

La modelització dels efectes del canvi climàtic sobre la distribució de les espècies

Benjamin KOMAC i MINGAUD



Introducció

El canvi climàtic és un fet tant cert als Pirineus com a Andorra (Copons *et al.*, 2017) i es preveu que el que ens espera aquest segle sigui de més magnitud que els canvis que ja s'han produït al llarg de la història. Durant els més de 4.500 milions d'anys del nostre planeta, el clima no ha estat sempre el mateix i ha fluctuat bastant; s'estima, però, que com a molt les temperatures han pujat de 4° C en un mil·lenni, mentre que amb el canvi climàtic actual s'espera un increment de temperatura al voltant dels 2° C per a aquest segle. Com a conseqüència del canvi climàtic actual s'estima una disminució de la diversitat vegetal d'entre el 25% i el 40 % a Europa a final d'aquest segle, i les zones de muntanyes seran els àmbits que més podrien perdre espècies (Thuiller *et al.*, 2005).

Determinar com el canvi climàtic pot afectar les espècies, i, per consegüent la biodiversitat, és important al moment d'adoptar mesures de conservació de la biodiversitat o per a la creació d'àrees protegides, entre d'altres. Per determinar la vulnerabilitat d'una espècie amb relació al canvi climàtic es pot fer servir el seu nínxol ecològic potencial, és a dir les condicions bioclimàtiques necessàries per a la seva presència i viabilitat, i veure com anirà canviant de superfície o com es desplaçarà sota noves condicions climàtiques. Per exemple, Parmesa i Yohe (2003) van demostrar un desplaçament cap al nord de 6,1 km o de 6,1 metres cap amunt per dècada del nínxol d'unes espècies com a adaptació al canvi climàtic a l'hemisferi nord. Més enllà, Morueta-Holmes *et al.* (2010) van estudiar l'efecte del canvi climàtic sobre la viabilitat dels cultius de vi per al final d'aquest segle. Van trobar que es podrà cultivar vi a Londres o a bona part d'Alemanya mentre que a gran part d'Espanya i d'Itàlia les noves condicions faran quasi infactible la presència d'aquests cultius. Més a prop nostre, Williams-Tripp *et al.* (2012) van estudiar l'efecte del canvi climàtic sobre el nínxol ecològic potencial per a una espècie endèmica dels Pirineus, l'almesquera (*Galemys pyrenaicus*) i van trobar una reducció del nínxol d'entre el 12% i el 60% per al final d'aquest segle.

Les zones de muntanya en general són llocs amb una gran biodiversitat que va associada a un

fort endemisme a causa d'una forta adaptació de les espècies a les condicions climàtiques particulars d'aquests indrets. El canvi climàtic pot tenir conseqüències molt greus per a la majoria d'aquestes espècies però sense estudiar els efectes del canvi climàtic sobre els seus nínxols ecològics potencials no en podem determinar la magnitud. En aquest article farem servir l'exemple de la modelització del nínxol de l'abarset (*Rhododendron ferrugineum*) a Andorra per explicar les estadístiques que hi ha al darrere d'una modelització de nínxol ecològic potencial. L'abarset és un planta força comuna a Andorra perquè es tracta d'una espècie molt ben adaptada al rigor climàtic de les cotes subalpines i alpines. Les comunitats d'abarset es troben a dins de la Directiva d'hàbitats de la Unió Europa ja que són hàbitats clau per a alguns gal·liformes de muntanya com el gall fer (*Tetrao urogallus* L.). En les últimes dècades, a causa del descens de l'activitat ramadera es nota una intensificació de la colonització de les pastures de muntanya per part de l'espècie, i això podria conduir a problemes mediambientals en el cas de mantenir-se la tendència en el futur. Però avui dia, amb la perspectiva del canvi climàtic, ens podem demanar com evolucionarà aquesta situació: hi haurà un problema per a la conservació dels hàbitats d'abarset o bé perillarà la conservació d'algunes pastures de muntanya? És aquesta problemàtica la que va motivar la realització d'aquest estudi.

L'espècie

L'abarset és una espècie adequada per estudiar la manera en què el canvi climàtic pot afectar el seu nínxol i la seva supervivència en el futur, ja que té uns requeriments ecològics i climàtics particulars: la planta ha d'estar coberta de neu a l'hivern i a la primavera per no patir gelades. La capa de neu aïlla les plantes de l'aire, en protegeix les gemmes, fulles i arrels de les temperatures negatives de l'hivern i evita que el gel afecti els òrgans de desenvolupament de les plantes (Neuner *et al.*, 1999). En cas que no hi hagués neu, les plantes patirien danys importants i el seu creixement i desenvolupament se'n veurien afectats.

El fet que la planta estigui en *equilibri* amb el medi a Andorra, és a dir que la seva presència arreu del país no estigui afectada per factors antròpics, és clau per poder modelitzar-ne el nínxol ecològic potencial de manera correcta.

La recopilació de les dades

Primer de tot, hem de disposar d'un mapa de presència de l'abarset a Andorra. Aquest mapa el vam generar per fotointerpretació d'ortofotos aèries en color de l'any 2012 amb una resolució de mig metre. Vam obtenir una superfície de 14,6 km² ocupats per l'espècie a Andorra, és a dir el 3,1% del territori, i una distribució altitudinal entre els 1.820 i els 2.660 m d'alçada. Vam obtenir una molt bona exactitud de fotointerpretació per a aquest mapa de presència de l'abarset amb un valor de 0,955 pel coeficient *kappa* de Cohen amb 200 punts de control, molt proper d'1, el valor de classificació perfecte. Per poder realitzar el procés de modelització de nínxol, vam extreure un conjunt de 262 punts de presència de l'espècie i 1.738 punts d'absència de l'espècie.

Per determinar el nínxol ecològic potencial de l'abarset, vam fer servir dades climàtiques obtingudes a través de l'*Atlas climàtic d'Andorra* del Cenma-IEA, com la temperatura màxima

i la temperatura mínima, i vam calcular l'acumulació potencial de neu a l'hivern segons la definició de López-Moreno *et al.* (2007). També vam utilitzar dades topogràfiques com l'alçada, el pendent, l'orientació i la radiació solar. Per a cada punt del conjunt vam extreure els valors d'aquestes set variables explicatives i vam obtenir un joc de dades. Després, vam mirar que no hi hagués col·linealitat entre les variables explicatives del joc de dades, és a dir una relació lineal entre variables. En cas que existís alguna relació lineal entre les variables, els resultats de la modelització serien erronis, poc robustos i de difícil interpretació. Per determinar si hi ha col·linealitat entre les variables explicatives fem servir el *Variance Inflation Factor* (VIF), i s'ha d'obtenir un valor del VIF inferior a tres per a cadascuna de les variables utilitzades. Els valors del VIF obtinguts es mostren a la taula 1.

	Alçada	Pendent	Orientació	Acumulació de neu	Radiació solar	Temp. màxima	Temp. mínima
VIF	82,9	1,4	8,2	6,9	33,9	212,1	102,4

Taula 1. Valors del VIF per a les set variables explicatives

Traient les dues variables de temperatures i l'alçada vam obtenir valors del màxim de VIF d'1,1 per a les quatre variables restants i, llavors, vam fer servir aquestes variables per a la modelització del nínxol ecològic potencial de l'abarset.

El problema de l'autocorrelació espacial

L'autocorrelació espacial és un problema molt freqüent en ecologia, ja que es tracta d'una absència d'independència entre dos observacions properes geogràficament d'una variable. Quan l'autocorrelació és positiva, alguns punts propers espacialment tenen tendència a tenir valors molt semblants; això passa molt en zones de muntanya amb gradients regulars o zones de gran homogeneïtat. Quan l'autocorrelació és negativa, punts propers espacialment tenen tendència a tenir valors molts dissemblants.

En el nostre joc de dades, utilitzant el mètode del correlograma de Mantel, vam detectar autocorrelació espacial positiva en el nostre joc de dades. Per això vam incorporar un total de tretze vectors de correccions com a noves variables. Els vectors es van obtenir amb el mètode del *Spatial Eigen Vector Mapping*, i van permetre rebaixar l'autocorrelació espacial fins a un nivell acceptable mitjançant la descomposició de la connectivitat espacial i la seva captura dins dels vectors.

La modelització

Per determinar el nínxol ecològic potencial de l'abarset, vam utilitzar un mètode de regressió, és a dir establir una relació entre la presència o absència de l'espècie amb les variables explicatives. Hi ha molts tipus de regressió que es poden fer servir per modelitzar el nínxol d'una espècie i la recerca del millor model ha de considerar més d'un sol mètode. Per això vam utilitzar cinc mètodes de regressió: el *Generalized Additive Model* (GAM), el *Boosted*

Regression Tree (BRT), el *Artificial Neural Networks* (ANN), el *Classification Tree Analysis* (CTA) i el *Multivariate Adaptive Regression Splines* (MARS). La utilització d'aquests cinc mètodes de regressió ens va permetre determinar amb més precisió la relació complexa que hi ha entre la presència de l'abarset i les variables explicatives ambientals.

Per a cada tipus de regressió, es va procedir al calibratge del model amb el 70% del joc de dades i la validació del model amb el 30% restant del joc de dades. El calibratge del model consisteix en la predicció de la presència o absència de l'abarset en un punt determinat i la validació consisteix a avaluar si la predicció és correcta. Per determinar si la predicció de cada model de regressió és correcta vam utilitzar els mètodes d'avaluacions de l'*Area under the ROC Curve* (AUC) i el *True Skill Statistic* (TSS). Tot això es va repetir quatre cops per a cada tipus de regressió, i vam obtenir valors d'AUC superiors a 0,9 i de TSS superior a 0,7, que indiquen una molt bona predicció del nínxol potencial de l'abarset a Andorra. Va ser el mètode de regressió BRT el que va donar els resultats més acurats (0,959 i 0,801 pels valors de l'AUC i del TSS, respectivament) i el mètode MARS el que va proporcionar els resultats menys positius, però tot i això, molt robustos (0,930 i 0,717 pels valors de l'AUC i del TSS, respectivament). Aquesta excel·lent predicció dels models, associada al fet que l'acumulació potencial de neu a l'hivern és la variable amb més pes explicatiu dins de cadascun dels models, ens ha permès fer una projecció molt acurada de l'efecte de canvi climàtic sobre el nínxol ecològic potencial de l'abarset a Andorra.

Un cop obtinguts i validats els models de regressions, vam generar un mapa de probabilitat de presència de l'abarset a Andorra. La probabilitat de presència amb valors d'entre 0 i 1, essent 0 la probabilitat més baixa de presència i 1 la probabilitat de presència més alta de l'espècie (Figura 1A). Vam utilitzar dos criteris per determinar el punt de tall entre l'absència i la presència de l'espècie: amb el criteri de *Sensitivity-Specificity Sum Maximization* vam obtenir un valor de 0,47 i amb el criteri de *Sensitivity/Specificity Equality* un valor de 0,56. Així bé, una probabilitat per sota de 0,515 indica l'absència de l'espècie i una probabilitat per sobre de 0,515 indica la presència de l'espècie.

El nínxol ecològic potencial de l'abarset

El resultat de la modelització del nínxol ecològic potencial de l'abarset mostra una superfície potencial del nínxol de 70,7 km² a Andorra (figura 1B).

L'abarset ocupa un 20,7% del seu nínxol potencial. La part del seu nínxol que no ocupa correspon sobretot a hàbitats de boscos i de pastures (28,4 i 25%, respectivament) i també a hàbitats de roquissars i tarteres (20,3%) que són més difícils de colonitzar (es mouen i tenen poc substrat en comparació amb els altres hàbitats, i és més difícil per a la vegetació en general de fixar-s'hi).

Les condicions climàtiques que caracteritzen el nínxol ecològic potencial de l'espècie són una pendent d'entre 10 i 35°, en vessants nord on les precipitacions anuals són d'entre 1.000 i 1.350 mm, de les quals entre 200 i 275 cauen en forma de neu. La temperatura màxima anual se situa entre 5,9 i 9,5 °C (entre 0,1 i 3,0 °C durant l'hivern) i la temperatura mínima se situa entre 3,9 i 5,6 °C (entre -6 i -4,5 °C durant l'hivern).

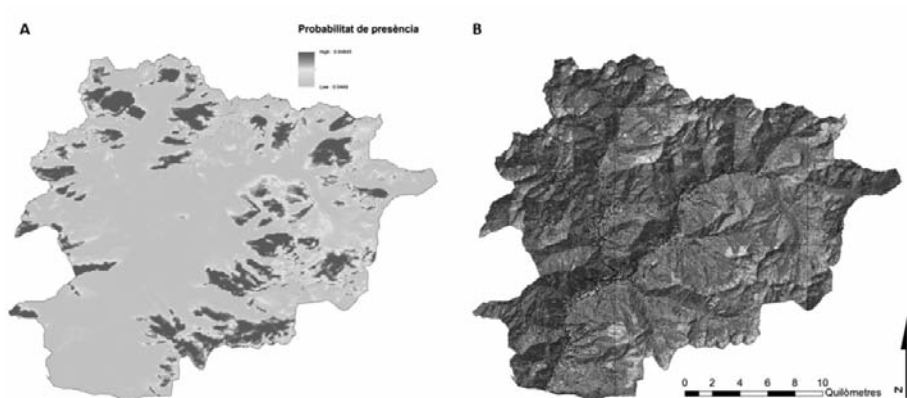


Figura 1. El mapa de probabilitat de presència de l'abarset a Andorra (A) i el seu nínxol ecològic potencial en color rosa projectat sobre el mapa topogràfic d'Andorra (B)

El nínxol ecològic potencial de l'abarset sota diferents escenaris de canvi climàtic

Per implementar els efectes del canvi climàtic sobre el nínxol ecològic potencial de l'abarset vam triar els escenaris A2, A1B i B1 de l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Com que encara existeix bastant incertesa sobre la magnitud del canvi climàtic, van implementar el nínxol ecològic potencial sota un escenari de canvi climàtic conservador (B1), un escenari intermedi (A1B) i un escenari dràstic (A2) per al període de referència 2071-2100. Com que l'única variable explicativa en relació amb el clima és l'acumulació potencial de neu, vam aplicar factors de correccions a les dades climàtiques que s'utilitzen per calcular aquesta variable (taula 2). Els valors aplicats van ser obtinguts del projecte Scampeï (*Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne: Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes* desenvolupats pel Centre Nacional de Recerques Meteorològiques de França) amb l'objectiu de tenir valors realistes del canvi climàtic per a Andorra.

	Escenari B1 (conservador)	Escenari A1B (intermedi)	Escenari A2 (dràstic)
Precipitació (en mm)	- 62,8	- 160,1	- 174,9
Temperatura màxima (en °C)	+ 2,4	+ 3,7	+ 4,6
Temperatura mínima (en °C)	+ 1,8	+ 2,7	+ 3,5

Taula 2. Els valors de correccions aplicats a les dades climàtiques que s'utilitzen per calcular l'acumulació potencial de neu a l'hivern a Andorra

Els resultats obtinguts mostren una forta disminució del nínxol ecològic potencial de l'abarset a final del segle a Andorra com a conseqüència del canvi climàtic. Per a l'escenari conservador B1, el nínxol potencial seria d'uns 32,8 km², és a dir que es reduiria el nínxol actual d'un 54% i només 17,4 km² del nínxol potencial actual es mantindria dins del nínxol potencial futur (figura 2). Pel que fa a l'escenari intermedi de canvi climàtic A1B, el nínxol potencial seria d'uns 2,8 km², és a dir que es reduiria el nínxol actual un 96% i només 2,8 km² del nínxol potencial actual es mantindria dins del nínxol potencial futur. Finalment, per a l'escenari més dràstic de canvi climàtic A2, el nínxol potencial seria d'uns 0,1 km², és a dir que es reduiria el nínxol actual un 92% i només 0,1 km² del nínxol potencial actual es mantindria dins del nínxol potencial futur (figura 2).

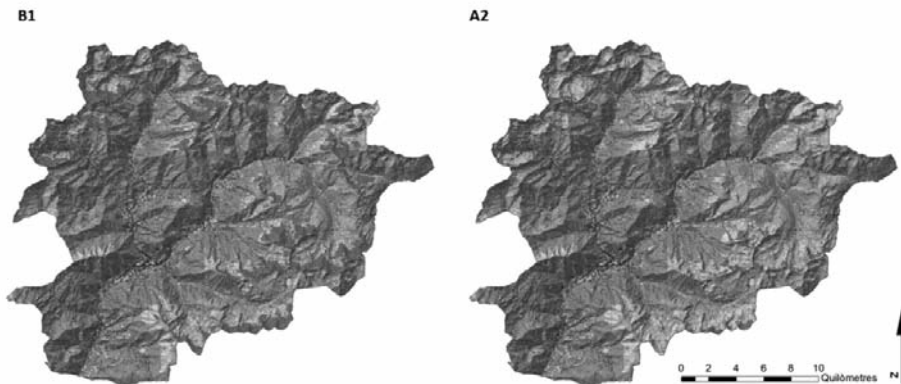


Figura 2. Els nínxols ecològics potencial futurs de l'abarset en color rosa a Andorra per als escenaris de canvi climàtic B1 i A2

Els efectes del canvi climàtic als Pirineus preveuen una forta disminució de la durada de presència de neu en la franja dels 1.500 a 2.000 m d'alçada (Szczypta et al., 2015). D'aquesta manera, per mantenir-se sota condicions climàtiques adequades a la seva persistència, l'abarset haurà de migrar o desplaçar-se cap amunt a les nostres muntanyes. Per exemple, en cas que no estigui cobert per la neu als llocs on es troba actualment, estaria sotmès a una temperatura d'entre -4,8 i -1 °C durant l'hivern. En el cas de l'escenari B1, el límit inferior del seu nínxol pujarà uns 280 m més amunt, a l'escenari A1B el límit pujarà uns 610 m més amunt i a l'escenari més dràstic, A2, el límit pujarà d'uns 540 m amunt.

Conseqüències del canvi climàtic sobre l'abarset a Andorra

Els resultats obtinguts en aquest estudi mostren un reducció força gran del nínxol ecològic potencial de l'abarset a final del segle a Andorra com a conseqüència del canvi climàtic, tot i

que hi ha incertesa sobre la magnitud. Com a conseqüència, quant a la conservació dels hàbitats d'abarset, podem suposar un reemplaçament de l'espècie per d'altres matollars o bé per alguns boscos a les cotes més baixes del seu nínxol ecològic. Mentre que a cotes més altes, la persistència de l'espècie dependrà de l'adaptació a noves condicions climàtiques, però també de les interaccions amb les altres espècies. Trigarem algunes dècades a veure algunes transformacions significatives en la distribució de l'espècie a Andorra perquè les plantes tenen força capacitat d'adaptació als canvis.

Pel que fa a la pregunta que va motivar aquest estudi, sembla que les conseqüències futures del canvi climàtic sobre l'abarset tindran repercussions més greus sobre la conservació del gall fer, ja que els hàbitats de l'espècie ocuparan menys superfície. En referència a les pastures de muntanya, probablement la colonització dels matollars continuarà si no canvia la tendència però no necessàriament seran abarsets, probablement hi haurà altres tipus de matollars que també colonitzaran les pastures.

Més enllà del cas específic de l'abarset, aquest estudi també ens ha permès veure la manera com el canvi climàtic podrà afectar de manera important l'extensió dels nínxols ecològics de les espècies particularment ben adaptades a les condicions climàtiques de les muntanyes. La metodologia i els models estadístics utilitzats en aquest estudi no són perfectes, no incorporen per exemple la interacció entre espècies o la dinàmica de les poblacions, però de moment són una de les eines més apropiades i precises per avaluar de la manera més realista possible els efectes del canvi climàtic sobre la biodiversitat i la seva conservació.

Benjamin Komac i Mingaud,

doctor en Biodiversitat, Ecologia i Medi Ambient,
unitat de Medi Biòtic, Cenma-IEA

Referències

- COPONS, R.; TRAPERO, L.; PONS, M. (2017) "La realitat del canvi climàtic". *El canvi climàtic i Andorra*. 29a diada Andorrana a l'UCE. Societat Andorrana de Ciències, Andorra.
- HANNAH, L.; ROEHRDANZ, P. R.; IKEGAMI, M.; SHEPARD, A. V.; SHAW, M. R.; TABOR, G.; ZHI L.; MARQUET, P. A.; HUMANS, R. J. (2013) "Climate change, wine, and conservation". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 17, p. 6.097-6.912.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; VICENTE-SERRANO, S. V.; LANJERI S. (2007) "Mapping snowpack distribution over large areas using GIS and interpolation techniques". *Climate Research*, 33, p. 257-70.
- NEUNER, G.; AMBACH, D.; AICHNER, K. (1999) "Impact of snow cover on photoinhibition and winter desiccation in evergreen *Rhododendron ferrugineum* leaves during subalpine winter". *Tree Physiologist*, 19, 11, p. 725-732.
- SZCZYPTA, C.; GASCOIN, S.; HOUET, T.; HAGOLLE, O.; DEJOUX, J. F.; VIGNEAU, C.; FANISE, P. (2015) "Impact of climate and land cover changes on snow cover in a small Pyrenean catchment". *Journal of Hydrology*, 521, p. 84-99.
- THUILLER, W.; LAVOREL, S.; ARAÚJO, M. B.; SYKES, M. T.; PRENTICE, I. C. (2005) "Climate change threats to plant diversity in Europe". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 23, p. 8245-8250.
- WILLIAMS-TRIPP, M.; D'AMICO, F. J. N.; PAGÉ, C.; BERTRAND, A.; NÉMOZ, M.; BROWN, J. A. (2012) "Modeling rare species Distribution at the edge: the case for the vulnerable endemic Pyrenean desman in France". *The Scientific World Journal*, 2012, 4, p. 1-6.