

Elaboración de un índice para determinar la vulnerabilidad de la flora pirenaica frente al cambio climático

Aitziber Zufiaurre¹, Iñaki Aizpuru², Daniel Gómez³, Maria Begoña García³, Samuel Pironon³, Arantza Aldezabal¹ y Joseba Garmendia⁴

1. Universidad del País Vasco (EHU-UPV), Euskal Herriko Unibertsitatea, Barrio Sarriena s/n E-48940 Leioa, [actualmente: 5 Área de Biodiversidad, Gestión Ambiental de Navarra-Nafarroako Ingurumen kudeaketa (GAN-NIK), E-31015 Pamplona-Iruñea], aitziber.zufiaurre@gmail.com
2. IHOB, Alameda Urquijo N°36 - 6^a planta, E-48011 Bilbao
3. Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Avda. Nuestra Señora de la Victoria, 8, E-22700 Jaca
4. Sociedad de Ciencias Aranzadi, Zorroaga gaina, 11, E-20014 Donostia-San Sebastián

RESUMEN

El cambio que a nivel mundial afecta al régimen climático global es especialmente evidente en las comunidades vegetales altimontanas del Pirineo; sin embargo, no siempre es sencillo determinar los táxones más vulnerables y por tanto con mayor riesgo de extinción ante estos cambios. Para averiguarlo, utilizando la metodología desarrollada por “NatureServe”, se ha elaborado un primer “índice de vulnerabilidad” de los táxones pirenaicos frente al cambio climático que combina la “sensibilidad” y la “exposición” de las especies. Este índice se ha aplicado a 77 táxones altimontanos, de ecología y distribución dispares, clasificándolos por su vulnerabilidad. *Sorbus chamaemespilus* y *Phyteuma hemisphaericum* han resultado los más vulnerables. Los modelos de distribución potencial de especies (MDP) revelan como características más influyentes la exposición directa al cambio climático en su área de distribución pirenaica. Por su parte, el análisis de componentes principales (ACP) revela que, en lo referido a sensibilidad, las dependencias hídrica y nivosa, así como la capacidad de dispersión de las semillas son los factores clave para evaluar la sensibilidad frente al cambio. En este primer intento se ha constatado la ausencia de información relevante que deberá obtenerse para mejorar los pronósticos.

Palabras clave: Pirineos, flora, cambio climático, vulnerabilidad, sensibilidad, exposición

Developing an index to determine the vulnerability of pyrenean flora to climate change

SUMMARY

The change that, globally, affects the global climate regime is especially evident in the high mountain plant communities in the Pyrenees. However, it is not always easy to determine the most vulnerable species to these changes and therefore the ones at greater risk of extinction. To find out, using the methodology developed by “NatureServe” we developed a first climate change vulnerability index for the Pyrenean taxa, that combines the “sensitivity” and “exposure” of the species. This index has been applied to 77 taxa from high mountains which have different ecological and distributional characteristics, and have been classified according to their vulnerability. *Sorbus chamaemespilus* and *Phyteuma hemisphaericum* turned out to be the most vulnerable. Species Distribution Model (SDM) revealed as most influential features the direct exposure to climate change in the distribution range of the taxa in the Pyrenees. For its part, the principal component analysis (PCA) revealed that, with regard to sensitivity, water and snow dependencies, and the ability of seed dispersal are the key factors to evaluate the sensitivity to change. This first attempt has confirmed the absence of relevant information which will have to be obtained to improve forecasts.

Keywords: Pyrenees, flora, climate change, vulnerability, sensitivity, exposure.

Développement d'un indice pour déterminer la vulnérabilité de la flore pyrénéenne face au changement climatique

RÉSUMÉ

Les changements climatiques observés à l'échelle de la planète s'avèrent particulièrement visibles dans les communautés végétales des hautes montagnes pyrénéennes. Il n'est cependant pas simple d'identifier les espèces les plus vulnérables c'est-à-dire celles ayant le risque de disparition le plus élevé à cause de ces changements climatiques. Pour les identifier, en employant la méthodologie développée par « NatureServe » nous

avons élaboré un index préliminaire de la vulnérabilité des taxa pyrénéens en combinant les facteurs « sensibilité » et « exposition » des espèces. Nous avons appliqué cet index à 77 taxa de haute-montagne ayant des caractéristiques écologiques et une répartition hétérogènes pour obtenir un classement par vulnérabilité. L'étude fait ressortir deux espèces, *Sorbus chamaemespilus* et *Phyteuma hemisphaericum* comme étant les plus vulnérables. Les modèles de distribution potentielle des espèces (MDP) donnent comme facteur ayant le plus d'influence l'exposition directe au changement climatique sur l'aire pyrénéenne. En ce qui concerne la sensibilité, l'analyse en composantes principales (ACP) montre que la dépendance à la présence d'eau et de neige, ainsi que la capacité de dispersion des semences, sont tous deux des éléments clés pour évaluer la sensibilité au changement climatique. Ce premier essai met en évidence l'absence des informations pertinentes qu'il faudra obtenir pour améliorer le diagnostic.

Mots-clés : Pyrénées, flore, changement climatique, vulnérabilité, sensibilité, exposition

I. Introducción

El clima representa una fuerza selectiva fundamental que influye en la supervivencia, crecimiento y rendimiento de los organismos (GRABHERR *et al.* 2010, KULLMAN 2010). El concepto de cambio climático hace referencia a un cambio a escala global en el clima respecto a la historia climática de épocas anteriores (MEEHL *et al.* 2007). El incremento medio de 0,6°C que ha experimentado la temperatura de la Tierra durante los últimos 100 años, debido en parte al efecto antropogénico, ha causado cambios significativos en los patrones de distribución de especies, la estructura y funcionamiento de los ecosistemas o la sincronización de los procesos biológicos (PARMESAN 2006), poniendo en peligro numerosas especies por la escasez de tiempo para poder adaptarse a ellos (BERTHEL *et al.* 2011). Para el periodo 1990-2100 el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climatic Change*) prevé que en el escenario B1, la temperatura media mundial aumentará entre 1,1 y 2,9°C en el año 2100 respecto al 1980-1999 y una variación de la distribución y ciclo de las precipitaciones, con inviernos más lluviosos (aumento de las precipitaciones de entre el 5-20%) y veranos más secos (disminución de precipitaciones de entre el 20-30%) (IPCC 2007). El consiguiente aumento del número de eventos climáticos extremos, provocará importantes extinciones en algunos grupos especialmente sensibles a las variaciones de las condiciones climáticas (ENGLER *et al.* 2009).

A causa de todo ello, se espera un cambio en la composición de las comunidades ligadas a condiciones hídricas concretas (THEURILLAT & GUISAN 2001) y de las comunidades quionófilas por el retroceso de los glaciares (GRABHERR *et al.* 2010). Un aumento de las temperaturas pondría en peligro las comunidades vegetales ligadas a ambientes más fríos por la necesidad de una época fría en su ciclo vital (KÖRNER 1999) y a su vez, facilitaría la dispersión de táxones ligados a condiciones más mediterráneas o termófilas (PAROLO *et al.*, ROSSI 2008). También se prevé un cambio en la fenología (HEGLAND *et al.* 2009), poniendo en peligro los táxones zoodependientes al producirse desarreglos entre su ciclo vital y el de sus agentes polinizadores y dispersores (ENGLER *et al.* 2009, RUMPF *et al.* 2008).

Según el proyecto GLORIA (Global Observation Research Initiative in Alpine Environments), en la Península Ibérica se encuentran dos de los sistemas montañosos europeos donde la sustitución de la flora altimontana por flora más termófila está siendo más evidente (BENITO-ALONSO 2011, VILLAR & BENITO-ALONSO 2003), Sierra Nevada y el Pirineo, ambos macizos con variada flora endémica de grandes altitudes (FERNÁNDEZ & MOLERO 2011, SESÉ & FERRÁNDEZ 1999). El gran número de

táxones en riesgo potencial aconseja priorizar los esfuerzos en aquellos más vulnerables (POSSINGHAM *et al.* 2002).

Para su determinación, en las últimas décadas, se ha extendido el uso de modelos de distribución potencial de especies (MDP) como herramientas predictivas de los cambios en el rango de distribución de los táxones (ENGLER *et al.* 2011). Sin embargo, a menudo estos modelos ignoran las complejas relaciones ecofisiológicas que los táxones establecen con el ambiente, así como su potencial evolutivo. Además, los resultados dependen del grado de precisión de los datos.

Teniendo en cuenta las limitaciones de los MDP, la organización estadounidense NatureServe (www.natureserve.org) ha creado un “índice de vulnerabilidad” al cambio climático (FABER-LANGENDOEN *et al.* 2012, GARDALI *et al.* 2012, MASTER *et al.* 2012, YOUNG *et al.* 2010) que combina cuatro conjuntos de factores o índices para calificar la vulnerabilidad de cada taxon al cambio climático: 1) “exposición directa” al cambio climático (o magnitud prevista), 2) “exposición indirecta” al cambio climático, 3) “sensibilidad” (o a la inversa, capacidad de acomodación), y 4) “respuestas documentadas” al cambio climático (ZACHARY *et al.* 2011) (Fig. 1). Esta evaluación permite la clasificación de los táxones por su riesgo de desaparición con el cambio climático e identificar su capacidad de adaptación. Su aplicación, con los datos disponibles, nos ha permitido obtener un “índice de vulnerabilidad” de la flora pirenaica ante el cambio climático.

Con el fin de tener un amplio espectro del conjunto de la flora pirenaica se han seleccionado táxones pirenaicos con diferentes tipos de distribución y grados de abundancia, requerimientos autoecológicos, ecológicos, y tamaños poblacionales. Para el desarrollo del “índice de vulnerabilidad”, se ha elaborado, en primer lugar, un aproximación al “índice de sensibilidad” (tolerancia y capacidad de hacer frente a condiciones climáticas diferentes) (YOUNG *et al.* 2010, ZACHARY *et al.* 2011) y, posteriormente, una primera aproximación al “índice de exposición” de los táxones estudiadas. De la combinación de ambos se ha obtenido una primera versión del “índice de vulnerabilidad”.

II. Material y Método

1. Área de estudio y selección de táxones

Los Pirineos se extienden a lo largo de 415 km, con zonas que varían desde los 700 m hasta los macizos de más de 3000 m de altitud. Sus diferentes regiones climáticas y la consiguiente riqueza de ecosistemas, hacen que esta cordillera sea una de las áreas geográficas con mayor diversidad vegetal de Europa, ya que reúne 4500 - 5000 táxones de plantas vasculares. De



Fig. 1. Modelo para determinar la vulnerabilidad de la flora ante el cambio climático según Natureserve.

ellos, unos 200 se consideran endémicos (el 5% de la flora pirenaica), más frecuentes entre el piso subalpino (1700 – 2300 m) y el alpino-subnival (2.300 – 3.400 m) (p.e. *Saxifraga hartioides*, *Buglossoides gastonii*, *Minuartia cerastiifolia*, *Androsace ciliata*, *Saxifraga pubescens* subsp. *iratiana*, *Saxifraga aquatica*, *Myosotis alpina*, *Vicia argentea*) (ILLA *et al.* 2005). Además, constituye el límite meridional absoluto de numerosas especies boreoalpinas (p.e. *Arctostaphylos alpinus*, *Salix reticulata*, *Tofieldia pusilla*, *Cardamine bellidifolia* subsp. *alpina*, *Cardamine pentaphyllos*) (GARCÍA & GÓMEZ 2007).

Entre ellas se han seleccionado 77 especies altimontanas, con diferentes requerimientos autoecológicos y ecológicos, y con diferentes tamaños poblacionales para aplicar los índices con el mayor espectro de variación posible. También se han tenido en cuenta trabajos a cerca de la modelación de nichos de táxones altimontanos (ENGLER *et al.* 2011) para poder incorporar al “índice de sensibilidad” datos resultantes del “índice de exposición”.

2. Base de datos

Se ha creado una base de datos donde se ha recogido todo tipo de información disponible para cada taxon, obtenidos de literatura específica sobre la flora pirenaica (LORDA 2001, VILLAR *et al.* 1997 y 2001), de las bases de datos integradas en el *Atlas de la Flora de los Pirineos* del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (proyecto OPCC INTERREG POCTEFA 235/11), el *Atlas de la Flora de Aragón* del herbario JACA, manuales de los hábitats incluidos en la Directiva de Hábitats del Ministerio de Medio Ambiente (MAGRAMA), el programa Anthos y la colaboración de diversos botánicos de los Pirineos.

3. Elaboración de los índices

3.1. Índice de sensibilidad (IS)

Para evaluar el “índice de sensibilidad” se ha utilizado la matriz de datos recopilada. Con la hipótesis inicial y la información disponible (FABER-LANGENDOEN *et al.* 2012, MASTER *et al.* 2012; www.natureserve.org; YOUNG *et al.* 2010, ZACHARY *et al.* 2011) se han definido tres criterios y siete

subcriterios:

Autoecología:

- Polinización (POL)
- Dispersión de semillas (DISP)
- tipo de semillas (SEM)

Ecología:

- Rango altitudinal de las especies (ALT)
- Necesidades hídricas (HAB)
- dependencia de la nieve (NIE)

Estado de conservación:

- Número de ejemplares estimados para cada taxon (IND)

La influencia prevista para cada uno de estos criterios en la adaptabilidad (MASTER *et al.* 2012, ZACHARY *et al.* 2011) se ha evaluado mediante un sistema ordinal de 4 categorías, desde el 1 o valor mínimo al 4, o valor máximo de sensibilidad (Tabla 1).

La suma directa de los valores obtenidos ha dado el valor total de sensibilidad de cada taxon (FABER-LANGENDOEN *et al.* 2012, GIVEN & NORTON 1993) y su media el valor final del “índice de sensibilidad”.

3.2. Índice de exposición (IE)

El “índice de exposición” se ha elaborado a partir de la probabilidad de pérdida de las especies (EXP) seleccionadas en ENGLER *et al.* (2011). Estos datos se han obtenido mediante programas de modelación de nichos ecológicos, comparando el rango de distribución del hábitat actual y el futuro hábitat potencial de los táxones en el Pirineo. Se ha hecho una media de todas las simulaciones obtenidas por diferentes modelos estadísticos y se han ponderado por su precisión (True Skill Statistics score). El valor final es el porcentaje de rango de pérdida (de 0 a 100) en el escenario B1. Para adecuar los valores a la puntuación utilizada en la elaboración del “índice de sensibilidad” se ha utilizado la fórmula:

$IE_T = (R * V_{pp} / M_{pp}) + m_{ie}$ Donde, IE_T , es el valor obtenido por el taxon según el “índice de exposición”; R, es la amplitud del rango del “índice de exposición”; V_{pp} , es el valor obtenido por el taxon en el porcentaje de pérdida; M_{pp} , es la amplitud del rango del porcentaje de pérdida, y m_{ie} , es el valor mínimo del “índice de exposición”.

De esta manera se ha obtenido el valor de exposición de los táxones en una escala del 1 al 4 siendo el 1 el valor mínimo de exposición y el 4 el máximo. Los valores se han clasificado al igual que los valores de sensibilidad (Tabla 1).

3.3. Índice de vulnerabilidad (IV)

Combinando los valores obtenidos para cada taxon en los “índices de sensibilidad” e “índice de exposición”, se ha calculado la media para obtener el “índice de vulnerabilidad”. Los valores se han encuadrado en cuatro categorías: “extremadamente vulnerable”, “muy vulnerable”, “vulnerable” y “moderadamente vulnerable” (Tabla 1).

3.4. Categorización de los índices

Para categorizar los valores obtenidos en cada índice se han creado 4 grupos equitativos dentro de un rango del 1 al 4 (Tabla 1): en rojo “extremadamente sensible”, “extremadamente expuesto”, “extremadamente vulnerable”;

CATEGORÍA	VALOR
Extremadamente sensible / Extremadamente expuesto / Extremadamente vulnerable	3,25-4
Muy sensible / Muy expuesto / Muy vulnerable	2,5-3,24
Sensible / Expuesto / Vulnerable	1,75-2,49
Moderadamente sensible / Moderadamente expuesto / Moderadamente vulnerable	0-1,74

Tabla 1. Categorías creadas para la categorización de los taxones según su sensibilidad, exposición y vulnerabilidad.

en naranja “muy sensible”, “muy expuesto”, “muy vulnerable”; en amarillo “sensible”, “expuesto”, “vulnerable”; y en verde “moderadamente sensible”, “moderadamente expuesto” y “moderadamente vulnerable”.

El resultado ha sido una clasificación de los 77 taxones ordenados conforme al valor obtenido en su “índice de vulnerabilidad”.

4. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se han realizado únicamente con los valores de sensibilidad y se ha considerado que el único criterio del “índice de exposición” no tiene el mismo peso sobre el valor final del “índice de vulnerabilidad” que cada uno de los subcriterios del “índice de sensibilidad”.

Se ha ejecutado un análisis de componentes principales (ACP) de los 7 subcriterios definidos en el “índice de sensibilidad” (POL, DISP, SEM, ALT, HAB, NIE, IND) con el fin de determinar el peso de cada uno de ellos a la hora de explicar la variabilidad de los resultados, y definir los más relevantes. Se han utilizado el test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) con un valor superior al 0,5 y el Test de Bartlett con un valor inferior de 0,001 para determinar la adecuación de la muestra analizada. Mediante la tabla de communalities (fracción de variabilidad de cada variable) se han determinado los subcriterios más relevantes con un valor superior del 0,5 y se ha creado un gráfico con los componentes principales (GARMENDIA *et al.* 2011, GIVEN & NORTON 1993). Posteriormente, se ha elaborado un clúster jerárquico con los 77 taxones, utilizando los 7 subcriterios del “índice de sensibilidad” para observar las disimilitudes derivadas de la matriz de las distancias euclídeas. Los datos se han estandarizado con Z-score (GARMENDIA *et al.* 2011). Los análisis estadísticos se han hecho con el paquete estadístico SPSS 19.

III. Resultados

1. Clasificación de los taxones según su sensibilidad, exposición y vulnerabilidad

1.2. Índice de Sensibilidad (IS)

No se ha obtenido ninguna valoración “extremadamente sensible” (IS=3,25-4). Como “muy sensibles” (IS=2,5-3,24) aparecen 13 taxones (16,88%), entre las que destaca *Sorbus chamaemespilus* con un valor medio de IS=2,71, seguido por *Cerastium cerastioides*, *Gentiana burseri*, *Vaccinium uliginosum* y *Phyteuma hemisphaericum* entre otras, con un valor de IS=2,57. En la categoría de “sensibles” (IS=1,75-2,49) han sido clasificados 62 taxones (80,52%), habiendo obtenido la mayoría de los taxones los valores medios de IS=2,43 y IS=2,29. En la categoría de “moderadamente sensible” (IS=1-1,74) tenemos solo dos (2,6%), *Crepis pygmaea* y *Silene rupestris*, ambos con el mismo valor IS=1,71 (Tabla 2).

1.3. Índice de Exposición (IE)

Un total de 64 taxones (83,12%) han sido evaluados como “extremadamente expuestos” (IE=3,25-4). *Poa laxa*, *Daphne cneorum* y *Salix retusa* (IE=4) obtienen el valor máximo, seguidas por *Sorbus chamaemespilus*, *Minuartia cerastiifolia*, *Leontodon duboisii*, *Bartsia alpina*, *Gentiana alpina* (IE=3,97), y *Phyteuma hemisphaericum* (IE=3,94). Como “muy expuestos” (IE=2,5-3,24) hay 10 taxones (12,99%) entre ellos, *Festuca gautieri* (IE=3,19), *Viola biflora* (IE=3,19) o *Nardus stricta* (IE=3,01). Tres (3,9%) “expuestos” (IE=1,75-2,49): *Veronica aragonensis* (IE=2,38), *Festuca altopyrenaica* (IE=2,26) y *Ranunculus amplexicaulis* (IE=1,99). La categoría de “exposición moderada” (IE=1-1,74) ha quedado vacía (Tabla 2).

1.4. Índice de Vulnerabilidad (IV)

Han destacado 2 (2,6%) como, “extremadamente vulnerables” (IV=3,25-4): *Sorbus chamaemespilus*, IV=3,34 y *Phyteuma hemisphaericum*, IV=3,26, respectivamente. La gran mayoría, 69 (89,61%), quedan como “muy vulnerables” (IV=2,5-3,24), entre las que destacan *Salix retusa* y *Gentiana burseri* (ambas IV=3,21), *Minuartia cerastioides*, *Leontodon duboisii* y *Bartsia alpina* (IV=3,20). Como “vulnerables” (IV=1,75-2,49) quedan 6 (7,79%): *Saponaria caespitosa* (IV=2,47), *Arenaria tetraqueta* (IV=2,44), *Borderea pyrenaica* (IV=2,42), *Veronica aragonensis* (IV=2,33), *Festuca altopyrenaica* (IV=2,2) y *Ranunculus amplexicaulis* (IV=2,07) y ninguno en la categoría de “vulnerabilidad moderada” (IV=1-1,74) (Tabla 2).

En un análisis de los subcriterios, con lo que respecta al “índice de exposición”, el 81,81% (63) han sido incluidos a la categoría de “extremadamente expuesto” (IE=3,25-4) (EXP). En cambio, con el “índice de sensibilidad”, sólo en dos de los subcriterios la mayoría de los taxones han sido incluidos en la categoría “extremadamente sensible” (IS=3,25-4): “altitud”, con un total del 93,5% (72 taxones), y ‘nieve’, con un total de 53,25% (41 taxones). La mayoría de los subcriterios han presentado un mayor número de taxones clasificados en la categoría de “sensible” (IS= 1,75-2,49): en “polinización” un 71,42% (55) de los taxones, en “dispersión de semillas” un 61,03% (47), en “tipo de semillas” un 98,70% (76) y en “dependencia hídrica” un 49,93% (38). En el caso de “número de individuos estimados”, la mayoría de los taxones, 87,01% (67) se categorizan como “moderadamente sensible” (IS=1-1,74).

2. Análisis de componentes principales (ACP/PCA)

Los valores obtenidos en el test Kaiser-Meyer-Olkin (KMO> 0,5) y el Test de Bartlett (<0,001) han determinado la adecuación de los datos de la muestra analizados posteriormente.

NOMBRE CIENTIFICO	MEDIA SENS	MEDIA EXP	MEDIA VUL
<i>Sorbus chamaespilus</i>	2,71	3,97	3,34
<i>Phyteuma hemisphaericum</i>	2,57	3,94	3,26
<i>Salix retusa</i>	2,43	4	3,21
<i>Gentiana burseri</i>	2,57	3,85	3,21
<i>Minuartia cerastiifolia</i>	2,43	3,97	3,2
<i>Leontodon duboisii</i>	2,43	3,97	3,2
<i>Bartsia alpina</i>	2,43	3,97	3,2
<i>Thalictrum alpinum</i>	2,57	3,82	3,2
<i>Carex curvula</i>	2,43	3,94	3,18
<i>Androsace ciliata</i>	2,43	3,94	3,18
<i>Draba dubia</i>	2,43	3,94	3,18
<i>Minuartia sedoides</i>	2,43	3,94	3,18
<i>Carex frigida</i>	2,43	3,94	3,18
<i>Cerastium cerastoides</i>	2,57	3,79	3,18
<i>Sparganium angustifolium</i>	2,57	3,79	3,18
<i>Artemisia eriantha</i>	2,43	3,91	3,17
<i>Primula integrifolia</i>	2,57	3,76	3,17
<i>Salix reticulata</i>	2,43	3,88	3,15
<i>Daphne cneorum</i>	2,29	4	3,14
<i>Epilobium anagallidifolium</i>	2,43	3,85	3,14
<i>Leuzea cynaroides</i>	2,43	3,85	3,14
<i>Rhododendron ferrugineum</i>	2,43	3,85	3,14
<i>Galium cespitosum</i>	2,43	3,82	3,12
<i>Dryas octopetala</i>	2,29	3,94	3,11
<i>Kobresia simpliciuscula</i>	2,29	3,94	3,11
<i>Cerastium alpinum</i>	2,43	3,79	3,11
<i>Oxytropis campestris</i>	2,57	3,64	3,11
<i>Salix pyrenaica</i>	2,29	3,91	3,1
<i>Papaver lapeyrousianum</i>	2,29	3,91	3,1
<i>Saxifraga oppositifolia</i>	2,29	3,91	3,1
<i>Kobresia myosuroides</i>	2,29	3,91	3,1
<i>Petasites paradoxus</i>	2,43	3,76	3,09
<i>Vaccinium uliginosum</i>	2,57	3,61	3,09
<i>Geum montanum</i>	2,57	3,61	3,09
<i>Veronica alpina</i>	2,29	3,88	3,08
<i>Sibbaldia procumbens</i>	2,29	3,85	3,07
<i>Salix herbacea</i>	2,43	3,7	3,06
<i>Carex capillaris</i>	2,43	3,7	3,06
<i>Persicaria vivipara</i>	2,43	3,7	3,06

NOMBRE CIENTIFICO	MEDIA SENS	MEDIA EXP	MEDIA VUL
<i>Gentiana alpina</i>	2,14	3,97	3,06
<i>Artemisia umbelliformis</i>	2,43	3,67	3,05
<i>Pinus uncinata</i>	2,29	3,79	3,04
<i>Saxifraga aizoides</i>	2,29	3,73	3,01
<i>Poa laxa</i>	2	4	3
<i>Crepis pyrenaica</i>	2,14	3,85	3
<i>Ranunculus glacialis</i>	2,43	3,55	2,99
<i>Equisetum variegatum</i>	2,43	3,55	2,99
<i>Saxifraga pubescens</i>	2,29	3,67	2,98
<i>Cardamine resedifolia</i>	2,14	3,79	2,97
<i>Festuca eskia</i>	2,14	3,79	2,97
<i>Geranium cinereum</i>	2,29	3,61	2,95
<i>Festuca pyrenaica</i>	2,14	3,7	2,92
<i>Leontodon pyrenaicus</i>	2,43	3,4	2,91
<i>Primula farinosa</i>	2,43	3,4	2,91
<i>Swertia perennis</i>	2,57	3,25	2,91
<i>Festuca glacialis</i>	2,14	3,67	2,91
<i>Reseda glauca</i>	1,86	3,94	2,9
<i>Oxytropis foucaudii</i>	2,57	3,22	2,9
<i>Viola biflora</i>	2,57	3,19	2,88
<i>Valeriana apula</i>	2,29	3,43	2,86
<i>Helictotrichon sedenense</i>	2	3,7	2,85
<i>Ranunculus pyrenaicus</i>	2,14	3,52	2,83
<i>Oxyria digyna</i>	2,29	3,37	2,83
<i>Crepis pygmaea</i>	1,71	3,91	2,81
<i>Luzula nutans</i>	2,14	3,46	2,8
<i>Trifolium thalii</i>	2,14	3,16	2,65
<i>Nardus stricta</i>	2,29	3,01	2,65
<i>Silene rupestris</i>	1,71	3,55	2,63
<i>Festuca gautieri</i>	2	3,19	2,6
<i>Saxifraga hartioides</i>	2	3,1	2,55
<i>Meum athamanticum</i>	2,43	2,62	2,52
<i>Saponaria caespitosa</i>	2,14	2,8	2,47
<i>Arenaria tetraquetra</i>	2,29	2,59	2,44
<i>Borderea pyrenaica</i>	2	2,83	2,42
<i>Veronica aragonensis</i>	2,29	2,38	2,33
<i>Festuca altopyrenaica</i>	2,14	2,26	2,2
<i>Ranunculus amplexicaulis</i>	2,14	1,99	2,07

Tabla 2. Ranking de los 77 táxones valoradas en el índice de sensibilidad, exposición y vulnerabilidad. Ordenadas de mayor a menor vulnerabilidad. Colores según la tabla 1. Lista taxonómica y nomenclatural, ver <http://www.atlasflorapyrenea.eu>

Según los valores de communalities, los subcriterios más significativos han sido ‘nieve’ (0,765) y ‘hábitat’ (0,557). En la tabla de la varianza acumulada se observa que con los tres primeros componentes se ha explicado el 81,117% de la varianza total. En la tabla de la matriz de componentes, el subcriterio más relevante del primer componente ha sido ‘nieve’ con un valor de 0,810, el del segundo componente ha sido ‘hábitat’ con un valor de 0,605 y finalmente el del tercer componente ha sido ‘dispersión’ con un valor de 0,537. Por eso, a pesar de que ‘dispersión’, aparece como no significativo en la tabla de communalities con un valor <0,5 (DISP=0,339), se ha considerado un subcriterio relevante.

Clúster

Mediante un clúster jerárquico se ha elaborado un dendrograma basado en el promedio de vinculación de los táxones teniendo en cuenta las distancias euclideas. Se han definido cinco grandes grupos:

- *Grupo I:* Táxones con gran dependencia hídrica, propágulos de baja durabilidad, y rango altitudinal amplio, más del 50% de las poblaciones con distribuciones en pisos superiores al subalpino. Un único taxon, *Equisetum variegatum*.
- *Grupo II:* Táxones con un amplio rango altitudinal, con más del 50% de las poblaciones en alturas superiores al piso subalpino, dependencia hídrica y de la nieve moderada, sin

requerimientos de polinización ni dispersión de semillas especiales. *Cardamine resedifolia*, *Festuca altopyrenaica*, *F. gautieri* y *Luzula nutans*.

- *Grupo III*: Grupo de táxones con menor dependencia hídrica y de la nieve, ligado a ambientes más secos y con más del 90% de las poblaciones por encima del piso subalpino. *Saponaria caespitosa*, *Silene rupestris* y *Crepis pygmaea*.

- *Grupo IV*: Táxones con más del 90% de las poblaciones en pisos subalpino y alpino-subnival, con no muchos individuos en el territorio (<1 000) y gran capacidad para la dispersión de semillas. En el caso de *Salix* spp., también presentan una gran capacidad de polinización. *Salix reticulata*, *Salix retusa*, *Salix herbacea*, *Epilobium anagallidifolium*, *Petasites paradoxus*, *Veronica aragonensis*, *Leuzea cynaroides* y *Sorbus chamaemespilus*.

- *Grupo V*: Táxones de alto rango altitudinal, con más del 90% de las poblaciones el piso subalpino o alpino-subnival y gran número de ejemplares en el territorio (>1 000). Es el grupo que más táxones ha abarcado. Se han establecido tres subgrupos:

- *Grupo V.I*: Táxones con dependencia hídrica y nival moderada, con capacidad limitada de dispersión de semillas: *Oxytropis campestris*, *O. foucaudii*, *Geum montanum*, *Daphne cneorum*, *Geranium cinereum* y *Borderea pyrenaica*.

- *Grupo V.II*: Táxones con polinización anemófila en su mayoría, o fácil polinización, y con dependencia hídrica y nival media-alta: *Oxyria digyna*, *Pinus uncinata*, *Helictotrichon sedenense*, *Poa laxa*, *Festuca glacialis*, *Festuca pyrenaica*, *F. eskia*, *Reseda glauca*, *Kobresia myosuroides*, *K. simpliciuscula*, *Nardus stricta*, *Carex capillaris*, *C. curvula* subsp. *rosae*, *C. frigida* y *Salix pyrenaica*.

- *Grupo V.III*: Táxones con polinización zoófila generalista y/o alta dependencia hídrica y nival: *Leontodon duboisii*, *L. pyrenaicus* subsp. *pyrenaicus*, *Saxifraga hariotii*, *S. pubescens* subsp. *iratiana*, *S. oppositifolia*, *S. aizoides*, *Crepis pyrenaica*, *Sibbaldia procumbens*, *Ranunculus amplexicaulis*, *R. pyrenaicus*, *R. glacialis*, *Gentiana alpina*, *Trifolium thalii*, *Papaver lapeyrousianum*, *Dryas octopetala*, *Veronica alpina*, *Valeriana apula*, *Rhododendron ferrugineum*, *Arenaria tetraquetra*, *Artemisia umbelliformis*, *A. eriantha*, *Draba dubia* subsp. *laevipes*, *Cerastium alpinum*, *C. cerastoides*, *Minuartia cerastiifolia*, *M. sedoides*, *Galium cespitosum*, *Androsace ciliata*, *Swertia perennis*, *Sparganium angustifolium*, *Meum athamanticum*, *Bartsia alpina*, *Primula farinosa*, *P. integrifolia*, *Persicaria vivipara*, *Phyteuma hemisphaericum*, *Gentiana burseri* subsp. *burseri*, *Thalictrum alpinum*, *Viola biflora* y *Vaccinium uliginosum*.

IV. Discusión y conclusión

En la muestra de táxones estudiados, el rango del “índice de exposición” presenta valores medios muy altos, o sea, un riesgo de pérdida de territorio muy elevado (ENGLER *et al.* 2011). Nada menos que 64, el 83% de los táxones reflejan un grado de amenaza extremo, dificultando determinar prioridades. Sin embargo, teniendo en cuenta el “índice de sensibilidad”, en el que se valoran las características intrínsecas de los táxones o, de otro modo, la capacidad de hacer frente a condiciones de cambio, sólo 2 táxones (2,6%) (*Sorbus chamaemespilus* y

Phyteuma hemisphaericum) obtienen la categoría máxima de “extremadamente vulnerable”. Aun así, la gran mayoría, 69 táxones (90%), se evalúan como “muy vulnerables”. Por ello, a pesar de que con frecuencia se determine la vulnerabilidad de los táxones con el “índice de exposición” (ENGLER *et al.* 2009, 2011), en este trabajo se han considerado decisivos los datos relacionados con la sensibilidad y la capacidad de respuesta ante el cambio climático a la hora de determinarla (ZACHARY *et al.* 2011).

Los subcriterios con valores medios más altos son EXP, ALT y NIE, de lo que se deriva que las variaciones climáticas previstas para el Pirineo en el periodo 1990-2100 (EXP) afectarán de forma drásticas a muchos de los táxones, siendo la distribución altitudinal (ALT), y por tanto la adaptación a condiciones climáticas extremas, y la dependencia de la nieve (NIE), los que determinan de forma directa la sensibilidad de la muestra estudiada.

Más de un criterio resulta relevante para determinar la sensibilidad de la flora pirenaica ante el cambio climático, NIE, HAB y DISP. La disminución de la cobertura de nieve será uno de los criterios determinantes en la distribución de las plantas alpinas (KÖRNER 1999) y la combinación de disminución de la cobertura de nieve y el aumento de la temperatura podría derivar en la pérdida del hábitat potencial de numerosos táxones y hacer que los ecosistemas se comporten como sistemas en desequilibrio (GRABHER *et al.* 2010, SVENNING & SANDEL 2013). Por otra parte, la flora ligada a ambientes húmedos se considera especialmente vulnerable, ya que el cambio del régimen y abundancia de las precipitaciones afectará al desarrollo de su ciclo vital (THEURILLAT & GUISAN 2001). Respecto a la biología reproductiva, la clave estriba en la capacidad de dispersión de semillas o esporas a larga distancia (KÖRNER 1999, ENGLER *et al.* 2009), hecho que facilita colonizar nuevos territorios ecológicamente adecuados para su supervivencia (ENGLER *et al.* 2009).

Los criterios POL, SEM, ALT e IND han resultado no significativos. A pesar de que ALT obtiene un valor medio alto en el análisis de los subcriterios, no aparece como significativo por la homogeneidad de la muestra respecto a ese subcriterio. Ocurre algo similar con IND, ya que la homogeneidad de la muestra hace que no sea relevante en un análisis estadístico, pero en este caso el valor medio obtenido es el más bajo por tratarse de una muestra con táxones con riesgo escaso en este subcriterio.

Los dos táxones considerados más vulnerables en el ranking, no se encuentran en el mismo grupo en el clúster. Cada uno de ellos ha merecido su categoría por el conjunto de sus características y no por una sola, así pues, la sensibilidad de cada taxon está determinada por el conjunto de características más que por cada una de ellas.

Con la información disponible impide valorar todos los subcriterios deseables para establecer del “índice de sensibilidad”. Factores como la longevidad de los táxones, perturbaciones en el ambiente, la plasticidad fenológica o la variabilidad genética de las poblaciones, entre otros, podrían aportar información muy relevante (SVENNING & SANDEL 2013, THEURILLAT & GUISAN 2001, WITTE & STÖCKLIN 2010).

BIBLIOGRAFIA

- BERTHEL, N., C. SCHWÖRER & W. TINNER. 2011. – Impact of Holocene climate changes on alpine and treeline vegetation at Sanetsch Pass, Bernese Alps, Switzerland. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 174: 91-100.
- BENITO-ALONSO, J.L. 2011. – *Puesta en marcha de la zona piloto ESPY (Pirineo silíceo) con metodología GLORIA, para el estudio de los efectos del cambio climático sobre la flora de la alta montaña en Aragón, año 2011 (GLORIA-ARAGÓN, 2011)*. Jolube consultoría ambiental, 28 pp.
- ENGLER, R., C.F. RANDIN, P. VITTOZ, T. CZÁKA, M. BENISTON, N.E. ZIMMERMANN & A. GUISAN. 2009. – Predicting future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter? *Ecography*, 32: 34-45.
- ENGLER, R., C.F. RANDIN, W. THUILLER, S. DULLINGER, N.E. ZIMMERMANN, M.B. ARAÚJO *et al.* 2011. – 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology*, 12 pp.
- FABER-LANGENDOEN, D., J. NICHOLS, L. MASTER, K. SNOW, A. TOMAINO, R. BITTMAN, G. HAMMERSON, B. HEIDEL, L. RAMSAY, A. TEUCHER & B. YOUNG. 2012. – *NatureServe Conservation Status Assessments: Methodology for Assigning Ranks*. NatureServe, Arlington, VA, 98 pp.
- FERNÁNDEZ, M.R. & M. J. MOLERO. 2011. – The cartography of vegetation in the cryoromediterranean belt of Sierra Nevada: a tool for biodiversity conservation. *Lazaroa*, 32: 101-115.
- GARCÍA, M.B. & D. GÓMEZ. 2007. – Flora del pirineo aragonés. Patrones espaciales de biodiversidad y su relevancia para la conservación. *Pirineos*, 162: 71-88.
- GARDALI, T., N.E. SEAVY, R.T. DIGAUDIO & L.A. COMRACK. 2012. – A Climate Change Vulnerability Assessment of California's At-Risk Birds. *PLoS ONE*, 7 (3): e29507.
- GARMENDIA, L., M. SOTO, M. ORTIZ-ZARRAGOITIA, A. ORBEA, M. P. CAJARAVILLE & I. MARIGOMEZ. 2011. – Application of a battery of biomarkers in mussel digestive gland to assess long-term effects of the Prestige oil spill in Galicia and Bay of Biscay: Correlation and multivariate analysis. *Journal of Environmental Monitoring*, 13: 933-942.
- GIVEN, D. & D. NORTON. 1993. – A multivariate approach to assessing threat and for priority setting in threatened species conservation. *Biological Conservation*, 64: 57-66.
- GRABHERR, G., M. GOTTFRIEN & H. PAULI. 2010. – Climate change impacts in Alpine environments. *Geography compass*, 4/8: 1133-1153.
- HEGLAND, S.J., A. NIELSEN, A. LÁZARO, A. L. BJERKNES & O. TOTLAND. 2009. – How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology Letters*, 12: 184-195.
- ILLA, E., E. CARRILLO & J.M. NINOT. 2005. – Patterns of plant traits in Pyrenean alpine vegetation. *Elsevier, Flora*, 201: 528-546.
- IPCC. 2007. – *Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report, Climate Change 2007: Syntheses Report*. UNEP, Genève. 52 pp.
- KÖRNER, C. 1999. – *Alpine plant life. Functional plant ecology of high mountains ecosystems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 344 pp.
- KULLMAN, L. 2010. – Alpine flora dynamics, a critical review of responses to climate change in the Swedish Scandes since the early 1950s. *Nordic Journal of Botany*, 28: 398-408.
- LORDA, M. 2001. – *Guineana N°7: Flora del Pirineo Navarro*. Universidad del País Vasco (EHU/UPV), 560 pp.
- MASTER, L., D. FABER-LANGENDOEN, R. BITTMAN, G.A. HAMMERSON, L. HEIDEL, B. RAMSAY, K. SNOW, A. TEUCHER, & A. TOMAINO. 2012. – *NatureServe Conservation Status Assessments: Factors for Evaluating Species and Ecosystem Risk*. NatureServe, Arlington, VA, 76 pp.
- MEEHL, G., T. STOCKER, W. COLLINS, P. FRIEDLINGSTEIN, A. GAYE, J. GREGORY, A. KITOH, R. KNUTTI, J. MURPHY, A. NODA, S.C. RAPER, I.G. WATTERSON, A. WEAVER & Z. ZHAO. 2007. – *Global climate projections. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, 747-846.
- PARMESAN, C. 2006. – Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology and Systematic*, 37: 637-669.
- PAROLO, G. & G. ROSSI. 2008. – Upward migration of vascular plants following a climate warming trend in The Alps. *Basic and Applied Ecology*, 9: 100-107.
- POSSINGHAM, H., S. ANDELMANN, M. BURGMAN & R. MEDELLIN. 2002. – Limits to the use of threatened species list. *Trends in Ecology & Evolution*, 17: 503-507.
- RUMPF, L., F. COATES, A. MESSINA & J. MORGAN. 2008. – Potential biological indicators of climate change: evidence from phenology records of plants along the victorian coast. Australia. *Australian Journal of Botany*, 58: 428-439.
- SESÉ, J.A. & J.V. FERNÁNDEZ. 1999. – La flora alpina de los Pirineos: un patrimonio singular. In: *Espacios naturales protegidos del Pirineo. Ecología y cartografía*. L. VILLAR. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Huesca, 57-76.
- THEURILLAT, J.P. & A. GUISAN. 2001. – Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. *Climatic Change*, 50 (1-2): 77-109.
- SVENNING, J.C. & B. SANDEL. 2013. – Disequilibrium vegetation dynamics under future climate change. *American Journal of Botany*, 100 (7): 1-21.
- VILLAR, L. & J.L. BENITO-ALONSO. 2003. – La flora alpina y el cambio climático: el caso del Pirineo central (Proyecto GLORIA-Europe). In: *España ante los compromisos del Protocolo de Kioto: Sistemas Naturales y Cambio Climático*. VII Congreso Nacional de la Asociación Española de Ecología Terrestre, 92-105.
- VILLAR, L., J.A. SESÉ & J.V. FERNÁNDEZ. 1997. – *Atlas de la flora del Pirineo Aragonés Vol I*. Instituto de Estudios Altoaragoneses. Huesca, 648 pp.
- VILLAR, L., J.A. SESÉ & J.V. FERNÁNDEZ. 2001. – *Atlas de la flora del Pirineo Aragonés Vol II*. Instituto de Estudios Altoaragoneses. Huesca, 790 pp.
- WITTE, L.C. & J. STÖCLIN. 2010. – Longevity of clonal plants: why it matters and how to measure it. *Annals of Botany*, 106: 859-870.
- YOUNG, B., E. BYERS, K. GRAUER, K. HALL, G. HAMMERSON & A. REDDER. 2010. – *Guidelines NatureServe Climatic Change Vulnerability Index r2.0*. NatureServe. Arlington, VA, 54 pp.
- ZACHARY, L.S., M. WILKERSON, P. GROF-TISZA, & K. SULZNER. 2011. – *Assessing species and area vulnerability to climate change for the Oregon Conservation Strategy*. Willamette Valley Ecoregion. Conservation Management Program. University of California, Davis. 98 pp.