1. En plantas terrestres, la regeneración depende de la habilidad de las semillas para germinar en las condiciones climáticas más favorables. Por tanto, entender la fenología de la germinación es crucial para predecir respuestas de las plantas a cambios ambientales. Sin embargo, hay una considerable falta de conocimiento sobre como las condiciones microclimáticas influencian la germinación en ecosistemas estacionales.

2. En este estudio, investigamos la fenología de la germinación de plantas alpinas en gradientes de nieve a través de una nueva metodología para poder predecir la resiliencia de las comunidades alpinas al cambio climático. Realizamos un experimento estacional continuo con semillas frescas para investigar la fenología de la germinación de 54 especies que coocurren en comunidades alpinas Mediterraneas y templadas. Usando series a largo plazo de datos microclimáticos de campo, simulamos de forma precisa dos condiciones microclimáticas contrastantes: (1) crestas expuestas al viento, con períodos sin nieve en invierno y temperaturas altas en verano (i.e. “fellfield”) y (2) áreas protegidas con un período largo de nieve en invierno y temperaturas frescas en verano (i.e. “snowbed”). Adicionalmente, validamos los resultados obtenidos en el laboratorio con experimentos de siembra en campo, para así, proveer una visión completa de la fenología de la germinación.

3. El análisis de los caracteres de fenología de la germinación mostraron que las dos comunidades exhiben respuestas similares de fenología a la variación microclimática. Nuestros resultados mostraron que pequeñas variaciones semanales de 2-3 grados Celsius, a lo largo de todo el año en los experimentos de laboratorio), resultaron en un retraso de la fenología de la germinación cuantificable, con promedios de entre 60 y 45 días en las condiciones de snowbed. Los resultados de las cámaras de germinación, bajo condiciones microclimáticas realistas, fueron consistentes con la fenología de la germinación registrada en los experimentos de campo. También observamos efectos macroclimáticos como una menor dormición y mayor germinación en otoño en aquellas semillas de la comunidad Mediterránea.

Síntesis. Nuestro estudio combina innovadora experimentación de laboratorio con datos de campo para abordar el estudio de la fenología de la germinación en áreas alpinas con abruptos gradientes microclimáticos. Los resultados sugieren una tendencia cuantificable en la fenología de la germinación debido a estos gradientes. En condiciones más cálidas y con poca nieve, se espera que las especies alpinas adelanten su germinación una media de 52 días, con potenciales efectos negativos en aquellas especies adaptadas a germinar en condiciones más frías. Nuestros resultados indican que la fenología en la regeneración es un proceso crucial para determinar las relaciones entre plantas y ambiente en zonas alpinas de latitud media, con importantes impactos en el establecimiento de las plantas y en los riesgos de extinción bajo condiciones microclimáticas locales.

## Abstract

1. In most terrestrial plants, regeneration depends on the ability of seeds to germinate at the most favourable climatic conditions. Thus, understanding seed germination phenology is crucial for predicting plant responses to environmental changes. However, a substantial gap persists regarding how microclimatic conditions influence germination in different seasonal ecosystems.

2. Here, we investigate the germination phenology of alpine plants in snow-related microclimates as a new tool for predicting the resilience of alpine communities to climate change. We conducted a continuous seasonal experiment with fresh seeds to investigate germination phenology in 54 co-occurring species from temperate and Mediterranean alpine communities. Using long-term field microclimatic data series, we precisely mimicked two contrasting microclimatic conditions: (1) windy exposed edges with snow-free period in winter and warmer temperatures in summer (i.e “fellfield”) and (2) sheltered areas with lengthy snow cover and cooler temperatures (i.e. “snowbed”) in growth chambers. Additionally, we validated the laboratory results with field sowing experiments to provide a complete picture of germination phenology.

3. The analysis of phenology traits demonstrated that both communities displayed similar phenology responses to microclimatic variation. Our results showed that accumulated small microclimatic differences of 2-3 degrees Celsius a week , across a whole year in the laboratory, resulted in a quantifiable germination phenology delay, with an average of 60 and 45 days in the snowbed conditions. The results from climatic chambers under realistic microclimatic conditions were consistent with the germination phenology registered from field experiments. We also observed macroclimatic effects resulting in reduced dormancy and increased autumn germination in Mediterranean seeds.

Synthesis. Our study combines novel laboratory and field experimentation to tackle the understudied topic of germination phenology in alpine areas with sharp microclimatic gradients. The results suggest a predictable phenological shift in the germination of alpine plants along microclimatic gradients. In warmer conditions with reduced snow cover, alpine species are expected to advance germination 52 days on average, with potential disrupting effects on cold-adapted plant communities. Our results suggests that regeneration phenology is a crucial process to determine plant-environmental relationships in mid-latitude alpine ecosystems, with strong impact on plant establishment and extinction risks under local microclimatic gradients.