



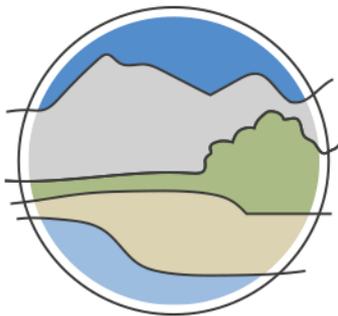
# SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES ECOLÓGICAS QUE PERMITAN DIAGNOSTICAR EL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA 'ESTRUCTURA Y FUNCIÓN' DE LOS TIPOS DE HÁBITAT ROCOSOS Y GLACIARES

Augusto Pérez-Alberti



Madrid, 2019





SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES  
ECOLÓGICAS QUE PERMITAN DIAGNOSTICAR EL  
ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA 'ESTRUCTURA Y  
FUNCIÓN' DE LOS TIPOS DE HÁBITAT ROCOSOS Y  
GLACIARES





Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización.

El presente documento fue realizado en el marco del proyecto *Establecimiento de un sistema estatal de seguimiento del Estado de Conservación de los Tipos de Hábitat en España*, promovido y financiado por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, desarrollado entre 2015 y 2017.

#### **Dirección técnica del proyecto**

Rafael Hidalgo Martín<sup>1</sup>

#### **Realización y producción**

Tragsatec

#### **Coordinación general**

Elena Bermejo Bermejo<sup>2</sup> y Juan Carlos Simón Zarzoso<sup>2</sup>

#### **Autor**

Augusto Pérez Alberti<sup>3</sup>

#### **Coordinación y revisión editorial**

Jara Andreu Ureta<sup>2</sup>

Íñigo Vázquez-Dodero Estevan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental. Ministerio para la Transición Ecológica

<sup>2</sup> Tragsatec. Grupo Tragsa

<sup>3</sup> CRETUS. Universidade de Santiago de Compostela

#### **A efectos bibliográficos la obra debe citarse como sigue:**

Pérez-Alberti A. 2019. Selección y descripción de variables ecológicas que permitan diagnosticar el estado de conservación de la 'Estructura y función' de los tipos de hábitat rocosos y glaciares. Serie "Metodologías para el seguimiento del estado de conservación de los tipos de hábitat". Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid. 27 pp.

Las opiniones que se expresan en esta obra no representan necesariamente la posición del Ministerio para la Transición Ecológica. La información y documentación aportadas para la elaboración de esta monografía son responsabilidad exclusiva de los autores.



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

#### **Edita:**

© Ministerio para la Transición Ecológica

Secretaría General Técnica

Centro de Publicaciones

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 638-19-088-X

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES COMUNES PARA FORMACIONES SUPERFICIALES (CAMPOS, LADERAS Y RÍOS DE BLOQUES, GLACIARES ROCOSOS, MORRENAS DE NEVERO Y TALUDES DE DERRUBIOS) .....</b>	<b>8</b>
2.1. Composición granulométrica .....	8
2.2. Grado de cobertura y diversidad vegetal .....	9
<b>3. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES ESPECÍFICAS PARA GLACIARES ROCOSOS Y TALUDES DE DERRUBIOS.....</b>	<b>9</b>
3.1. Dinámica de la ladera .....	9
<b>4. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES ESPECÍFICAS PARA GLACIARES ROCOSOS ACTIVOS .....</b>	<b>10</b>
4.1. Respuesta térmica de la superficie e interior del glaciar rocoso .....	10
<b>5. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES ESPECÍFICAS PARA LADERAS Y SALIENTES ROCOSOS .....</b>	<b>10</b>
5.1. Tasa de alteración .....	11
5.2. Cobertura vegetal.....	12
<b>6. VARIABLES ESPECÍFICAS PARA LADERAS Y SALIENTES CON FUERTE PENDIENTE EN CAÑONES, HOCES Y DOLINAS .....</b>	<b>12</b>
6.1. Análisis sobre paredes verticales.....	15
6.2. Seguimiento continuado a partir de fotografías oblicuas de alta resolución .....	15
6.3. Cartografía de los cambios en la presencia de plantas con ayuda de UAV .....	16
<b>7. SISTEMA INTEGRADO DE EVALUACIÓN LOCAL DE SISTEMAS ROCOSOS .....</b>	<b>16</b>
<b>8. VARIABLES ESPECÍFICAS PARA GLACIARES PERMANENTES .....</b>	<b>19</b>
8.1. Balance de masa .....	19
8.1.1. Estimación del balance de masa.....	19
8.2. Cambios de longitud, superficie y volumen ocurridos en el pasado.....	21
8.2.1. Estimación de los cambios en superficie y longitud.....	21
8.2.2. Estimación de los cambios en profundidad.....	21
8.3. Sensibilidad del glaciar al clima.....	22
8.4. Variaciones geométricas.....	22
<b>9. REFERENCIAS .....</b>	<b>23</b>
Bibliografía adicional de interés.....	23





## 1. INTRODUCCIÓN

El artículo 1.e de la Directiva Hábitats<sup>1</sup> define el estado de conservación de un tipo de hábitat como “el conjunto de las influencias que actúan sobre el hábitat natural de que se trate y sobre las especies típicas asentadas en el mismo y que pueden afectar a largo plazo a su distribución natural, su estructura y funciones, así como a la supervivencia de sus especies típicas en el territorio a que se refiere el artículo 2”.

A este efecto, el artículo 1 apartado e) establece que “el estado de conservación de un hábitat natural se considerará favorable cuando” se cumplan simultáneamente los tres criterios siguientes:

- su área de distribución natural y las superficies comprendidas dentro de dicha área sean estables o se amplíen;
- la estructura y las funciones específicas necesarias para su mantenimiento a largo plazo existan y puedan seguir existiendo en un futuro previsible;
- el estado de conservación de sus especies típicas sea favorable con arreglo a la letra i del artículo 1, que establece que el estado de conservación de una especie se considerará favorable cuando se cumplan simultáneamente los tres criterios siguientes:
  - los datos sobre la dinámica de las poblaciones de la especie en cuestión indiquen que la misma sigue y puede seguir constituyendo a largo plazo un elemento vital de los hábitats naturales a los que pertenezca;
  - el área de distribución natural de la especie no se esté reduciendo ni amenace con reducirse en un futuro previsible;
  - exista y probablemente siga existiendo un hábitat de extensión suficiente para mantener sus poblaciones a largo plazo.

Por ‘estructura’ de un tipo de hábitat se entiende el conjunto de componentes físicos del mismo, tanto elementos estructurales inertes (por ejemplo, los bloques de un canchal, la forma de un acantilado o plataforma rocosa o un domo granítico) como especies vivas (árboles, matorrales, etc.) o muertas (troncos muertos, etc.). Las ‘funciones’ del tipo de hábitat hacen referencia a los procesos ecológicos que ocurren en él, tanto en su dimensión espacial como temporal.

---

<sup>1</sup> Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres



## 2. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES COMUNES PARA FORMACIONES SUPERFICIALES (CAMPOS, LADERAS Y RÍOS DE BLOQUES, GLACIARES ROCOSOS, MORRENAS DE NEVERO Y TALUDES DE DERRUBIOS)

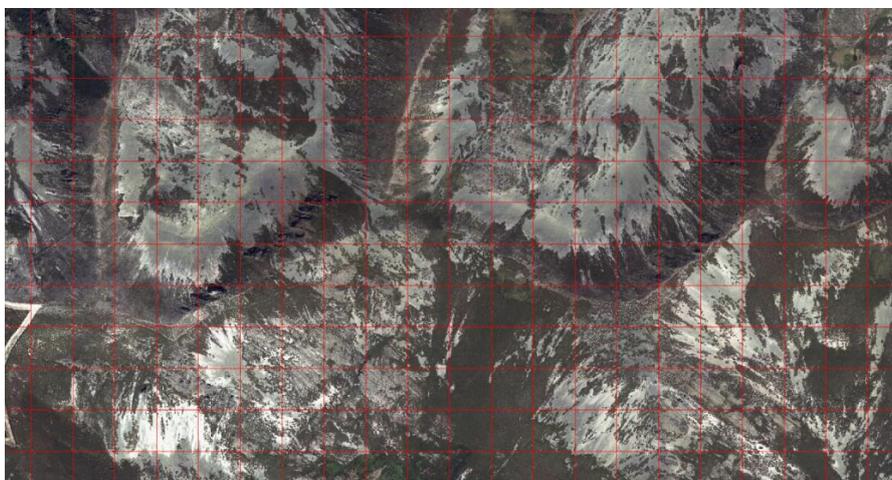
En el seguimiento de los ecosistemas asociados a desprendimientos rocosos hay que tener presente:

- Su composición granulométrica, dado que el tamaño de los clastos condiciona los procesos de formación de suelo.
- Su grado de estabilidad de la ladera, porque a mayor estabilidad, mayor posibilidad de enraizamiento de las plantas.
- En relación con lo anterior, los cambios en la cobertura vegetal.
- En el caso de los glaciares rocosos, las condiciones térmicas a nivel de superficie y en profundidad.

### 2.1. Composición granulométrica

El tamaño de los sedimentos influye fuertemente en las posibilidades de enraizamiento de las plantas.

- **Métrica:** creación de una malla de parcelas de 100 m de ancho (Figura 1). Medida del tamaño de, por lo menos, 25 bloques en la parte superior, media e inferior de una o varias parcelas seleccionadas en función de la diversidad granulométrica. Cada bloque debe ser georreferenciado con GPS (del inglés *Global Positioning System*) y se deben integrar los datos georreferenciados en un Sistema de Información Geográfica (en adelante GIS, del inglés *Geographic Information System*).
- **Procedimiento de medición:** se realizará con una cinta métrica de las de tres ejes: largo, ancho y alto.
- **Periodicidad:** al tratarse de una medida para poder conocer las características del lugar se realizará únicamente la primera vez.



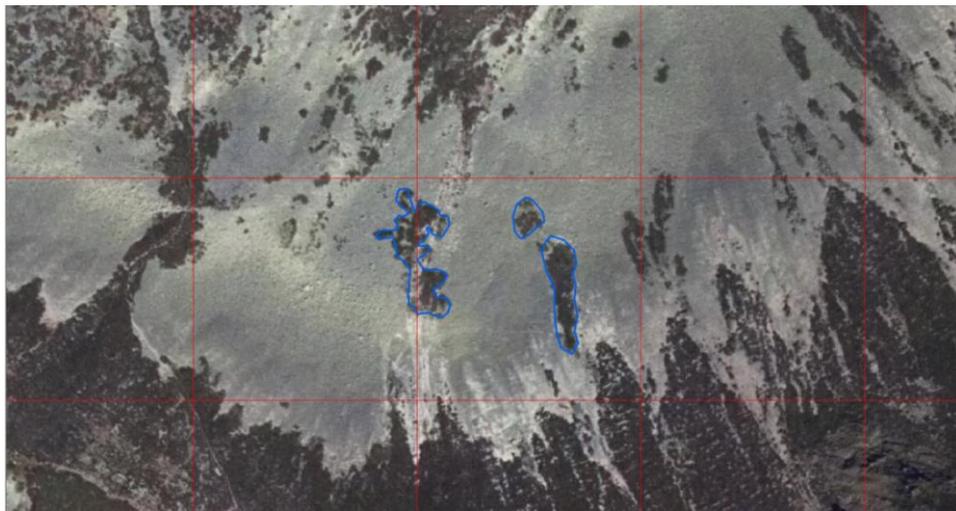
**Figura 1** Malla de parcelas de 100 m de lado. Sierra de Gistredo (León). Escala 1:5.000. Fuente: elaboración propia a partir de ortofotografía del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).



## 2.2. Grado de cobertura y diversidad vegetal

La cobertura vegetal de estos tipos de ecosistema es de gran utilidad para conocer su dinamismo y evolución biogeográfica.

- **Métrica:** cartografía mediante GIS de la vegetación existente en cada parcela seleccionada anteriormente. Determinación de especies sobre el terreno.
- **Procedimiento de medición:** digitalización sobre ortofotografías (Figura 2). La cartografía mediante GIS permite saber la extensión de la cobertura vegetal en cada momento.
- **Periodicidad:** 5 años.



**Figura 2** Sierra de Gistredo (León). Fuente: elaboración propia a partir de digitalización sobre ortofotografía del PNOA.

## 3. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES ESPECÍFICAS PARA GLACIARES ROCOSOS Y TALUDES DE DERRUBIOS

### 3.1. Dinámica de la ladera

Mientras que los campos, laderas y ríos de bloques son, en su mayoría, formas fósiles, existen glaciares rocosos y, especialmente, taludes de derrubios que están activos en la actualidad y presentan rasgos de movilidad.

- **Métrica:** instalación de varillas.
- **Procedimiento de medición:** para el control del movimiento se recomiendan técnicas geomáticas. La medición del movimiento se debe realizar mediante la instalación de varillas instaladas sobre la superficie del glaciar rocoso emplazadas en perpendicular al flujo, a lo ancho del glaciar rocoso o el talud de derrubios. Posteriormente se mide la posición de las varillas mediante la técnica de GPS diferencial.
- **Periodicidad:** 5 años.



## 4. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES ESPECÍFICAS PARA GLACIARES ROCOSOS ACTIVOS

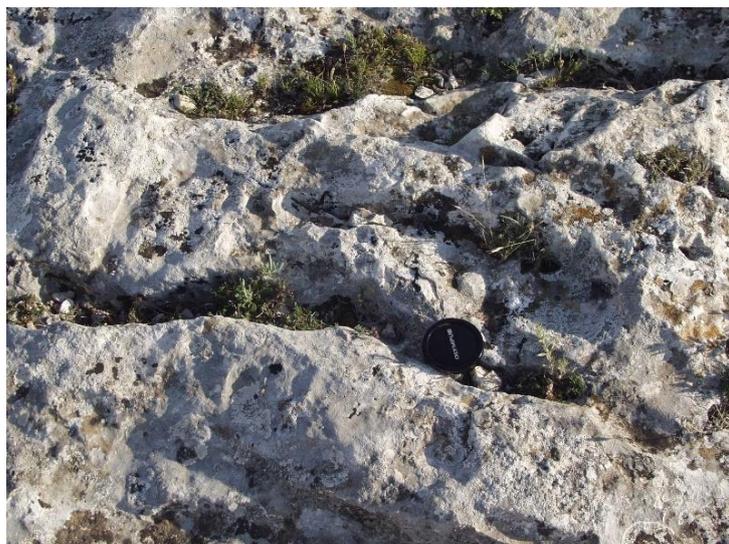
### 4.1. Respuesta térmica de la superficie e interior del glaciar rocoso

- **Métrica:** seguimiento de la temperatura en superficie y en profundidad del glaciar rocoso.
- **Procedimiento de medición:** mediciones de la temperatura basal del manto nival (BTS, del inglés *Basal Temperature of Snow*), mediante termómetros y la monitorización del régimen térmico del suelo, mediante la instalación de termo-registradores continuos con el fin de conocer las condiciones térmicas actuales del suelo en el glaciar rocoso.
- **Periodicidad:** anual.

## 5. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES ESPECÍFICAS PARA LADERAS Y SALIENTES ROCOSOS

Frente a los desprendimientos que están caracterizados por clastos, estabilizados o no, los afloramientos rocosos son geoformas estáticas que evolucionan en relación con el balance edafogénesis/morfogénesis, es decir, por procesos en los que domina la alteración química o en aquellos en los que la erosión es la dominante. Cuando el balance entre una u otra es nulo, hablamos de estabilidad del sistema.

A lo anterior hay que añadirle que, en general, la posibilidad de enraizamiento de las plantas es escaso dada la falta de suelo, a excepción de aquellos lugares en los que las discontinuidades presentes en las rocas, creó micro-ambientes en los que se pudo acumular suelo, es el caso de fracturas o marmitas (Figura 3).



**Figura 3** Canales abiertos a partir de la fracturación de la roca con vegetación en Penedos de Pasarela (Vimianzo, A Coruña; izquierda). Colonización vegetal sobre lapiares (Aragón; derecha). Autor: Augusto Pérez Alberti.



En las rocas básicas, que son muy poco abundantes en España y que están presentes en la Serra da Capelada (A Coruña; Figura 4), o en Sierra Bermeja (Málaga), su composición mineralógica ferromagnesiana, da lugar a procesos de alteración singulares y a la presencia de suelos con características ándicas lo que influye fuertemente en la cobertura vegetal que obligan a darle un tratamiento diferencial. Lo mismo ocurre con las rocas calizas en las que domina la disolución.



**Figura 4** Formas modeladas sobre rocas básicas. Serra da Capelada (A Coruña). Autor: Augusto Pérez Alberti.

## 5.1. Tasa de alteración

- **Métrica:** instalación de TMEN (del inglés *Transverse micro-erosion meter*).
- **Procedimiento de medición:** instalación de estaciones de control de erosión superficial con un medidor de micro erosión o, si no es posible, con un durómetro. En cualquier caso, es preciso seleccionar una parcela de 50x50 m. En ella, mediante un taladro se abren tres agujeros que se rellenan de resina sobre la que se clavan tres tornillos de latón, de remate redondo que deben de quedar por debajo de la superficie de la roca. Sobre ellos se emplazará posteriormente el TMEN con sus tres patas. Cada una de ellas tiene un remate diferente para poder identificarlas y poder colocarlas siempre en el mismo lugar. La metodología sobre el TMEN se puede obtener en Trenhaile & Lakhan (2011). La referente al durómetro *Equotip*, por ejemplo, en Pérez-Alberti *et al.* (2013).
- **Periodicidad:** 5 años.



## 5.2. Cobertura vegetal

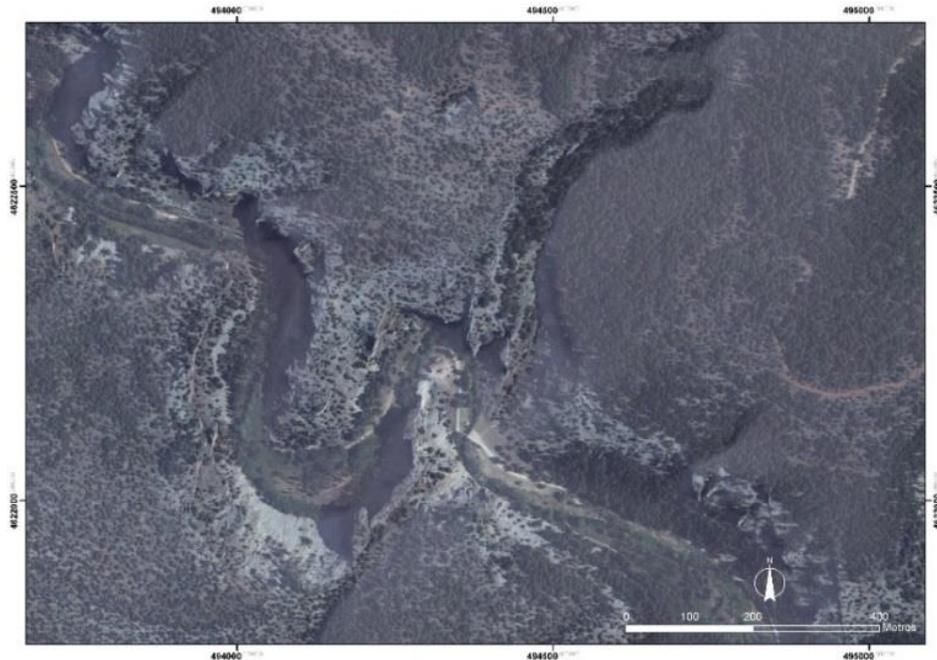
- **Métrica:** inventarios florísticos por parcelas.
- **Procedimiento de medición:** sobre las superficies rocosas lo más relevante es la cobertura isquémica. Los líquenes se pueden usar como bioindicadores de la contaminación medioambiental, de los cambios climáticos y de la estabilización del suelo de la superficie de los afloramientos. Al mismo tiempo es fundamental también controlar las comunidades rupícolas sobre cualquier tipo de afloramiento. Para ellos se llevarán a cabo inventarios florísticos en parcelas para determinar el grado de cubrimiento.
- **Periodicidad:** 5 años.

## 6. VARIABLES ESPECÍFICAS PARA LADERAS Y SALIENTES CON FUERTE PENDIENTE EN CAÑONES, HOCES Y DOLINAS

Cuando se trata de hacer un seguimiento a ecosistemas que se desarrollan sobre formas en las que domina las laderas con fuertes pendientes, aunque las variables sean las mismas, es muy difícil emplear las mismas técnicas. Si se observan las figuras que aparecen a continuación, de los cañones del Rudrón (Figura 5), en Burgos, del Río Lobos (Figura 6), en Soria, o de las Hoces del Duratón (Figura 7), en Segovia, se puede entender la dificultad de llevar a cabo un seguimiento similar al de otros ecosistemas rocosos.



**Figura 5** Cañón del Río Rudrón (Burgos). Fuente: elaboración propia a partir de ortofotografía del PNOA.

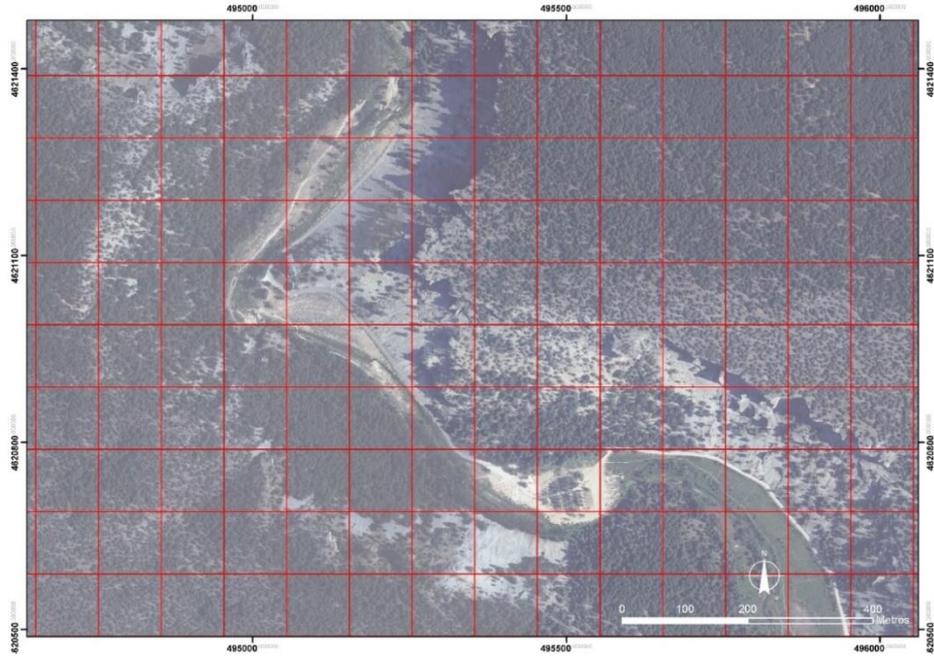


**Figura 6** Cañón del Río Lobos (Soria). Fuente: elaboración propia a partir de ortofotografía del PNOA.

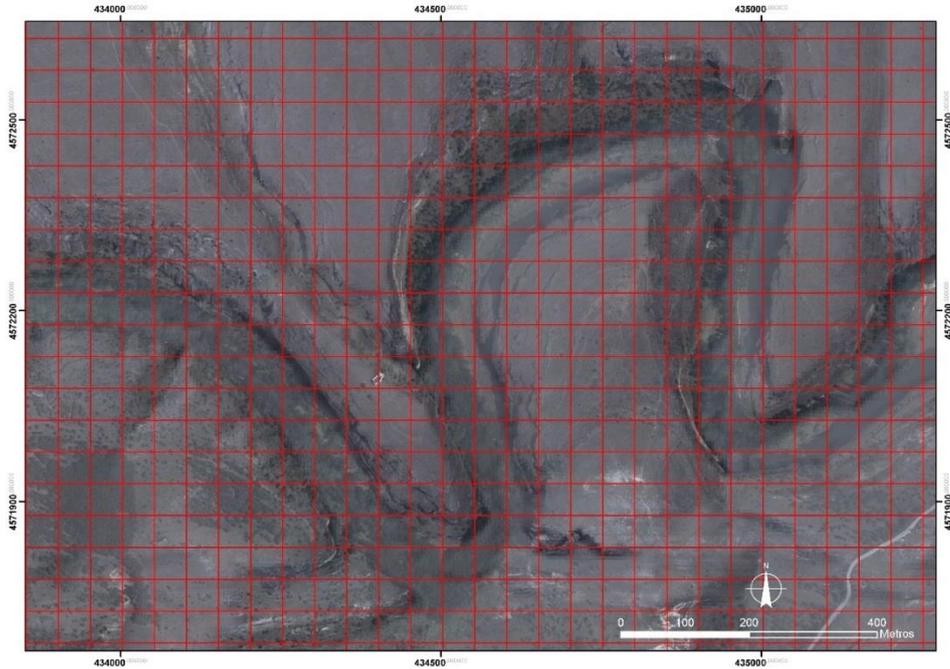


**Figura 7** Hoces del Duratón (Segovia). Fuente: elaboración propia a partir de ortofotografía del PNOA.

La técnica de cartografía a partir de parcelas se hace muy difícil dado que la pendiente de las paredes no permite ver con claridad toda la ladera, tanto si se usa una malla de 100 m (Figura 8) como de 50 m tal como se puede ver en la Figura 9.



**Figura 8** Red de 100 m de lado en el Cañon del Río Lobos. Fuente: elaboración propia a partir de ortofotografía del PNOA.



**Figura 9** Red de 50 m de lado. Hoces del Duratón. Fuente: elaboración propia a partir de ortofotografía del PNOA.



## 6.1. Análisis sobre paredes verticales

- **Procedimiento de medición:** se selecciona sobre la ortofotografía la cuadrícula a controlar en la que se encuentra la pared. Posteriormente, se lleva a cabo un muestreo vertical en paralelo a la pared, con ayuda de arneses y cuerdas. Estas técnicas ya se han utilizado dentro y fuera de España. Véase, por ejemplo, Barron *et al.* (2011) o García *et al.* (2007; Figura 10).
- **Periodicidad:** 5 años.



**Figura 10** Muestreo de plantas mediante el uso de arneses en un acantilado en Irlanda. Fuente: extraída de Barron *et al.* (2011) (<https://www.npws.ie/sites/default/files/publications/pdf/IWM53.pdf>).

## 6.2. Seguimiento continuado a partir de fotografías oblicuas de alta resolución

- **Procedimiento de medición:** fotografía perpendicular a escala desde un lugar que facilite una visión lo más perpendicular de la pared. Se toma una fotografía con alta resolución. En esta fotografía debe incluirse toda la superficie con, por lo menos, dos puntos fácilmente reconocibles en fotografía aérea o en mapas topográficos. Posteriormente se calibra la fotografía y utilizando un GIS, se mide la distancia existente entre dos puntos de referencia elegidos en la fotografía que previamente han sido georreferenciados. Conocida esta distancia, se modifica la resolución de la fotografía para que, al ser incorporada a un GIS como imagen, la medición de distancia entre los dos puntos de referencia de la fotografía se corresponda con la distancia real. Sobre la fotografía resultante anterior se digitalizan las plantas existentes. Finalmente, con ayuda de prismáticos se determina las especies. Estas técnicas se han usado, por ejemplo, en Goñi *et al.* (2006).



### 6.3. Cartografía de los cambios en la presencia de plantas con ayuda de UAV

En la actualidad, los drones o UAV (del inglés *Unmanned Aerial Vehicles*) pueden llevar incorporados sensores multiespectrales e hiperspectrales. Los primeros pueden llegar a tomar valores de hasta 6 bandas espectrales y, están diseñados para el estudio de parámetros relativos a la vegetación, por lo que las bandas están seleccionadas en los rangos del verde, rojo e infrarrojo cercano, donde la vegetación presenta su mayor respuesta de absorbancia y reflectancia.

Los hiperspectrales son los más avanzados en la toma de datos espectrales. En los últimos años se han desarrollado sensores con un peso inferior a 1 kg, lo cual ha permitido su empleo mediante UAV. La mayoría de las soluciones existentes capturan la información comprendida entre 400 nm y 1000 nm, tomando datos de hasta 300 bandas.

- **Procedimiento de medición:** vuelo con dron equipado con sensores en paralelo a la pared rocosa. Posteriormente tratamiento de los datos con programas específicos e integración en un GIS para poder llevar a cabo comparaciones en el futuro.
- **Periodicidad:** 5 años.

## 7. SISTEMA INTEGRADO DE EVALUACIÓN LOCAL DE SISTEMAS ROCOSOS

Ante la falta de un sistema de evaluación de los ecosistemas aplicable a los ecosistemas costeros rocosos y tras haber consultado otros sistemas aplicados en otros ambientes se ha generado el índice INER (Índice de Naturalidad de Ecosistemas Rocosos) que debe ser objeto de revisiones en el futuro. Se consideran 11 variables agrupadas en 4 grupos.

La valoración va desde 5 (mayor valoración de la variable presente en el ecosistema) a 0 (menor valoración de la variable), en las variables que se pueden considerar naturales, y desde 50 a 0 en las antrópicas, en función del grado de impacto en los ecosistemas (Tabla 1).

En función de la importancia ecológica de cada variable, se le otorga un índice de ponderación de 3 (gran importancia en su papel en la riqueza del ecosistema o en cuando se trata de una variable muy negativa para él) a 1, cuando se considera que su papel es menor en la construcción de los ecosistemas o en su grado de impacto sobre ellos (Tabla 1).

La fórmula aplicada es:

$$INER = (E+B+TS+An)/4$$

donde *E* es la estabilidad geomorfológica, *B* son los componentes bióticos, *TS* son los cambios en la temperatura del suelo y del hielo, y *An* es el grado de antropización.

Máxima calidad: 107,5 puntos

Mínima calidad: 0 puntos

El abanico de posibilidades es grande por lo que se recomienda seleccionar varios ecosistemas con diferentes estados de conservación conocidos para poder determinar los umbrales de calidad.



**Tabla 1** Ponderación otorgada a cada variable en función de su importancia ecológica. Fuente: elaboración propia.

GRUPO DE VARIABLE	VARIABLE	Tipo	5	4	3	2	1	0	Ponderación
<b>ESTABILIDAD GEOMORFOLÓGICA</b>  E	<b>1. DOMINIO DE LA ACUMULACIÓN SEDIMENTOS</b> A > acumulación de sedimentos, > dinamismo geomorfológico y > dificultad de estabilidad y menor colonización vegetal.	Obligatoria	Baja		Media		Alta		2
	<b>2. EROSIÓN LINEAL</b> A > dinámica de la arroyada > erosión de los taludes > inestabilidad > dificultad de estabilidad y colonización vegetal.	Obligatoria	Baja		Media		Alta		2
<b>COMPONENTES BIÓTICOS</b>  B	<b>3. BIODIVERSIDAD</b> > Estabilidad > posibilidades de asentamiento de la flora y la fauna. > biodiversidad > riqueza del ecosistema.	Obligatoria	Alta		Media		Baja		3
	<b>4. COMPOSICIÓN FLORÍSTICA</b> A partir de un estado 0, > disminución > pérdida del valor del ecosistema.	Obligatoria	Alta		Media		Baja		3
	<b>5. NATURALIDAD DE LA VEGETACIÓN</b> La pérdida de naturalidad de la vegetación es indicativa de importantes cambios en el ecosistema.	Obligatoria	Alta		Media		Baja		3
	<b>6. ESPECIES INDICADORAS DE CALIDAD AMBIENTAL</b> > abundancia > riqueza del ecosistema.	Obligatoria	Presentes					Ausentes	3

Continúa en la siguiente página ►



GRUPO DE VARIABLE	VARIABLE	Tipo	5	4	3	2	1	0	Ponderación
<b>CAMBIOS EN LA TEMPERATURA DEL SUELO Y HIELO</b>	<b>7. CAMBIOS EN LA TEMPERATURA DEL SUELO</b> Parámetro indicativo de cambios importantes en el ecosistema. >cambio >posibilidades de que un ecosistema esté cambiando	Opcional en los fósiles. Obligatoria en los activos	No cambios					Cambios	3
	<b>8. CAMBIOS EN LA PRESENCIA DE SUELO HELADO EN PROFUNDIDAD (GR ACTIVOS)</b> Igual que la temperatura, la fusión del suelo helado a lo largo del tiempo provocará cambios importantes en los ecosistemas.	Obligatoria	No fusión					Fusión	3
			<b>50</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	
<b>GRADO DE ANTROPIZACIÓN</b>	<b>9. ACTIVIDAD FORESTAL O GANADERA</b> En principio es la actividad menos impactante siempre que no afecte a los ecosistemas. La ganadería, por ejemplo, puede provocar cambios importantes en la colonización vegetal e, indirectamente, en el suelo. Por lo general afecta a los entornos de los ecosistemas rocosos. Hay que cuantificar el impacto, especialmente, si se usan abonos o purines.	Obligatoria				Baja	Me dia	Alta	1
<b>AN</b>									



## 8. VARIABLES ESPECÍFICAS PARA GLACIARES PERMANENTES

### 8.1. Balance de masa

Representa el equivalente en agua de lo que gana y de lo que pierde un glaciar en un tiempo determinado. Este indicador se obtiene a partir de mediciones repetidas, ya sea de manera directa (balance glaciológico) o indirecta (balance hidrológico) y es un indicador importante ya que reacciona rápidamente al clima (temperatura y precipitación), en contraposición a los cambios de longitud (reacción en pocos años a siglos dependiendo de la longitud / pendiente del glaciar).

El balance de masa  $b$  corresponde al resultado de la suma de la acumulación y de la ablación. Es el cambio de masa, representado por un volumen equivalente de agua, ocurrido durante un tiempo definido, determinado normalmente, por la duración del año hidrológico. El balance de masa se expresa generalmente en milímetros o metros de equivalente agua. La ecuación básica del balance en un punto del glaciar entre dos periodos de medición  $db/dt$  se escribe básicamente de la siguiente manera (Francou *et al.* 2004; Lliboutry 1964; Paterson 1994):

$$db/dt = pdh/dt + \int dp/dt dz$$

donde  $p$  es la densidad del hielo de espesor  $h$ , que varía según el tiempo  $t$ . El primer término de la ecuación representa el cambio de la masa de hielo (con densidad constante) durante un periodo de tiempo. El segundo término es el cambio de densidad de la columna de espesor sobre el periodo de tiempo  $t$ .

La monitorización de los cambios de volumen de los glaciares es, pues, importante. El procedimiento de monitorización intenta invertir los procesos físicos reales y va desde las observaciones sobre el avance/retroceso de los glaciares a la geometría y la temperatura de los glaciares, y de los balances de masa y energía al clima y la posible influencia antropogénica sobre el clima (Baltsavias *et al.* 2001).

#### 8.1.1. Estimación del balance de masa

- **Aplicabilidad:** según el principio de aplicabilidad comentado anteriormente, la variable balance se cataloga como muy recomendable.
- **Propuesta métrica:** existen varios métodos:

##### 1. Medición directa del terreno

Se mide directamente en el terreno el cambio de masa del glaciar (Francou *et al.* 2004). Esta medición se lleva a cabo a partir de la instalación de una red de estacas distribuidas por el glaciar. Además, en su sector superior, donde generalmente la acumulación supera la ablación, se excavan pozos o se hacen perforaciones donde se mide directamente la cantidad de nieve o de hielo acumulada(o) entre el inicio y el fin del año hidrológico.

Posteriormente, por densimetría el hielo o la nieve es convertido(a) en equivalente de agua. El procesamiento de datos se lleva cabo a través de tres etapas. La primera corresponde a la división del glaciar en rangos altitudinales que fluctúan, a nivel general, entre los 50 y 100 m, aunque, en glaciares de pequeña extensión como los pirenaicos podría ser conveniente



disminuir el rango. En la segunda etapa, cada rango del glaciar es afectado por el valor medido con la baliza (o con el pozo). En el caso de que ninguna baliza haya sido instalada en algún rango altitudinal, los valores del balance son obtenidos por interpolación (generalmente lineal). Finalmente, el balance es ponderado por su superficie relativa utilizando la siguiente ecuación:

$$B_n = \sum (B_i (s_i/S))$$

dónde:  $B_i$  corresponde al balance de un rango altitudinal  $i$ ,  $S_i$  a la superficie del rango altitudinal y  $S$  a la superficie total del glaciar.

## 2. Medición por levantamiento topográfico del terreno

Consiste en el levantamiento topográfico detallado del glaciar, con el objetivo de medir su superficie y contorno exacto. Levantamientos posteriores permitirán comparar la topografía medida con la levantada en años anteriores, así como calcular la pérdida de área y de volumen. Posteriormente, estas pérdidas, repartidas sobre todo el glaciar y convertidas en equivalente agua, proporcionan el balance de masa por rango altitudinal. Por último, se confecciona un mapa calculando las líneas de igual balance de masa.

## 3. Por restitución fotogramétrica

La restitución fotogramétrica con ayuda de UAV es una alternativa a la medición anterior. Los vuelos con dron cada un período de tiempo establecido, por ejemplo, cinco años, permitirían conocer con exactitud los cambios en extensión y volumen de hielo.

En este caso, es preciso situar una serie de puntos visibles sobre el glaciar perfectamente georreferenciados. Posteriormente el dron realiza una serie de pasadas perfectamente planificadas mediante un plan de vuelo determinado.

Ya en el gabinete, el software crea el mosaico fotográfico y, con ayuda de los puntos de control, lleva a cabo la restitución fotogramétrica que dará lugar a ortofotografías y modelos digitales del terreno cuya resolución está en relación con la altura a la que se vuela. Se han obtenido buenos resultados en el Himalaya (Immerzeel *et al.* 2014).

## 4. Usando Laser Scanning

El uso de *Laser Scanning* permite llevar a cabo un seguimiento de la estructura y funcionamiento de los glaciares. El escaneo permite realizar mediciones repetidas para conocer las tasas de cambio del espesor del hielo, ya que puede garantizarse una cobertura superpuesta siempre que el ancho de la hilera sea como mínimo de 100 m. Krabil *et al.* (1995) describen un sistema de altímetro láser de exploración desarrollado por la NASA. La posición y la actitud de las aeronaves se miden utilizando GPS y sistema de navegación inercial (INS, del inglés *Inertial Navigation System*), respectivamente, y se obtuvieron precisiones de 10-20 cm sobre Groenlandia cuando se incluyeron datos de una calibración rigurosa antes, durante y después de cada vuelo. Los resultados de mediciones extensas en Groenlandia son descritos por Krabil *et al.* (1995) y Thomas *et al.* (1995).



### 5. Análisis vertical del balance

La evolución del balance en función de la altitud sobre el glaciar corresponde al gradiente vertical del balance ( $GVB = db/dz$  (num eq. agua ml)). Este gradiente es también llamado coeficiente de actividad del glaciar (Lliboutry 1964). La experiencia de la medición del balance con el método de balizas en los glaciares de montaña del mundo demuestra que la curva  $db/dz$ , particularmente en la parte baja del glaciar, tiene cada año una forma bastante parecida. Solo el eje de la curva se desplaza hacia los valores positivos (en caso de balance positivo) o los valores negativos (en caso de balance negativo).

### 6. Altitud de la línea de equilibrio glacial (ELA, del inglés Equilibrium Line Altitude)

La relación del balance de masa con la altitud se acerca muchas veces en la zona de ablación a una recta. Pero forma a veces una curva irregular que muestra una inflexión marcada cuando el balance se acerca al valor 0. El nivel altimétrico donde el balance alcanza el valor de 0 mm de equivalente agua corresponde a la línea de equilibrio del glaciar, que separa la zona de acumulación (donde  $Acumulación > Ablación$ ) de la zona de ablación (donde  $Acumulación < Ablación$ ). La altura de la línea de equilibrio del glaciar, (en m s.n.m.) varía anualmente según el balance de masa, parámetro con el cual posee una relación lineal.

## 8.2. Cambios de longitud, superficie y volumen ocurridos en el pasado

El estudio de estos indicadores proporciona información de gran valor sobre la respuesta de un glaciar a los cambios de masa acumulados. Para medirlos, se utilizan métodos geodésicos de terreno, análisis de fotografías aéreas e imágenes de satélite, y reconstrucciones hechas en base a análisis geomorfológicos o de investigaciones históricas.

### 8.2.1. Estimación de los cambios en superficie y longitud

- **Aplicabilidad:** obligatoria.
- **Propuesta métrica:** cartografía mediante GIS a partir de ortofotografías del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) siguiendo la metodología explicada anteriormente.
- **Periodicidad:** 5 años.

### 8.2.2. Estimación de los cambios en profundidad

- **Aplicabilidad:** recomendable.
- **Propuesta métrica:** cartografía mediante *GeoRadar*. La técnica del Georradar (GPR, del inglés *Ground Penetrating Radar*) es un método no destructivo. El georradar es un equipo compuesto por una antena transmisora de ondas electromagnéticas, una antena receptora, una unidad de control y almacenamiento de datos y en algunos casos posee dispositivos de visualización. La técnica consiste en la generación de un tren de pulsos electromagnéticos de corta duración que genera ondas que se propagan a través del subsuelo y posteriormente son reflejadas hacia la superficie. Los límites o interfaces de los diversos tipos materiales presentes en el



subsuelo generan diferencias en las propiedades electromagnéticas de cada uno de ellos (permitividad dieléctrica y conductividad), lo que a su vez permite que el receptor capte respuestas de diferente intensidad, con base en las cuales se puede identificar, desde la presencia de rocas de diferente densidad hasta cuerpos de agua o espacios vacíos.

El procedimiento usado para la toma de información en campo consiste en el desplazamiento sobre el área a explorar arrastrando la antena sobre la superficie glaciada. Al desplazar la antena por encima del área de estudio, el equipo emite (a medida que el operario se desplaza) una serie de pulsos electromagnéticos que varían su velocidad de desplazamiento dependiendo de las características electromagnéticas de las capas del hielo por el cual se desplazan. Al detectar un cambio en esa velocidad, el GPR traza una anomalía en la gráfica indicando cambio de material, por ejemplo, presencia de niveles de sedimentos o agua. El gráfico que se genera representa cada uno de esos pulsos emitidos y reflejados por los materiales presentes en el glaciar.

- **Periodicidad:** en función de las posibilidades.

### 8.3. Sensibilidad del glaciar al clima

Consiste en identificar las correlaciones entre la evolución de un glaciar y el clima. Estos análisis se basan en el estudio directo de los procesos ocurridos en la superficie del glaciar a partir de un balance energético. La sensibilidad también puede ser analizada a través de relaciones estadísticas entre el balance de masa y diversas variables climatológicas medidas en estaciones meteorológicas o estimadas a través de modelos de circulación general.

### 8.4. Variaciones geométricas

La dinámica de un glaciar puede ser analizada estudiando el desplazamiento de balizas instaladas sobre el glaciar que sirven para estimar el balance y su cambio de altura a partir de un punto fijo. Un balance neto positivo, por ejemplo, se refleja por un aumento de la velocidad y del espesor del glaciar.

La respuesta de un glaciar a un cambio de balance es variable. Esta depende de su tamaño, espesor, geometría del lecho rocoso, pendiente promedio, de la cantidad de agua entre el hielo y el lecho, y de la temperatura del hielo a nivel de lecho. Los glaciares que presentan una fuerte pendiente, amplias zonas de acumulación, hielo a temperatura de fusión y una geometría regular del lecho rocoso (cercana a un cilindro perfecto) son los que responden rápidamente a series sucesivas de balances positivos o negativos.

El movimiento del frente del glaciar en un año determinado (avance, retroceso o estabilidad) es el resultado del efecto combinado de la ablación producida en el frente y de la dinámica del glaciar. Esta última depende, a su vez, del efecto acumulado de los balances de los años precedentes y del espesor máximo del glaciar. En el caso de glaciares de pequeño tamaño como los pirenaicos, la extensión de las zonas de acumulación y de ablación varían cada año, por lo que es posible que durante ciertos años la superficie entera del glaciar se convierta en una zona de ablación o en una de acumulación. Dichos glaciares tienen una dinámica poco activa con una velocidad muy reducida.



## 9. REFERENCIAS

- Baltsavias E P, Favey E, Bauder A, Bosch H & Pateraki M. 2001. Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring. *The Photogrammetric Record*. 17(98): 243-273.
- Barron S J, Delaney A, Perrin P M, Martin J R & O'Neill F H. 2011. National survey and assessment of the conservation status of Irish sea cliffs. *Irish Wildlife Manuals*. Nº. 53. National Parks and Wildlife Service, Department of the Environment, Heritage and Local Government, Dublin.
- Franco B, Pouyaud B & 12 others. 2004. Métodos de observación de glaciares en los Andes tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Versión 1, Great Great Ice. IRD. Francia. 238 pp.
- García M B, Goñi D, Guzmán D, Iriando J M, Coscolluela J, Puente J, Alcántara M & Guiral J. 2007. ¿Cómo gestionar una planta prácticamente inaccesible y en peligro de extinción?. *Ecosistemas*. 16(3): 155-162.
- Goñi D, García M B & Guzmán D. 2006. Métodos para el censo y seguimiento de plantas rupícolas amenazadas. *Pirineos*. 161: 33-58.
- Immerzeel W W, Kraaijenbrink P D A, Shea J M, Shrestha A B, Pellicciotti F, Bierkens M F P & De Jong S M. 2014. High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing of Environment*. 150: 93-103.
- Krabill W, Thomas R, Jezek K, Kuivinen K & Manizade S. 1995. Greenland ice sheet thickness changes measured by laser altimetry. *Geophysical Research Letters*. 22(17): 2341- 2344.
- Lliboutry L. 1964. *Traité de Glaciologie*. 2 tomos, Masson. Paris.
- Paterson W S B. 1994. *The Physics of Glaciers*. 3<sup>rd</sup> Edition. Pergamon, Elsevier Science Ltd, Oxford.
- Pérez-Alberti A, Gomes A, Trenhaile A, Oliveira M, Horacio J. 2013. Correlating river terrace remnants using an Equotip hardness tester: An example from the Miño River, northwestern Iberian Peninsula. *Geomorphology*. 192: 59-70.
- Thomas R, Krabill W, Frederick E & Jezek K. 1995. Thickening of Jacobshavns Isbrae, West Greenland, measured by airborne laser altimetry. *Annals of Glaciology*. 21: 259- 262.
- Trenhaile A S & Lakhan V C. 2011. Transverse micro-erosion meter measurements; determining minimum sample size. *Geomorphology*. 134(3-4): 431-439.

### Bibliografía adicional de interés

- Blachut T J & Muller F. 1966. Some fundamental considerations on glacier mapping. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 3(6): 747- 759.
- Bolch T, Menounos B & Wheate R. 2010. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985–2005. *Remote sensing of Environment*. 114(1): 127-137.
- Braithwaite R J. 2002. Glacier mass balance: the first 50 years of international monitoring. *Progress in Physical Geography*. 26(1): 76-95.



- Chen J & Ohmura A. 1990. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. Hydrology in Mountainous Regions I - Hydrological measurements; the water cycle. Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990. International Association of Hydrological Sciences Publication. 193: 127-135.
- Chueca J & Julián A. 2004. Relationship between solar radiation and the development and morphology of small cirque glaciers (Maladeta mountain massif, Central Pyrenees, Spain). *Geografiska Annaler*. 86A(1): 81-89.
- Chueca J & Julián A. 2006. La degradación reciente de los glaciares del Pirineo español: datos de pérdida de superficie durante el período de observación 1981/2005-2006. *Boletín Glaciológico Aragonés*. 7: 9-182.
- Chueca J & Julián A. 2009. 8340 Glaciares permanentes. 52 pp. En: VV.AA. Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid.
- Chueca J, Julián A & López-Moreno J I. 2003a. Variations of Glaciar Coronas, Pyrenees, Spain, during the 20th century. *Journal of Glaciology*. 49(166): 449-455.
- Chueca J, Julián A & López-Moreno J I. 2007. Recent evolution (1981-2005) of the Maladeta glaciers, Pyrenees, Spain: extent and volume losses and their relation with climatic and topographic factors. *Journal of Glaciology*. 53(183): 547-557.
- Chueca J, Julián A & Peña J L. 2002. Comparación de la situación de los glaciares del Pirineo español entre el final de la Pequeña Edad del Hielo y la actualidad. *Boletín Glaciológico Aragonés*. 3: 13-41.
- Chueca J, Julián A & René P. 2004a. Estado de los glaciares en la cordillera pirenaica (vertientes española y francesa) a finales del siglo XX. pp. 91-102. En: Benito G & Díez Herrero A (eds.) *Contribuciones recientes sobre geomorfología. Actas de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología. SEG-CSIC*. Madrid.
- Chueca J, Julián A, López-Moreno J I, Peña J L & Camins J. 2004b. Análisis de la evolución reciente de los glaciares del macizo de la Maladeta (Pirineo Central español): cuantificación de pérdidas de superficie y volumen. *Boletín Glaciológico Aragonés*. 5: 9-164.
- Chueca J, Julián A, Saz M A, Creus J & López-Moreno J I. 2005. Responses to climatic changes since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Pyrenees). *Geomorphology*. 68: 167-182.
- Chueca J, López-Moreno J I & Julián A. 2003b. Determinación de espesores en el glaciar-helero de Coronas (Macizo de la Maladeta: Pirineo central español) mediante el empleo de geo-radar. *Boletín Glaciológico Aragonés*. 4: 111-124.
- Chueca J, Peña J L, Julián A & Blanchard E. 2000. Dinámica de los glaciares del Pirineo Aragonés: resultados de la campaña glaciológica del año 1998. *Boletín Glaciológico Aragonés*. 1: 13-41.
- Chueca J, Peña J L, Lampre F, García-Ruiz J M & Martí C. 1998. Los glaciares del Pirineo aragonés: estudio de su evolución y extensión actual. Universidad de Zaragoza. Zaragoza. 104 pp.
- Chueca J. 2000. Aplicación del enfoque geoecológico en la definición de zonas de protección en espacios naturales protegidos: el caso de los Monumentos Naturales de los Glaciares Pirenaicos. pp.



103-112. En: Valle B (coord.) Geografía y Espacios Protegidos. Asociación de Geógrafos Españoles-FENPA. Madrid.

Echelmeyer K, Harrison W, Larsen C, Sapiano J, Mitchell J, DeMallie J & Rabus B. 1996. Airborne elevation profiling of glaciers: A case study in Alaska. *Journal of Glaciology*. 42(142): 538-547.

Fernández Á & González F. 2003. Gorrión alpino, *Montifringilla nivalis*. pp. 568-569. En: Martí R & Del Moral J C (eds.) Atlas de las Aves Reproductoras de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, SEO/BirdLife. Madrid.

Ferrer C, Mora J, Arenillas M, Navarro J & Cobos G. 2003. Evolución reciente de los aparatos glaciares del Pirineo español. *Revista de Ingeniería Civil*. 131: 17-22.

Francou B & Pouyaud B. 2008. Glaciares: ¿cómo y dónde estudiarlos?. *Revista Virtual REDESMA*. 2: 9-17.

Funk M, Morelli R & Stahel W. 1997. Mass balance of Griesgletscher 1961-1994: different methods of determination. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*. 33(1): 41-55.

Gleitsmann L & Kappas M. 2006. Glacier monitoring survey flights below clouds in Alaska: oblique aerial photography utilizing digital multiple image photogrammetry to cope with adverse weather. *EARSel eProceedings*. 5(1): 42-50.

Haerberli W, Cihlar J & Barry R G. 2000. Glacier monitoring within the global climate observing system. *Annals of Glaciology*. 31(1): 241-246.

Haerberli W, Zemp M, Frauenfelder R, Hoelzle M & Käab A (eds.). 2005. Fluctuations of glaciers 1995-2000. Volume III. Zurich: IUGG (CCS)-UNEP-UNESCO. World Glacier Monitoring Service.

Herrero Á. 2003. Treparriscos, *Trichodroma muraria*. pp. 520-521. En: Martí R & Del Moral J C (eds.) Atlas de las Aves Reproductoras de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, SEO/BirdLife. Madrid.

Jóhannesson T, Raymond C F & Waddington E W. 1989. Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. *Journal of Glaciology*. 35(121): 355-369.

Julea A, Vasile G, Petillot I, Trouvé E, Nicolas J M, Gay M & Bolon P. 2006. Simulation of SAR images and radar coding of georeferenced information for temperate glacier monitoring. *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*. 4: 175-180.

Julián A, Chueca J, Peña J L, López-Moreno J I & Lapeña A. 2001. Dinámica de los glaciares del Pirineo aragonés: resultados de la campaña glaciológica del año 1999. *Boletín Glaciológico Aragonés*. 2: 13-36.

Käab A, Huggel C, Paul F, Wessels R, Raup B, Kieffer H & Kargel J. 2002. Glacier monitoring from ASTER imagery: accuracy and applications. pp. 43-53. In: *Proceedings of EARSel-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space (Vol. 2)*.

Karpilo R D J & Ronald D. 2009. Glacier monitoring techniques. pp. 141-162. In: Young R & Norby L. *The Geological Society of America, Boulder, Colorado*.

Kaufmann V. 2012. The evolution of rock glacier monitoring using terrestrial photogrammetry: the example of Äusseres Hochebenkar rock glacier (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences*. 105(2): 63-77.



- Ke L, Ding X & Song C. 2015. Heterogeneous changes of glaciers over the western Kunlun Mountains based on ICESat and Landsat-8 derived glacier inventory. *Remote Sensing of Environment*. 168: 13-23.
- Kennett M & Eiken T. 1997. Airborne measurement of glacier surface elevation by scanning laser altimeter. *Annals of Glaciology*. 24: 293-296.
- Knoll C & Kerschner H. 2009. A glacier inventory for South Tyrol, Italy, based on airborne laser-scanner data. *Annals of Glaciology*. 50(53): 46-52.
- Lliboutry L. 1974. Multivariate statistical analysis of glacier annual balances. *Journal of Glaciology*. 13(69): 371-392.
- López-Moreno J I, Nogués D, Chueca J & Julián A. 2006a. Glacier development and topographic context. *Earth Surface Processes and Landforms*. 31(12): 1585-1594.
- López-Moreno J I, Nogués D, Chueca J & Julián A. 2006b. Change of topographic control on the extent of cirque glaciers since the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*. 33: L24505.
- López-Moreno J L, Revuelto J, Rico I, Chueca-Cía J, Julián A, Serreta A, Serrano E, Martín Vicente-Serrano S, Azorin-Molina C, Alonso-González E & García-Ruiz J M. 2016. The Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *The Cryosphere*. 10: 681-694.
- Machguth H, Paul F, Hoelzle M & Haeberli W. 2006. Distributed glacier mass-balance modelling as an important component of modern multi-level glacier monitoring. *Annals of Glaciology*. 43(1): 335-343.
- Maestro I C & Recio J A. 2004. Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes *Landsat*. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*. 4: 79-92.
- Mennis J L & Fountain A G. 2001. A spatio-temporal GIS database for monitoring alpine glacier change. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 67(8): 967-974.
- Oerlemans J. 1994. Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*. 264(5156): 243-244.
- Paul F, Barry R G, Cogley J G, Frey H, Haeberli W, Ohmura A, Ommanney C S L, Raup B, Rivera A & Zemp M. 2009. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*. 50(53): 119-126.
- Paul F, Kääb A & Haeberli W. 2007. Recent glacier changes in the Alps observed by satellite: Consequences for future monitoring strategies. *Global and Planetary Change*. 56(1): 111-122.
- Raup B, Racoviteanu A, Khalsa S J S, Helm C, Armstrong R & Arnaud Y. 2007. The GLIMS geospatial glacier database: a new tool for studying glacier change. *Global and Planetary Change*. 56(1): 101-110.
- Sánchez-Alonso C. 2003. Chova piquigualda, *Pyrrhocorax graculus*. pp. 544-545. En: Martí R & Del Moral J C (eds.) *Atlas de las Aves Reproductoras de España*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, SEO/BirdLife. Madrid.
- Serrano E & Agudo C. 2004. Glaciares rocosos y deglaciación en la alta montaña de los Pirineos aragoneses (España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*. 99(1-4): 159-172.
- Serrano E, Martínez de Pisón E, Martínez R, Cantarino I & Navarro J. 1991. El glaciar noroccidental del Besiberri (Pirineo de Lérida). *Pirineos*. 137: 113-115.



WGMS. 2013. Glacier Mass Balance Bulletin N°. 12 (2010–2011). 106 pp. In: Zemp M, Nussbaumer S U, Naegeli K, Gärtner-Roer I, Paul F, Hoelzle M & Haeberli W (eds.) ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO. World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland.

Würländer R, Eder K & Geist T. 2004. High quality DEMs for glacier monitoring–image matching versus laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 35(B7): 753-758.

Zemp M, Haeberli W, Bajracharya S, Chinn T J, Fountain A G, Hagen J O, Huggel C, Kääb A, Kaltenborn B P, Karki M, Kaser G, Kotlyakov V M, Lambrechts C, Li Z Q, Molnia B F, Mool P, Nellemann C, Novikov V, Osipova G B, Rivera A, Shrestha B, Svoboda F, Tsvetkov D G & Yao T D. 2007. Glaciers and ice caps. pp. 115–152. In: UNEP: Global outlook for ice & snow. UNEP/GRID-Arendal, Norway.