. La ratio entre las dos últimas crea un valor  $F$ , cuya probabilidad estadística puede confirmarse acudiendo a las tablas de esta distribución para obtener los correspondientes valores críticos. Si  $F$  excede el valor crítico la  $H_0$  que afirma la no-diferencia entre las medias de los grupos es rechazada. Naturalmente, cuando  $k$  muestras son obtenidas de una población común pueden esperarse ciertas variaciones aleatorias ligadas al propio proceso de muestreo. El test  $F$  ayuda a discernir si las diferencias observadas pueden haber surgido casualmente o si, por el contrario, se hallan ligadas a la existencia de poblaciones diferentes ( $H_1$ ). Sin embargo, cualquiera que sea la conclusión, ésta afecta por igual a todos los grupos implicados en el análisis, haciéndose imposible el establecer diferencias entre ellos.

El análisis de la varianza tri-direccional es una herramienta poderosa para aislar los efectos de diferentes variables nominales, combinadas y por separado, en una dependiente. Los datos utilizados en nuestro trabajo fueron tratados estadísticamente con la aplicación StatView 512+, generándose un modelo trifactorial para cada una de las dos variables dependientes: 1) diámetro mayor de *R. geographicum* (s.l.) y 2) porcentaje de cubrimiento. Las variables independientes se ordenaron del siguiente modo:  $x_1$ : ubicación longitudinal [subdividida en tres categorías (proximal, media y distal)];  $x_2$ : ubicación transversal [subdividida en tres categorías (oeste, central y este)] y  $x_3$ : microlocalización [subdividida en tres categorías (plano superior de cordones, paredes de cordones y fondo depresiones)], obteniéndose en total 9 células de comparación. Los resultados del análisis aparecen en los cuadros I y II, mostrando el total de combinaciones posibles, los grados de libertad, la suma y media de los cuadrados, el valor del test  $F$  de Snedecor y la probabilidad a él asociada.

CHUECA CIA

CUADRO I

|                        | Grados lib. | Suma de cuad. | Media de cuad. | Test-F  | Prob.   |
|------------------------|-------------|---------------|----------------|---------|---------|
| Ubic. longitudinal (A) | 2           | 14.821        | 7.411          | 112.093 | 0,000 1 |
| Ubic. transversal (B)  | 2           | 30.735        | 15.367         | 232.449 | 0,000 1 |
| AB                     | 4           | 3.379         | 0,845          | 12.778  | 0,000 1 |
| Microlocalización (C)  | 2           | 0,182         | 0,091          | 1.376   | 0,274 5 |
| AC                     | 4           | 0,373         | 0,093          | 1.409   | 0,265 3 |
| BC                     | 4           | 0,662         | 0,165          | 2.502   | 0,073 3 |
| ABC                    | 8           | 0,953         | 0,119          | 1.802   | 0,133 4 |

CUADRO II

|                        | Grados lib. | Suma de cuad. | Media de cuad. | Test-F  | Prob.   |
|------------------------|-------------|---------------|----------------|---------|---------|
| Ubic. longitudinal (A) | 2           | 423.383       | 211.692        | 179.014 | 0,000 1 |
| Ubic. transversal (B)  | 2           | 87.919        | 43.959         | 37.174  | 0,000 1 |
| AB                     | 4           | 8.279         | 2,07           | 1,75    | 0,176 7 |
| Microlocalización (C)  | 2           | 4,53          | 2.265          | 1.915   | 0,172 2 |
| AC                     | 4           | 17.718        | 4.429          | 3.746   | 0,018 8 |
| BC                     | 4           | 15.747        | 3.937          | 3.329   | 0,029 2 |
| ABC                    | 8           | 27.615        | 3.452          | 2.919   | 0,023 4 |

Para la primera de las variables dependientes, y dentro del valor crítico adoptado (0,05; equivalente, por tanto, a un nivel de confianza del 95 %), la hipótesis nula puede ser tan sólo rechazada con claridad (valores de 0,000 1) para las variables de ubicación longitudinal y ubicación transversal, así como para la interacción existente entre ellas (0,0001). Esto implica la aceptación de la  $H_1$ , y confirma la procedencia de poblaciones diferentes de las muestras analizadas. El examen de la tabla de incidencia  $x_1-x_2$  (cuadro III) muestra además que las medias de los diámetros mayores de *Rhizocarpon* en los dos grupos adoptan una clara tendencia creciente hacia el extremo distal occidental (Fig. 4 A), haciendo visible de forma gráfica la presencia de irregularidades en las pautas de colonización y desarrollo de las especies utilizadas a lo largo de la superficie del glaciar rocoso.

La segunda variable dependiente (cuadro II) arroja resultados similares en cuanto a la ubicación longitudinal y transversal (con niveles de significación del 0,0001), aunque la interacción entre ambas no supere el 82 % de probabilidad. Su representación gráfica (Fig. 4 B), elaborada tras examinar la correspondiente tabla de incidencia  $x_1-x_2$  (cuadro IV), sigue mostrando un sesgo marcado –en esta ocasión en los porcentajes de cubrimiento– en la distribución, con valores superiores en el extremo distal, y máximos en la célula distal-occidental. La variable  $x_3$ , por sí sola, no es significativa estadísticamente, aunque las interacciones ubicación longitudinal-microlocalización y ubicación transver-

PAUTAS DE FLUJO EN UN GLACIAR ROSOSO ACTIVO

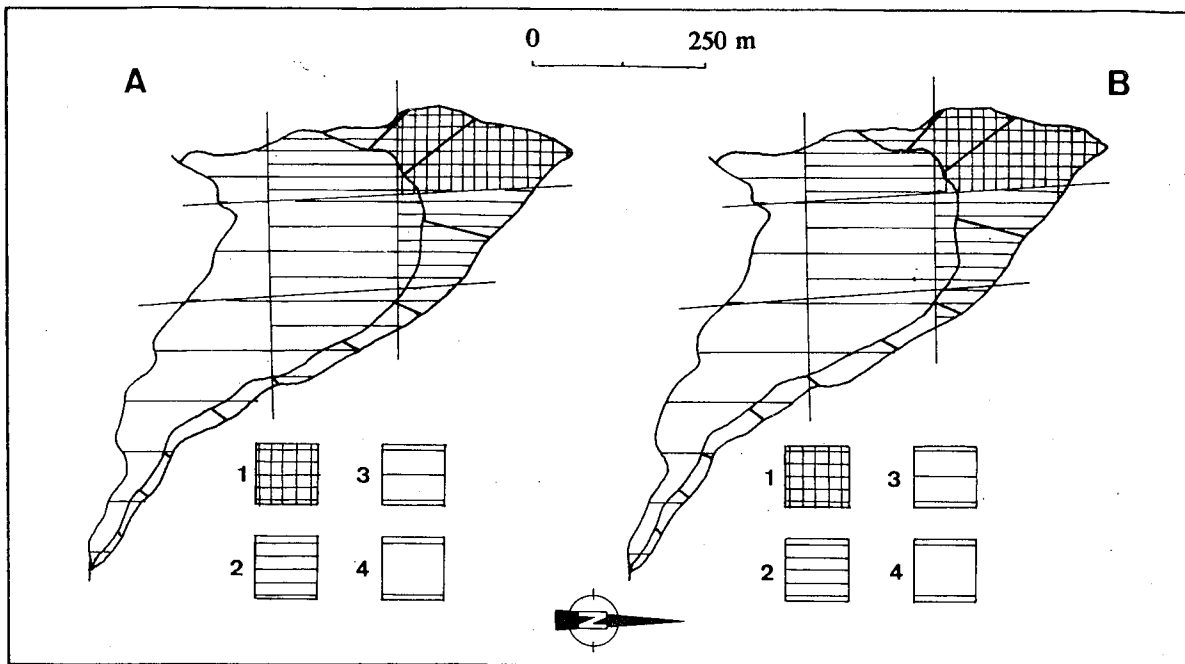


Fig. 4.- Representación gráfica del análisis de la varianza tridireccional. A.- Valores de diámetro mayor de *Rhizocarpon geographicum* (s.l.) en cm. Interacción  $x_1-x_2$ . Leyenda.- 1) 0-0,9 cm; 2) 1-1,9 cm; 3) 2-2,9 cm; 4) 3-3,9 cm. B.- Porcentaje de cubrimiento. Interacción  $x_1-x_2$ . Leyenda.- 1) 0-4,9%; 2) 5-9,9%; 3) 10-14,9%; 4) 15-19,9%.

CUADRO III

|    |          | x2    |         |      |
|----|----------|-------|---------|------|
|    |          | Oeste | Central | Este |
| x1 | Proximal | 1,48  | 0,96    | 0,25 |
|    | Media    | 2,92  | 1,96    | 0,62 |
|    | Distal   | 3,86  | 2,33    | 1    |

CUADRO IV

|    |          | x2    |         |      |
|----|----------|-------|---------|------|
|    |          | Oeste | Central | Este |
| x1 | Proximal | 6     | 4       | 3,5  |
|    | Media    | 10    | 6       | 6,7  |
|    | Distal   | 15,5  | 12      | 11,3 |

CHUECA CIA

sal-microlocalización si pueden ser consideradas válidas (cuadro II; niveles de significación del 0,01 y 0,02, respectivamente). La tendencia hacia valores más elevados de cubrimiento en los extremos distal y occidental del glaciar rocoso [tablas de incidencia  $x_1-x_3$  (cuadro V) y  $x_2-x_3$  (cuadro VI)], independientemente de la microlocalización de los puntos de muestreo, se hace bien patente. Se confirma igualmente la preferencia de los líquenes, en el proceso de colonización, por un asentamiento prioritario en las paredes de los cordones, fenómeno posiblemente ligado al desarrollo estacional de un potente manto nivoso sobre las crestas y fondos de los surcos. La triple interacción  $x_1-x_2-x_3$  alcanza también valores significativos (0,02; cuadro II), viniendo a representar una amalgama de las combinaciones anteriores [tabla de incidencia  $x_1-x_2-x_3$  (cuadro VII)].

CUADRO V

|    |          | x3             |              |            |
|----|----------|----------------|--------------|------------|
|    |          | Pl. sup. cord. | Pared. cord. | Fondo dep. |
| x1 | Proximal | 4,42           | 4,66         | 4          |
|    | Media    | 7,28           | 7,4          | 7          |
|    | Distal   | 12,25          | 16           | 11,3       |

CUADRO VI

|    |         | x3             |              |            |
|----|---------|----------------|--------------|------------|
|    |         | Pl. sup. cord. | Pared. cord. | Fondo dep. |
| x2 | Oeste   | 9,2            | 12,14        | 10,66      |
|    | Central | 6,57           | 6            | 6,5        |
|    | Este    | 6,5            | 7,2          | 5,42       |

De cara a confirmar los resultados obtenidos en el análisis de la varianza, procedimos a efectuar a todos los grupos implicados ( $x_1, x_2, x_3$ ) – para cada una de las variables dependientes – un test no-paramétrico de significación, eligiendo para ello el test de Kruskal-Wallis por su facilidad de aplicación y relativamente elevada potencia. El test  $H$  de Kruskal-Wallis es una forma de análisis de la varianza en una sola dirección para datos ordinales que se utiliza para discernir si  $k$  muestras independientes proceden de una misma población. El test se lleva a cabo sumando los rangos dentro de cada uno de los  $k$  grupos para obtener un conjunto de sumas de rangos ( $R_j$ ) para cada grupo. Los valores  $R$  así obtenidos se incluyen en la ecuación que define el estadístico:

$$H = 12 / ns (ns + 1) \sum_{i=1}^k R_i^2 / n_i - 3 (n_s + 1)$$

PAUTAS DE FLUJO EN UN GLACIAR ROSOSO ACTIVO

donde  $n_g$  es el número total de observaciones y  $n_i$  el número dentro de cada grupo. Cuando existen más de cinco observaciones en cada grupo el test adopta la distribución de ji-cuadrado con  $k - 1$  grados de libertad. Si las diferencias entre grupos son elevadas los valores de  $H$  se hacen mayores, rechazándose la  $H_0$  si llega a superarse el valor crítico correspondiente al nivel de significación dado. En nuestro caso, los resultados de la aplicación del test de Kruskal-Wallis para las dos variables dependientes aparecen en el cuadro VIII, con indicación de grados de libertad, número de grupos y casos, el valor de  $H$  corregido para observaciones de iguales resultados y la correspondiente significación estadística.

CUADRO VII

|    |          | Oeste          |              |            | Central        |              |            | Este           |              |            |
|----|----------|----------------|--------------|------------|----------------|--------------|------------|----------------|--------------|------------|
|    |          | Pl. sup. cord. | Pared. cord. | Fondo dep. | Pl. sup. cord. | Pared. cord. | Fondo dep. | Pl. sup. cord. | Pared. cord. | Fondo dep. |
| x1 | Proximal | 6              | 6            | 6          | 4,33           | 3,5          | 4          | 3              | 4,5          | 3,33       |
|    | Media    | 11             | 9            | 11         | 6,33           | 5            | 6          | 7              | 7            | 6,33       |
|    | Distal   | 11,5           | 18,3         | 15         | 14             | 12           | 10         | 12             | 13           | 9          |

CUADRO VIII

|              | y1     |        |            | y2     |        |            |
|--------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|
|              | x1     | x2     | x3         | x1     | x2     | x3         |
| Grados lib.  | 2      | 2      | 2          | 2      | 2      | 2          |
| Nº grupos    | 3      | 3      | 3          | 3      | 3      | 3          |
| Nº casos     | 48     | 48     | 48         | 48     | 48     | 48         |
| H corregido  | 16.323 | 33.734 | 1.431      | 36.157 | 10.518 | 1.044      |
| Probabilidad | 0,001  | 0,001  | No signif. | 0,001  | 0,01   | No signif. |

tica, en cada uno de los grupos implicados.

Como puede apreciarse, y en total correspondencia con los resultados obtenidos tras efectuar el correspondiente análisis de la varianza, la aceptación de la  $H_1$  (que establece la existencia de diferencias significativas en las muestras, no atribuibles a mecanismos aleatorios ni al azar) es un hecho tan sólo en el caso de los valores de ubicación longitudinal [tanto en el caso de los diámetros mayores medidos de *Rhizocarpon*, como en el de los porcentajes de cubrimiento (con niveles de significación del 0,001)], y transversal (con niveles de significación del 0,001 y del 0,01, respectivamente). Los reducidos valores del estadístico  $H$  para el factor microlocalización, por contra, no permiten incluirlo con fiabilidad dentro de la región de rechazo.

#### 4.2. Cartografía de líneas de flujo superficial inferido

La elaboración de este apartado –complementario al análisis estadístico

ofrecido en la sección anterior— hace visibles, de un modo más gráfico, los resultados obtenidos tras llevar a cabo el análisis liquenométrico. A partir de la construcción de los mapas de isopletas correspondientes a los valores de diámetro mayor de *Rhizocarpon* (Fig. 5 A) y porcentaje de cubrimiento (Fig. 5 B) presentes en cada uno de los 48 puntos de control homogéneamente repartidos a lo largo del glaciar rocoso, pueden inferirse con una considerable precisión sus pautas de flujo superficial.

El examen de las dos figuras confirma —de un modo cualitativo— las tendencias descubiertas en el estudio numérico-estadístico. Queda así claro el desarrollo espacial diferenciado de las especies analizadas, y el sesgo que éste adopta hacia valores bajos (representados por valores entre 0,1 y 1,5 cm de diámetro mayor, y porcentajes de cubrimiento del 2 al 8 %) en gran parte del sector oriental. La pauta global decreciente, en las dos variables analizadas, hacia el sector proximal del glaciar rocoso es bien conocida, y muy a menudo aparece citada en la bibliografía (v. comentarios al respecto en INNES, J. L., 1985 a), siendo reflejo de las peculiares condiciones dinámicas de los glaciares rocosos y del diferente lapso de tiempo existente en los procesos de colonización que suelen permitir un mayor crecimiento y presencia de los líquenes en los sectores más antiguos estabilizados ya relativamente. La aparición de una cierta inversión en esta tendencia, bien aparente en los puntos de control localizados

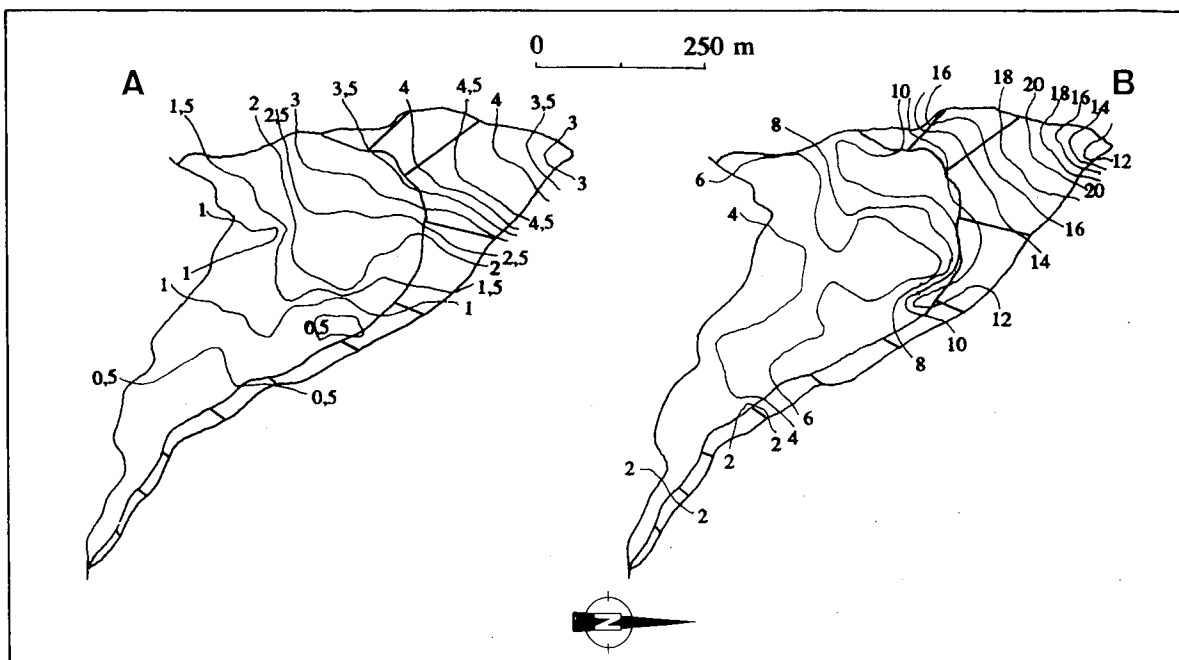


Fig. 5.- Cartografía de líneas de flujo superficial inferido. Mapas de isopletas: A.- Valores de diámetro mayor de *Rhizocarpon geographicum* (s.l.) en cm. B.- Porcentaje de cubrimiento.



en el extremo distal del glaciar rocoso es sinónimo de dinamismo, y refleja la movilidad presente o subactual de su frente.

#### 4.3. *Comportamiento dinámico del glaciar rocoso de Skjöldalur*

Tras el análisis conjunto de los datos estadísticos y de la plasmación cartográfica de las líneas de flujo inferidas, se hace evidente la existencia — presumiblemente actual— de un notable grado de actividad en el glaciar rocoso de Skjöldalur I. La funcionalidad de esta morfología parece clara, y está ligada a una serie de elementos significativos que colaboran en su dinamismo [de hecho, en el valle inmediatamente adyacente al lugar de asentamiento del glaciar rocoso objeto de estudio, y con similar altura y exposición, se localiza el g.r. Skjöldalur II, objeto desde hace años de una intensa monitorización por parte de miembros del Departamento de Geografía de la *Queen's University* de Belfast, en el que se han obtenido valores de desplazamiento anuales de  $<0,25$  m año<sup>-1</sup> (WHALLEY, W. B., comunic. personal; WHALLEY, W. B. y MARTIN, H. E., 1991)]; presencia localizada de un núcleo interno de hielo en varios sectores del glaciar rocoso, inexistencia casi total de vegetación, profusión de microdeslizamientos-desprendimientos desarrollados sobre el talud frontal, etc.

Dos son las causas básicas —conjugables entre sí— que pueden ayudar a explicar las diferencias identificadas en el comportamiento dinámico del glaciar

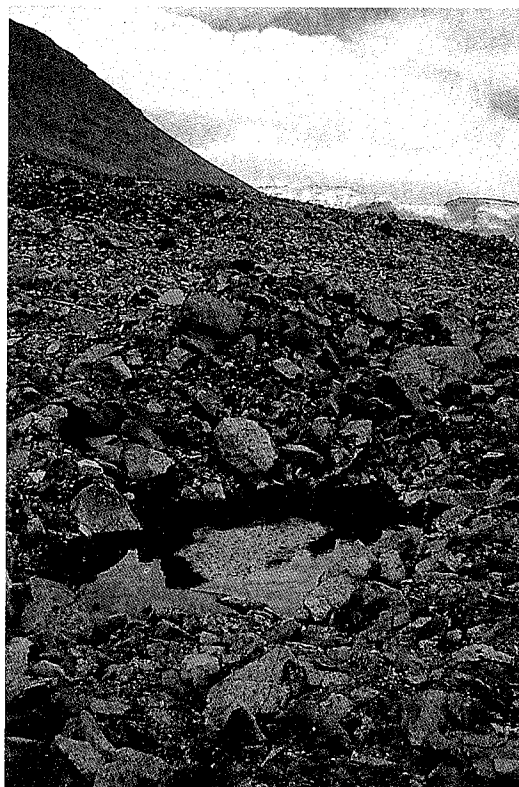


Foto 6.- Afloramiento en superficie del núcleo interno de hielo; sector proximal.

rocoso de Skjöldalur I. En primer lugar, la distribución irregular del núcleo interno de hielo a lo largo de su superficie. En segundo, la presencia de un menor espesor del manto de derrubios a lo largo de su sector oriental. Creemos que los aspectos relacionados con factores de localización (orientación, exposición, microtopografía) y sus repercusiones en el incremento de los mecanismos de



Foto 7.- Glaciar rocoso de Skjöldalur I.

ablación pueden ser rechazados, al mostrar caracteres y respuestas homogéneos en la práctica totalidad del glaciar rocoso.

El examen de la figura 3 —en la que se ha cartografiado la aparición del núcleo interno de hielo— confirma la hipótesis de su distribución irregular (o, cuando menos, de su afloramiento dispar en superficie). El hecho de que la mayor concentración visible de hielo (Foto 6) se sitúe en la franja oriental del glaciar rocoso (de hecho, más del 80 % del total de afloramientos), indica la posibilidad de una posible mejor conservación del hielo —mecanismo desencadenante y primario de flujo, por otra parte— en ese sector, a la que habría que asociar el inferido desplazamiento diferencial observado en superficie. En este sentido, la presencia de un manto cobertor de derrubios de menor espesor localizado en el mismo tramo oriental podría haber favorecido el desarrollo de una dinámica particular. La menor potencia del depósito en esta zona parece claramente ligada a la ubicación del glaciar rocoso dentro del circo. La configuración topográfica de éste (Fig. 2) es claramente disimétrica, y el

alejamiento del sector oriental del g.r. de su área de alimentación —representada por los taludes laterales de la pared interna del circo— es obvia.

Por otro lado, es también sintomática la aparición de un canal de drenaje lateral muy continuo, alimentado por las aguas de fusión (visible en la fotografía 7 y cartografiado en la figura 3), en el sector oriental del glaciar rocoso, y totalmente independiente del principal. Este último drena con discontinuidades el sector central del glaciar rocoso; de hecho, en un determinado punto cercano ya a su extremo distal, el canal desaparece, para volver a surgir aproximadamente hacia la mitad del talud frontal. Por contra, el canal lateral fluye de forma continua a lo largo de todo su curso, atravesando sin alteraciones el talud oriental, hasta enlazar con el principal poco más adelante. El flujo de estos canales marca con casi total certeza la delimitación en profundidad del núcleo interno de hielo, y confirmaría la existencia de importantes diferencias en el grado de desarrollo de la cubierta de derrubios —con las repercusiones obvias en lo que a un desplazamiento no-homogéneo se refiere— a lo largo de la superficie del glaciar rocoso.

## 5. Conclusiones

La aplicación de técnicas liquenométricas al estudio del glaciar rocoso de Skjöldalur I ha permitido determinar de modo preciso las pautas principales de flujo presentes en su superficie. Las limitaciones del análisis —expuestas en los apartados de taxonomía y metodología— hacen necesario el trabajar con una densa malla de localidades de estudio que permita el aporte de suficiente número de datos como para que los resultados del tratamiento estadístico posterior sean convenientemente significativos. Este se ha centrado en dos direcciones independientes pero complementarias: un análisis de la varianza tri-direccional y la aplicación del test no-paramétrico de Kruskal-Wallis. El examen de los resultados numéricos y gráficos obtenidos por esta vía, y la conjunción con los datos aportados tras la elaboración de la correspondiente cartografía de isopleas, permite confirmar la tendencia actual del glaciar rocoso hacia un flujo más activo en su margen oriental, posiblemente en relación con la mejor conservación del núcleo interno de hielo en ese sector, o con la presencia localizada de un manto de derrubios de menor potencia.

## Referencias bibliográficas

- ANDRE, M. F. (1986). Dating slope deposits and estimating rates of rock wall retreat in northwest Spitsbergen by lichenometry, *Geografiska Annaler*, 68A, pp. 65-75.
- BALLANTYNE, C. K. (1990). The Holocene glacial history of Lyngshalvöya, northern Norway: chronology and climatic implications, *Boreas*, 19, pp. 93-117.
- BENEDICT, J. B. (1988). Techniques in lichenometry: identifying the yellow rhizocarpons, *Arctic and Alpine Research*, 20, 3, pp. 285-291.

- BENEDICT, J. B. (1990). Lichen mortality due to late-lying snow: results of a transplant study, *Arctic and Alpine Research*, 22, 1, pp. 81-89.
- CARROLL, T. (1974). Relative dating techniques: a late quaternary chronology, Arikaree Cirque, Colorado, *Geology*, 2, pp. 321-325.
- CASELDINE, C. J. (1985). Survey of Gljúfurárjökull and features associated with a glacier burst in Gljúfurárdalur, Northern Iceland, *Jökull*, 35, pp. 61-68.
- CASELDINE, C. J. (1987). Neoglacial glacier variations in Northern Iceland: examples from the Eyjafjörður area, *Arctic and Alpine Research*, Vol. 19, 3, pp. 296-304.
- CASELDINE, C. J. (1988). Fluctuations of Gljúfurárjökull, Northern Iceland 1983-1987, *Jökull*, 38, pp. 33-34.
- CHUECA, J. (1990 a). Análisis geomorfológico de la fenomenología glacial y periglacial en el Macizo del Turbón-Sierra de Ballabriga (Pirineo oscense), Memoria de Licenciatura, Universidad de Zaragoza, 245 pp. (+ anexo cartográfico).
- CHUECA, J. (1990 b). Aplicación de técnicas liquenométricas para la determinación de líneas de flujo diferencial en un glaciar rocoso activo (Skjöldalur, Islandia), Panel-comunicación presentado a la I Reunión Nacional de Geomorfología, Teruel.
- CHUECA, J. (1991). El sistema de *protales ramparts* de la Coma de San Adrián (Macizo del Turbón, Huesca): caracterización cronológica mediante la utilización de técnicas liquenométricas, *Actas XIV Encuentro Jóvenes Geógrafos*, Zaragoza, pp. 114-128.
- CHUECA, J. y JULIAN, A. (1991). A lichen growth curve for the Benasque valley, Spanish Central Pyrenees, *Boreas*, (en prensa).
- DOWDESWELL, J. A. (1982). Relative dating of Late Quaternary deposits using cluster and discriminant analysis, Audubon Cirque, Mt. Audubon, Colorado Front Range, *Boreas*, 11, pp. 151-161.
- DOWDESWELL, J. A. (1984). Late quaternary chronology for the Watts Bay area, Frobisher Bay, southern Baffin Island, N.W.T., Canada, *Arctic and Alpine Research*, 16, 3, pp. 311-320.
- DOWDESWELL, J. A. y MORRIS, S. E. (1983). Multivariate statistical approaches to the analysis of late Quaternary relative age data, *Progress in Physical Geography*, 7, pp. 157-176.
- DUFORD, J. M. y OSBORN, G. D. (1978). Holocene and Pleistocene cirque glaciations in the Shuswap Highland, British Columbia, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, pp. 865-873.
- EYLES, N. (1978). Rock glaciers in Esjufljöll Nunatak Area, South-East Iceland, *Jökull*, 28, pp. 53-56.
- GORDON, J. E. y SHARP, M. (1983). Lichenometry in dating recent glacial landforms and deposits, southeast Iceland, *Boreas*, 12, pp. 191-200.
- HAINES-YOUNG, R. H. (1983). Size variations of *Rhizocarpon* on moraine slopes in southern Norway, *Arctic and Alpine Research*, 15, 3, pp. 295-305.
- HARBOR, J. M. (1986). A comment on certain multivariate techniques used in the analysis of late Quaternary relative age data, *Progress in Physical Geography*, 10, 2, pp. 215-225.
- INNES, J. L. (1982). Lichenometric use of an aggregated *Rhizocarpon* 'species', *Boreas*, 11, pp. 53-57.
- INNES, J. L. (1983 a). Size frequency distributions as a lichenometric technique: an assessment, *Arctic and Alpine Research*, 15, 3, pp. 285-294.
- INNES, J. L. (1983 b). Use of an aggregated *Rhizocarpon* 'species' in lichenometry: an evaluation, *Boreas*, 12, pp. 183-190.
- INNES, J. L. (1984). The optimal sample size in lichenometric studies, *Arctic and Alpine Research*, 16, 2, pp. 233-244.
- INNES, J. L. (1985 a). Lichenometry, *Progress in Physical Geography*, 9, pp. 187-254.

PAUTAS DE FLUJO EN UN GLACIAR ROSOSO ACTIVO

- INNES, J. L. (1985 b). A standard *Rhizocarpon* nomenclature for lichenometry, *Boreas*, 14, pp. 83-85.
- INNES, J. L. (1985 c). An examination of some factors affecting the largest lichens on a substrate, *Arctic and Alpine Research*, 17, 1, pp. 99-106.
- INNES, J. L. (1986 a). Influence of sampling design on lichen size-frequency distributions and its effect on derived lichenometric indices, *Arctic and Alpine Research*, 18, 2, pp. 201-208.
- INNES, J. L. (1986 b). Dating exposed rock surfaces in the Arctic by lichenometry: the problem of thallus circularity and its effect on measurement errors, *Arctic*, 39, 3, pp. 253-259.
- INNES, J. L. (1986 c). The use of percentage cover measurements in lichenometric dating, *Arctic and Alpine Research*, 18, 2, pp. 209-216.
- LOCKE, W. W. III (1983). Discussion of 'Size frequency distributions as a lichenometric technique: an assessment' by J. L. Innes, *Arctic and Alpine Research*, 15, p. 419.
- LOCKE, W. W. III, ANDREWS, J. T. y WEBBER, P. J. (1979). A manual for lichenometry, British Geomorphological Research Group Technical Bulletin, 26, 47 pp.
- LUCKMAN, B. H. (1977). Lichenometric dating of Holocene moraines at mount Edith Cavell, Jasper, Alberta, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14, pp. 1.809-1.822.
- MAIZELS, J. K. y DUGMORE, A. J. (1985). Lichenometric dating and tephrochronology of sandur deposits, Sólheimajökull area, Southern Iceland, *Jökull*, 35, pp. 69-77.
- MILLER, C. D. (1979). A statistical method for relative-age dating of moraines in the Sawatch Range, Colorado, *Geological Soc. of America Bull.*, I, 90, pp. 1153-1164.
- PARSON, C. G. (1987). Rock glaciers and site characteristics on the Blanca Massif, Colorado, U.S.A.; en Giardino, Shroder y Vitek (eds.), *Rock glaciers*, Allen y Unwin, Londres, 406 p.
- POELT, J. (1988). *Rhizocarpon* Ram. em. Th. Fr. subgen. *Rhizocarpon* in Europe, *Arctic and Alpine Research*, 20, 3, pp. 292-298.
- POTTER, S. G. (1972). Ice-cored rock glacier, Galena Creek, northern Absaroka Mountains, Wyoming, *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 83(10), pp. 3.025-3.057.
- RUNEMARK, H. (1956). Studies in *Rhizocarpon*. I: taxonomy of the yellow species in Europe; II: distribution and ecology of the yellow species in Europe, *Opera Botanica*, 2, 1-2.
- THOMPSON, A. y JONES, A. (1986). Rates and causes of proglacial river terrace formation in southeast Iceland: an application of lichenometric dating techniques, *Boreas*, 15, pp. 231-246.
- THOMSON, J. W. (1967). Notes on *Rhizocarpon* in the arctic, *Nova Hedwigia*, 14, pp. 421-481.
- WAHRHAFTIG, C. y COX, A. (1959). Rock glaciers in the Alaska Range, *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 70, pp. 383-436.
- WERNER, A. (1990). Lichen growth rates for the northwest coast of Spitsbergen, Svalbard, *Arctic and Alpine Research*, 22, 2, pp. 129-140.
- WHALLEY, W. B. y MARTIN, H. E. (1991). Rock glaciers. Part II: Models and mechanisms, *Progress in Physical Geography*, (en prensa).

