



Efectos del cambio climático en la vegetación de la alta montaña de Tenerife

Jose L. Martín-Esquivel^{1,*} , Manuel V. Marrero-Gómez¹, Juana M. González Mancebo²

(1) Parque Nacional del Teide, C/ Dr. Sixto Perera González, 25, 38300 La Orotava, Tenerife, Islas Canarias, España

(2) Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal, Universidad de La Laguna, Avda. Francisco Sánchez S/N, 38200 Apdo. 456, La Laguna, Tenerife, Islas Canarias, España

* Autor de Correspondencia: Jose L. Martín-Esquivel [jmartine@tenerife.es]

> Recibido el 08 de marzo de 2021 - Aceptado el 09 de abril de 2021

Como citar: Martín-Esquivel, J.L., Marrero-Gómez, M.V., González Mancebo, J.M. 2021. Efectos del cambio climático en la vegetación de la alta montaña de Tenerife. *Ecosistemas* 30(1): 2189. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2189>

Efectos del cambio climático en la vegetación de la alta montaña de Tenerife

Resumen: La vegetación de alta montaña de Tenerife está formada actualmente por un matorral ralo con retama (*Spartocytisus supranubius*) y rosallillo (*Pterocephalus lasiospermum*) como especies dominantes. Este ecosistema está sufriendo un calentamiento importante que está teniendo consecuencias en la estructura y composición de la vegetación. En efecto, mientras especies como la retama se encuentran en declive, otras como el rosallillo se expanden cada vez más. Al efecto de las temperaturas hay que unir el de la herbivoría, que en algunos casos se ve amplificado por las consecuencias del cambio climático, de modo que, igual que hay diferencias en la palatabilidad de las especies a los herbívoros, se pueden identificar especies a las que el cambio climático favorece (ganadores del cambio climático) y especies a las que el cambio climático perjudica (perdedores del cambio climático). Todo ello está modificando la vegetación de forma ostensible, con la aparición de comunidades vegetales cada vez más diferenciadas respecto a las definidas para este ecosistema.

Keywords: vegetación insular; herbivoría; temperatura

Effects of climate change on the vegetation of the high mountains of Tenerife

Abstract: The high mountain vegetation of Tenerife is formed by a sparse scrub where the broom (*Spartocytisus supranubius*) and the rosallillo (*Pterocephalus lasiospermum*) are the dominant species. This place is suffering a significant increase in the mean annual temperature which is having consequences on plant species dominance and vegetation structure. Indeed, while species such as the broom are in decline, others such as *P. lasiospermum* are expanding. Herbivory is an additional factor that interacts with increasing temperatures amplifying their effects on these plant communities. There are species more palatable to herbivores and species less palatable, and also species that can be classified as climate change winners or climate change losers. The combined effects of climate change and herbivory are restructuring the vegetation with the appearance of new plant communities, different from any known plant community in the island of Tenerife.

Palabras clave: island vegetation; herbivory; temperature

Introducción

La vegetación de la alta montaña de Tenerife está constituida por unas 200 especies de flora vascular, donde la retama endémica *Spartocytisus supranubius* tiene un papel dominante compartido en la actualidad con el también endémico rosallillo (*Pterocephalus lasiospermum*). La retama ocupa un amplio rango vertical, desde 1750 m hasta 3100 m de altitud, límite por encima del cual solo habitan unas pocas especies de fanerógamas entre las que se pueden encontrar algunos rosallillos y, sobre todo, la violeta del Teide (*Viola cheiranthifolia*). Muchas de las especies presentes en esta región tienen formas vicariantes en la comunidad forestal de pinos (*Pinus canariensis*) que circunda la alta montaña, es el caso de géneros como *Argyranthemum*, *Descurainia*, etc., acentuando el hecho de que la alta montaña se comporta como otra isla dentro de la isla de Tenerife.

El ritmo de aumento de la temperatura en Tenerife debido al cambio climático se ha estimado en casi una décima de grado por década desde 1944, pero en la alta montaña el calentamiento está siendo mayor y se ha calculado en 1.4 ± 0.7 décimas de grado por década (Martín et al. 2012). En ambos casos ha habido una aceleración desde los años setenta del pasado siglo, cuando se produjo una deriva septentrional de los vientos que desde el océano inciden a gran altura sobre Europa-África (Alonso-Pérez et al. 2011). El calentamiento climático registrado entre 1975 y 2015 en las cumbres de Tenerife fue de 1.7 ± 0.6 décimas de grado por década (Martín y Pérez 2019), y las últimas décadas han sido las más calientes desde que hay registros (ver material suplementario).

La alta montaña de Tenerife está coronada por el Pico Teide, de 3715 m de altitud, cuya presencia permite diferenciar un sector al NE más frío a barlovento y otro al SW, más cálido y a sotavento. La temperatura media anual entre 1990 y 2018 en el sector nor-

oeste (NE), representada por la estación meteorológica de Izaña (código Aemet C430E, 2365 m snm) fue de $10.3 \pm 0.2^\circ\text{C}$, mientras que en el suroeste (SW) la estación meteorológica Parador (código Aemet C406G, 2150 m snm) registró una media anual de $12.1 \pm 0.3^\circ\text{C}$. Pero no solo hay una contrastada diferencia térmica entre ambos sectores, sino también una apreciable asimetría en la velocidad de calentamiento que es mucho mayor en el sector cálido del SW (Martín-Esquivel et al. 2020, ver material suplementario). No es extraño observar durante las nevadas invernales como éstas se circunscriben al sector frío del NE, mientras que el sector cálido de SW queda libre de nieve, protegido por el apantallamiento del gran estratovolcán del Teide (Fig. 1)

Las predicciones relativas a la precipitación en la latitud de Canarias apuntan a un descenso de las lluvias del semestre húmedo que podría llegar al 10-20% a final de siglo (IPCC 2013). La precipitación actual en Tenerife es un 9% menor que la que había a mediados del siglo pasado, lo cual se nota preferentemente en la disminución de las lluvias en noviembre y enero. Igualmente, en la alta montaña se está produciendo una contracción del periodo húmedo debido a la disminución de las lluvias otoñales (Martín y Pérez 2019). Los años secos son ahora más comunes como prueba que el 78% de los años hidrológicos (de septiembre a agosto) acaecidos desde 1990 han registrado una pluviometría inferior a lo que sería normal en la alta montaña de Tenerife (450 l/m² de media entre 1970 y 1999). El año más seco registrado fue 2012, donde apenas se alcanzaron 50 l/m² (Martín y Pérez 2019).

Las sequías recurrentes y el acelerado aumento de las temperaturas en el sector SW también permiten separar los sectores mencionados en función de su grado de evapotranspiración. Entre 1990 y 2018, el sector SW registró una evapotranspiración media de 650 mm/año mientras que para el sector NE ésta fue de 606 mm/año (Martín-Esquivel et al. 2020), existiendo, por tanto, un déficit hídrico marcado en ambos sectores y más acusado en el sector SW.

Cambios en la comunidad de retamar

Para estudiar los cambios que se están produciendo en el retamar, los gestores del Parque Nacional del Teide, el cual abarca la mayor parte de esta comunidad vegetal, pusieron en marcha en

2004 un programa de seguimiento ecológico basado en cuantificar la cobertura y número de ejemplares en una serie de vallados de exclusión de herbívoros de 400 m² de superficie cada uno, distribuidos por todo el espacio protegido a una altitud entre 2000 y 2600 m: ocho de ellos en el sector cálido del SW y otros ocho en el sector frío del NE (Fig. 2). En cada uno se delimitó también una parcela de control, no vallada, para determinar la posible influencia de conejos (*Oryctolagus cuniculus*) y muflones (*Ovis montanus*), los dos herbívoros introducidos en el Parque. De hecho, no todas las especies son igualmente palatables a los herbívoros, por ejemplo, de las dos fanerógamas dominantes, una es altamente palatable (la retama) y la otra es muy poco palatable (el rosalillo) (Martín-Esquivel et al. 2020). Otras especies palatables son el cardo de plata (*Stemmacantha cynaroides*), el tajinaste azul (*Echium auberianum*), el canutillo de cumbre (*Silene nocteolens*) el tomillo de cumbre (*Micromeria lachnophylla*) los alhelies (*Erysimum scoparium*) y la gramínea *Arrhenaterum calderae* (Martín-Esquivel et al. 2020; Cubas et al. 2019).

Con los datos de cada año del conjunto de ejemplares en los vallados de exclusión o fuera de ellos Martín-Esquivel et al. (2020) calcularon tendencias de cambio entre 2010 y 2018. El objetivo era detectar qué especies podían estar experimentando un aumento debido a la eliminación de la predación de herbivoría (cuando se compraban resultados a lo largo de los años de zonas valladas con la zona de control) o a los cambios en el clima (cuando se comparaban los resultados a lo largo de los años solo en los vallados libres de la presión de herbivoría).

Martín-Esquivel et al. (2020) evidenciaron un apreciable aumento en la cantidad de ejemplares de las especies más palatables dentro de los vallados de exclusión del sector frío del NE, sobre todo en *Spartocytisus supranubius* (la retama), cuyo reclutamiento se está viendo muy afectado por la presencia de herbívoros (Cubas et al. 2018). Sin embargo, la exclusión de los herbívoros no supuso un aumento significativo en la cantidad de retamas ni en su cobertura en el sector cálido del SW, y lo mismo ocurrió con otra leguminosa que es, de hecho, la segunda más abundante en el retamar, el codeso (*Adenocarpus viscosus*). Aunque esta última especie es poco palatable debido a la presencia en sus tejidos del alcaloide adenocarpina (Irl et al. 2012).

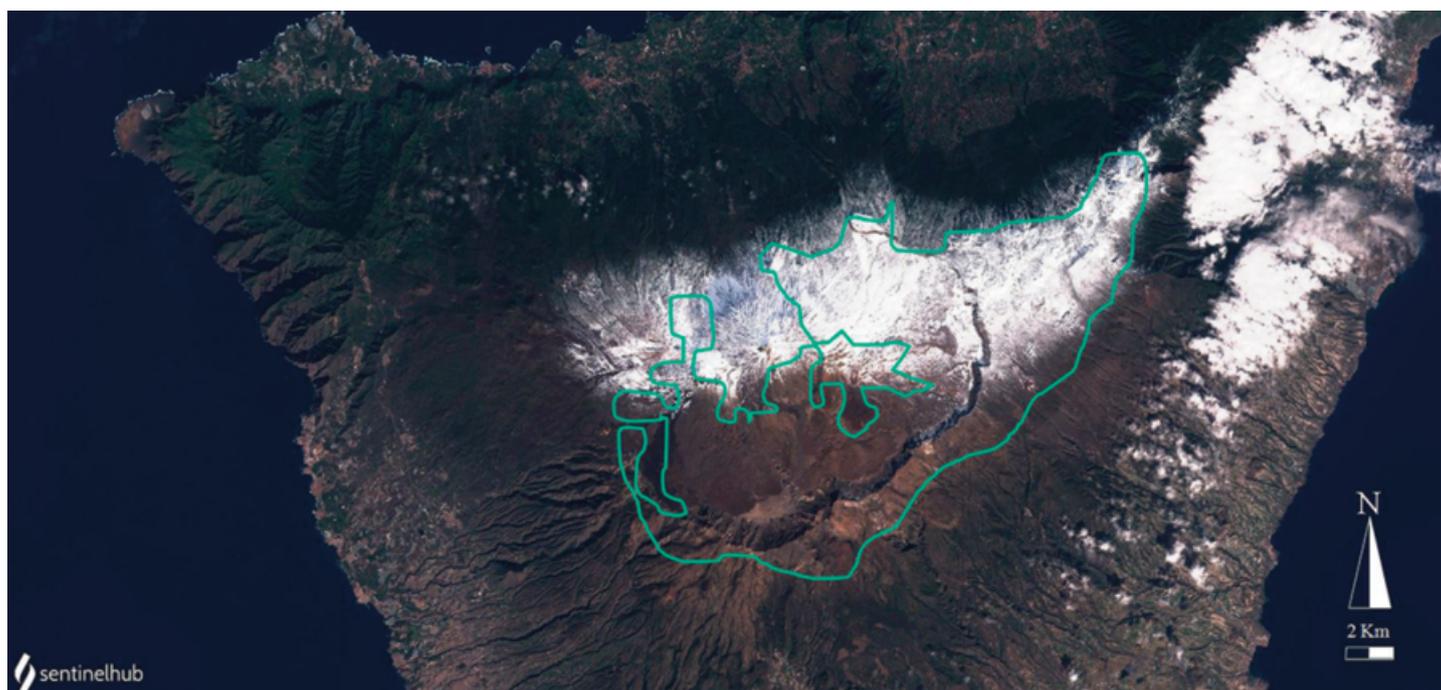


Figura 1. Imagen del satélite Sentinel2L1C del 9 de febrero de 2021, justo después de la borrasca "Filomena" y representación del ámbito de distribución del retamar de cumbre (línea verde). Se puede observar cómo la nieve se distribuyó mayormente por el NE del retamar.

Figure 1. Sentinel2L1C satellite image (February 9-2021), just after the "Filomena" storm, and representation of the home-range of summit broom (green line). It can be seen how the snow was distributed mainly in the NE of the occupancy area of the broom.

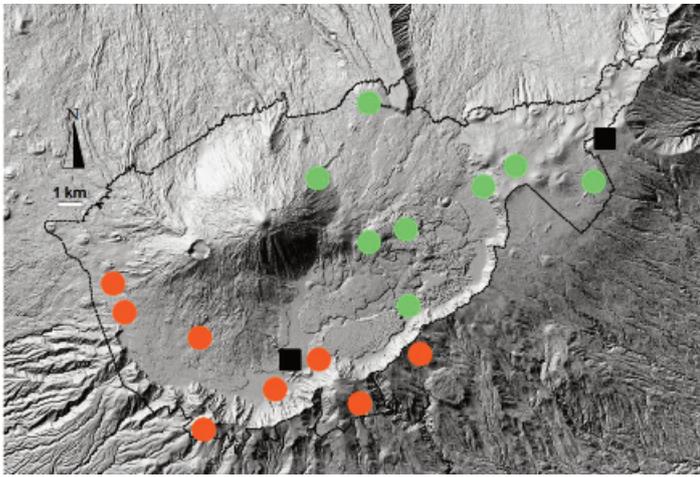


Figura 2. Ubicación de vallados de exclusión del sector frío del NE (círculo verde) y del sector cálido del SW (círculo naranja) en la alta montaña de Tenerife, y de las estaciones meteorológicas de referencia (cuadrados negros). La línea negra delimita el Parque Nacional del Teide.

Figure 2. Location of the high mountains Tenerife exclusion plots in the NE cold sector (green circle) and the SW warm sector (orange circle), and places where the reference meteorological stations are located (black squares). The black line is the limits of the Teide National Park.

Entre las especies menos palatables hubo algunas que apenas variaron su densidad y otras que la aumentaron, tanto dentro como fuera de los vallados. Entre estas últimas la más significativa fue el rosalillo (*P. lasiospermum*), cuyas poblaciones crecieron de forma significativa dentro y fuera de los vallados en ambos sectores (Fig. 3). También se observó un comportamiento similar en otra especie bastante común, el alhelí (*Erysimum scoparium*), así como, en las poblaciones del sector cálido del SW de otras especies características como la malpica (*Carlina xeranthemoides*), la margarita de pinar (*Argyranthemum adactum*) y la pajonera del pinar (*Descourainia gonzalezi*). Por otro lado, los trabajos de Bello-Rodríguez et al. (2019) mostraron que el límite superior del bosque de pinar está ascendiendo por el SW del Parque Nacional, y que

esto se correlaciona con el incremento de temperatura. De hecho, la presencia de pinos aislados en medio del ámbito SW de distribución del retamar es algo relativamente común.

Ganadores y perdedores del cambio climático

La retama está sufriendo las consecuencias del calentamiento climático como se comprueba en los sectores más cálidos del parque, donde ni siquiera la exclusión de herbívoros permite su desarrollo, al menos en la forma que lo hace en los sectores fríos, donde la exclusión favorece una alta regeneración (Cubas et al. 2018) y un aumento explosivo en sus densidades Martín-Esquivel et al. (2020).

Las retamas son especies longevas que perfectamente pueden vivir sesenta o setenta años, de modo que muchas de las que perviven en la actualidad nacieron a mediados del siglo pasado, cuando el ámbito geográfico de esta comunidad vegetal debió ser muy similar al actual.

No conocemos exactamente el rango térmico idóneo para el crecimiento de *Spartocytisus supranubius*, pero un muestreo en múltiples localidades de Fernández-Palacios (1992) obtuvo que la mayor parte de los ejemplares se distribuían por zonas entre 10.2 y 11.9 °C.

Si superponemos la distribución actual de esta especie con el mapa de temperaturas correspondiente a mediados del siglo pasado elaborado con el proyecto Climaimpacto (escenario A, en Santana y Martín 2013) (Fig. 4A), obtenemos que el 90% del hábitat de la retama ocupa una zona térmica que entonces oscilaba entre 8.2 °C y 12.4 °C (temperatura media de 10.3 ± 0.1 °C). Si ahora superponemos la distribución actual de la retama sobre el mapa de temperatura para el período 1981-2010 (Escenario B, en Santana y Martín 2013) (Fig. 4B), resulta que el 23.1% de la superficie está por encima del umbral de 12.4 °C, un porcentaje que es mayor en el sector SW (19.9%) que en el NE (1.4%) (Fig. 5). En conclusión, las retamas del sector SW parecen haber sufrido más el cambio de temperatura entre los escenarios A y B que las del NE, de modo que el estancamiento en el crecimiento de las retamas de este sector podría obedecer a la dificultad de la especie a crecer en zonas donde la temperatura es más alta, lo cual puede tener especial trascendencia en cuanto a su futuro.

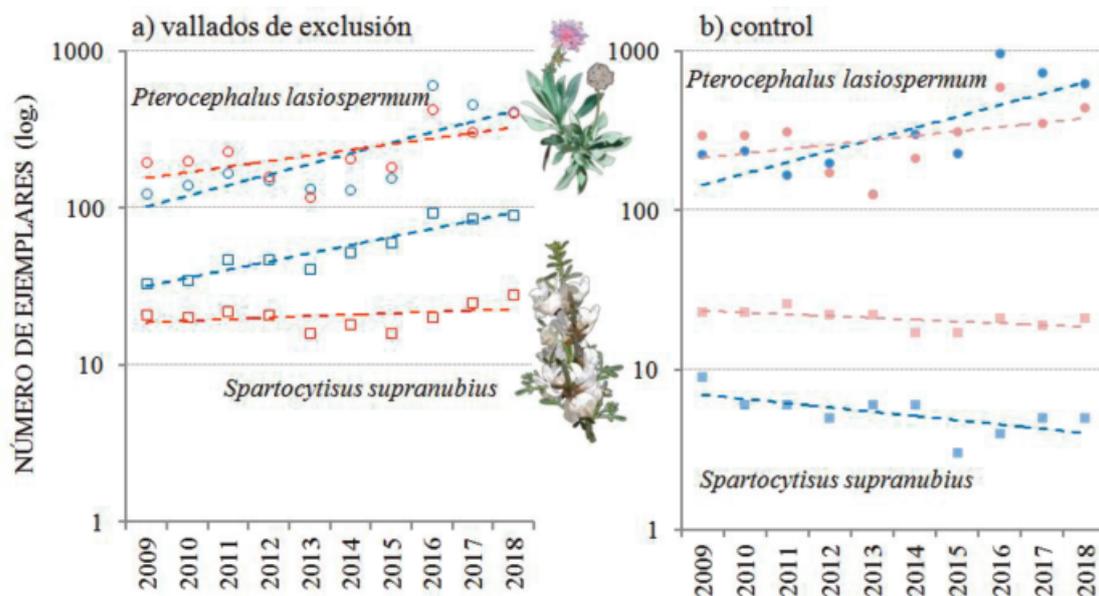


Figura 3. Evolución temporal de las poblaciones de *Spartocytisus supranubius* (cuadrados) y *Pteroccephalus lasiospermum* (círculos) en vallados de exclusión de herbívoros (a) y en zonas de control no valladas (b), y tanto en el NE del Parque Nacional del Teide (azul) como en el SW (rojo), según Martín et al. (2020). El eje de abundancias se ha representado en escala logarítmica.

Figure 3. Temporal evolution of the abundances of *Spartocytisus supranubius* (squares) and *Pteroccephalus lasiospermum* (circles) in herbivore exclusion fences (a) and in non-fenced control areas (b), and both in the NE of the Teide National Park (blue) as in SW (red), according to Martín et al. (2020). The abundance axis has been represented on a logarithmic scale.

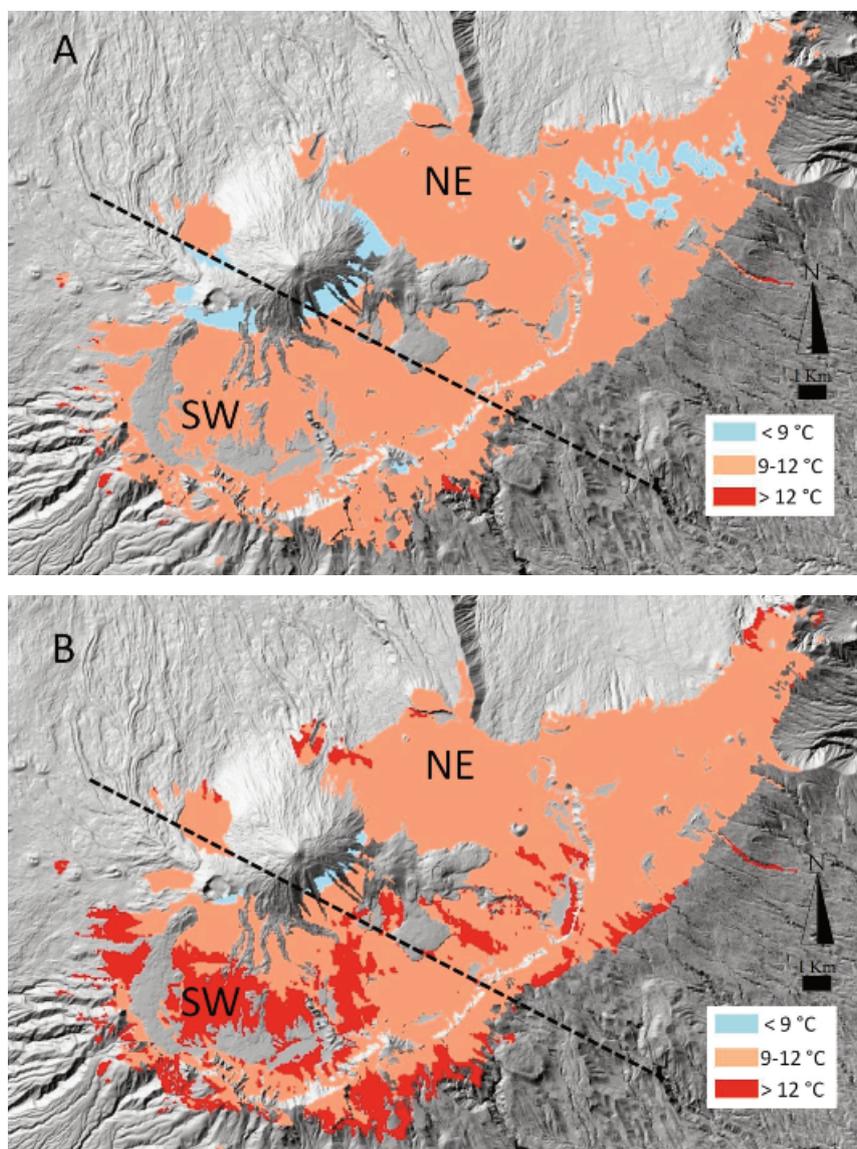


Figura 4. Temperatura promediada durante treinta años de la media anual en el ámbito de distribución del retamar de cumbre en el escenario A, de mediados del siglo pasado (1944-1973) y el escenario B, del periodo reciente 1980-2009. Mapas modificados a partir de los elaborados por Santana y Martín (2013).

Figure 4. Thirty years annual mean temperature of the geographic range of the summit broom in scenario A (middle of the last century 1944-1973) and scenario B (recent period 1980-2009). Maps modified from those made by Santana and Martín (2013).

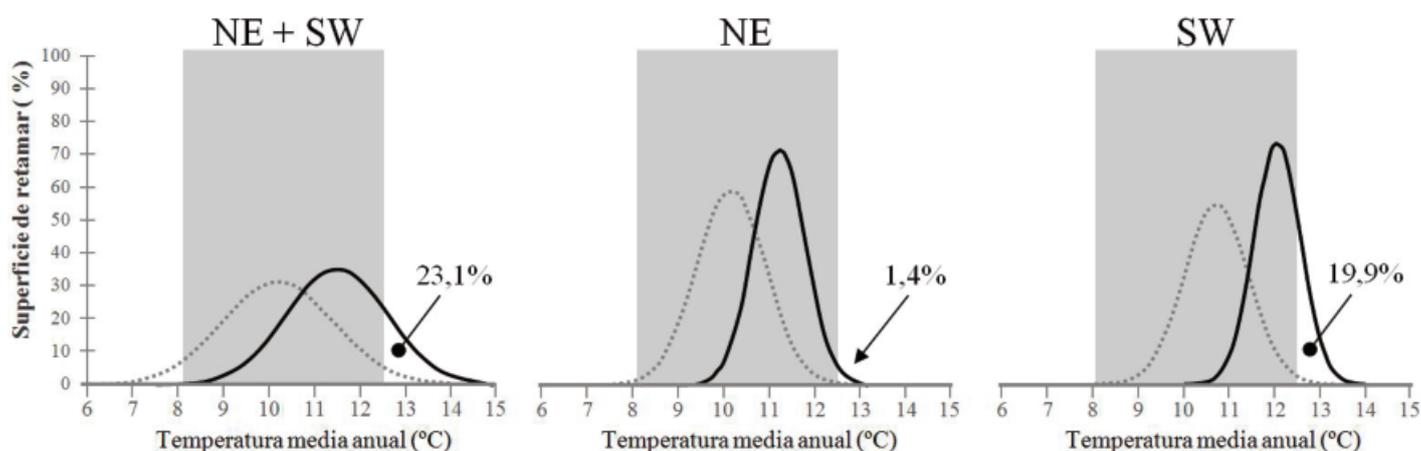


Figura 5. Curvas normalizadas de rangos de temperatura de los escenarios climáticos pasado (línea punteada) y actual (línea continua) en todo el ámbito de distribución del retamar de alta montaña (izquierda) y sólo en el sector NE (centro) o el sector SW (derecha). Los porcentajes indican la superficie del retamar que en el escenario reciente está por encima de 12.4 °C.

Figure 5. Normalized curves of temperature ranges of the past (dotted line) and recent (solid line) climate scenarios in the entire range of high mountain broom (left) and only in the NE sector (center) and the SW sector (right). The percentages indicate the surface of the broom that in the recent scenario is distributed by temperature zones above 12.4 °C.

Las especies con mayor tolerancia al calentamiento se comportan como ganadores del cambio climático, según la definición de Somero (2010), mientras que las menos tolerantes están entre los perdedores del cambio climático. Es posible que las retamas sean un ejemplo de estas últimas, y en este grupo podría incluirse también la otra leguminosa más importante de esta comunidad vegetal de altura, *Adenocarpus viscosus*. Estas dos especies son también muy sensibles a la sequía. Olano et al. (2017) demostraron la estrecha relación que hay entre el crecimiento secundario de los troncos de *S. supranubius* y las lluvias de octubre a febrero, y como los periodos de sequía pueden provocar incluso la mortandad de los ejemplares adultos, sobre todo cuando coinciden con altas temperaturas. Estos autores observaron que la mortandad entre 1990 y 2015 se había acelerado debido a la aparición de sequías recurrentes y que la escasez de agua ya estaba haciendo disminuir el ancho de los anillos de crecimiento secundario de las retamas adultas desde hacía varios años. El seguimiento periódico que se hace en el Parque Nacional del Teide del estado fitosanitario de esta especie muestra como la gran sequía de 2012 originó la aparición de fenómenos de cavitación inducida por estrés hídrico que desde entonces son cada vez más frecuentes (Fernández-Barragan y Reina, en prensa), y un análisis del contenido en agua de ejemplares de *S. supranubius* en los dos sectores considerados obtuvo valores más bajos en las retamas del SW que en las del NE (ver Cuadro 1).

El más claro ganador del cambio climático parece ser el rosalillo de cumbre, sus poblaciones aumentaron notoriamente en los vallados de exclusión y fuera de ellos, y un estudio basado en fotografías aéreas entre 2002 y 2017 de Ibarrola-Ulzurrun et al. (2019) determinaron un incremento en torno al 200% en su cobertura en una amplia superficie del sector del NE. Actualmente *P. lasiospermum* es posiblemente la fanerógama más abundante de la alta montaña. Esta expansión es más notable si tenemos en cuenta que la especie era muy escasa a mediados del siglo pasado (Sventenius 1946). Entre sus atributos para ser considerada como un ganador se encuentran: su baja palatabilidad a los herbívoros (Cubas et al. 2017), su carácter termófilo (Perera-Castro et al. 2017, 2018), su alta capacidad de dispersión y su capacidad de aprovechar el aporte extra de nutrientes de las letrinas de los herbívoros (Cubas et al. 2018, 2019), de modo que la presencia de conejos podría estar favoreciendo su expansión. Si tenemos en cuenta que *Oryctolagus cuniculus* también se puede considerar un ganador del cambio climático (Bello-Rodríguez et al. 2020), estamos ante un ejemplo de asociación positiva entre una especie invasora beneficiada por el cambio climático (conejos) que, a su vez, beneficia a otra que también se está viendo favorecida por él (rosalillo). Esto ayuda a entender cómo *P. lasiospermum* se ha convertido en un nativo invasor, al igual que está pasando en otros lugares del planeta con plantas que, sin tener la consideración de exóticas, se comportan como invasoras más allá de su ámbito original de distribución (Pereyra 2020; Wallingford et al. 2020).

En esta zona concreta de la isla, el pino canario también sería un ganador del cambio climático, su rango altitudinal está expandiéndose a costa del retamar (Bello-Rodríguez et al. 2019) y es relevante que algunas herbáceas del sotobosque del pinar se están volviendo más comunes dentro y fuera de los vallados de exclusión del sector cálido del SW. Podría incluso estar haciéndolo a costa de especies de la alta montaña. Por ejemplo, *Descurainia bourgeauana* (pajonera de cumbre) es una crucifera propia de la alta montaña, mientras que *Descurainia gonzalezi* (pajonera del pinar) es característica de los bosques de pino canario (*Pinus canariensis*). Sin embargo, el trabajo de diez años de Martín-Esquivel et al. (2020) permitió observar a esta última sustituyendo a aquella otra en algunos enclaves limítrofes entre el pinar y el retamar. Algo parecido se puede decir con relación a *Argyranthemum adauctum* (margarita del pinar) y *A. teneriffae* (margarita del Teide). Otras especies propias de zonas cálidas como *Carlina xeranthemoides*, habitantes simultáneos del retamar y el pinar, también están aumentando sus poblaciones en la alta montaña cálida del sector SW.

Cuadro 1. Contenido en agua de las retamas del Parque Nacional del Teide

Box 1. Water content of brooms in Teide National Park.

Para determinar cómo el gradiente climático estaba afectando a la susceptibilidad a la sequía en los años más cálidos, en el año récord de temperatura de 2017 (Izaña 10.4 °C y Parador 14.1 °C) J.R. Do-coito (sin publicar) midió el contenido de agua de *Spartocytisus supranubius* en los alrededores de cada estación de muestreo siguiendo la metodología de González y González-Vilar (2001). Para cada planta, recolectó 10 ramas apicales orientadas al NE (cladodios) que crecían a 1.5 m sobre el suelo, antes del amanecer y tomó muestras de tres plantas diferentes de cada estación de muestreo. Las réplicas se pesaron frescas, y luego se transfirieron al laboratorio para su hidratación en completa oscuridad durante 24 horas a fin de determinar su peso saturado. Finalmente, las muestras se secaron en estufa a 70 °C durante 48 horas y se volvieron a pesar para obtener el peso seco. El contenido relativo de agua (RWC) se obtuvo de la ecuación:

$$RWC = \frac{\text{peso fresco} - \text{peso seco}}{\text{peso saturado} - \text{peso seco}} \times 100$$

Los resultados obtenidos (tabla adjunta) muestran que las retamas provenientes del sector frío del NE tuvieron un RWC significativamente mayor ($t_{(21)} 2.52$, $P = 0.019$) que las provenientes del sector más cálido del SW.

Estación	RWC (%)	sector
Azulejos	90.6 ±0.3	SW
Mtña. Blanca	91.9 ±4.3	NE
Cañ Blanca 1	86.6 ±3.0	SW
Cañ Blanca 2	90.7 ±0.7	SW
Capricho	86.3 ±2.3	SW
Caramujo	89.2 ±0.5	NE
Chafarí	85.4 ±1.5	SW
Chiqueros	92.3 ±3.6	NE
Corral	90.7 ±0.1	NE
Evora	86.7 ±1.7	SW
Fasnia	86.8 ±1.7	NE
Filo	87.6 ±3.6	NE
Grieta	84.8 ±2.5	SW
Guajara	87.1 ±2.5	SW
Izaña	93.3 ±0.1	NE
Maja	90.5 ±6.6	NE
Majua	85.7 ±1.4	SW
Minas	87.6 ±4.9	NE
Mtña. Negra	80.8 ±4.8	SW
Portillo 1	84.6 ±4.9	NE
Portillo 2	88.0 ±7.0	NE
Ucanca 1	87.5 ±3.4	SW
Ucanca 2	86.6 ±2.3	SW

Interacción entre herbivoría y cambio climático

El calentamiento y la herbivoría son los motores del cambio que está experimentando la vegetación en la alta montaña de Tenerife (Fig. 6). Ambos están relacionados entre sí y sus efectos sobre las especies entrañan en ocasiones una interacción positiva y en otros una interacción negativa. Por ejemplo, la herbivoría perjudica a casi todas ellas, en especial a las más palatables, pero hay al menos un caso, el del rosalillo, que podría verse favorecido indirectamente por la presencia de conejos y además por la capacidad de las retamas para captar nitrógeno. De hecho, a menudo se ven ejemplares de este taxón dispuestos en círculo alrededor de las retamas (Fig. 7).

En cuanto al calentamiento, éste perjudica a unas especies, las menos tolerantes a las temperaturas altas, y beneficia a otras, las más tolerantes. Las más perjudicadas son las leguminosas más comunes, sobre todo la retama, que ejerce un papel estructurante

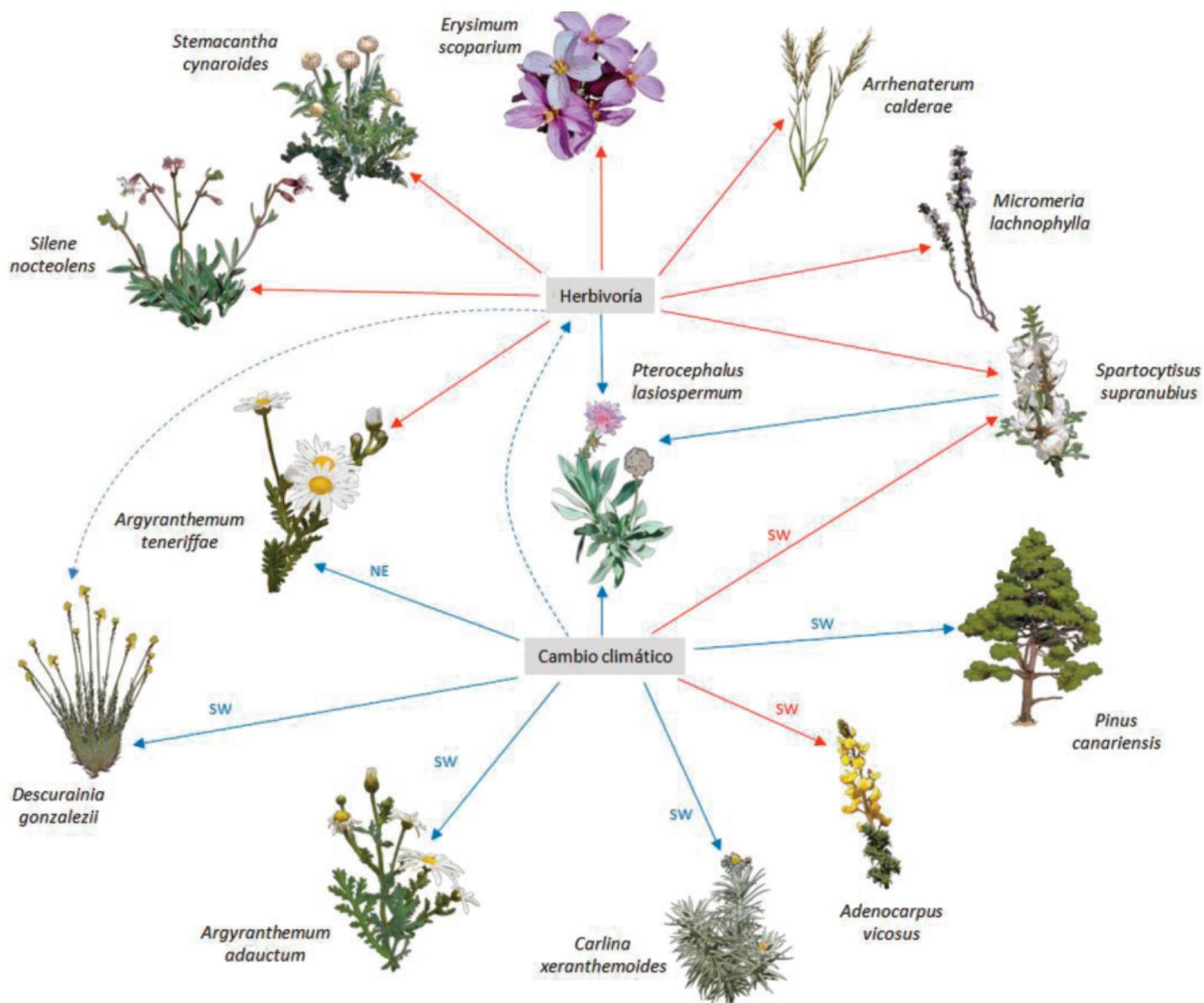


Figura 6. Relación entre herbivoría y cambio climático en las especies de la alta montaña. Las flechas indican una interacción positiva (azul) o negativa (roja) sobre el taxón que señalan, según los trabajos de Bello et al (2019, 2020); Cubas et al (2017) y Martín-Esquivel et al (2020). Las indicaciones SW y NE se refieren a poblaciones ubicadas exclusivamente en los sectores suroeste o noroeste, respectivamente.

Figure 6. Relationship between herbivory and climate change in high mountain species. The arrows indicate a positive (blue) or negative (red) interaction on the taxon they indicate, according to the works of Bello et al (2019, 2020); Cubas et al (2017) and Martín-Esquivel et al (2020). The indications SW and NE refer to populations located exclusively in the southwest or northwest sectors, respectively.



Figura 7. Ante la falta de reclutamiento por la presión de herbivoría muchas retamas están muriendo de viejas (Cubas et al 2017) (A), otras lo hacen por “muerte súbita” debido a estrés hídrico en los años de mayor sequía (Olano et al 2017; Fernández-Barragan y Reina, en prensa) (C). El rosalillo crece frecuentemente en torno a la retama donde se beneficia del aporte de nitrógeno de esta fabácea y del exceso de nitratos debido a los frecuentes depósitos de excrementos de conejo en los márgenes de la leguminosa (Cubas et al 2018) (B y D).

Figure 7. Given the lack of the seedlings recruitment due to herbivory pressure, many broom are dying of old age (Cubas et al 2017) (A), others are dying of “sudden death” due to water stress in the years of greatest drought (Olano et al 2017; Fernández-Barragan and Reina, in press) (C). *P. lasiospermum* frequently grows around the *S. supranubius* where it benefits from the nitrogen contribution of this fabaceae and from the excess of nitrates due to the frequent deposits of rabbit excrement on the margins of the legume (Cubas et al 2018) (B and D).

en la comunidad vegetal. Las retamas intervienen de forma destacada en el ciclo del nitrógeno debido a que son capaces de establecer simbiosis con determinados rizobios fijadores de nitrógeno, lo cual resulta una cualidad fundamental en suelos pobres en este elemento como la alta montaña de Tenerife (Wheeler y Dickson 1990). Pero también son plantas fuertemente predadas por los conejos, cuyas letrinas pueden alterar la población de rizobios del suelo, interfiriendo así en la capacidad de la planta para fijar nitrógeno (Pulido et al. 2021). Esto no parece perjudicar a los rosalillos debido a su capacidad de beneficiarse del nitrógeno asociado a las letrinas de conejos como complemento al nitrógeno de las rizobacterias de las retamas (Cubas et al. 2018).

Las especies favorecidas son varias, algunas propias de esta comunidad vegetal y otras características de los pinares circundantes, y aunque la mayoría se desarrollan en el sector cálido del SW, las hay también que se distribuyen indistintamente por ambos sectores, como es el caso de *P. lasiospermum*. En cualquier caso, los trabajos de Olano et al. (2017) y Martín-Esquivel et al. (2020) parecen indicar que los impactos más importantes debidos al cambio climático se están produciendo en el sector SW, el cual se corresponde con el área occidental del Parque Nacional del Teide. En este lugar es de esperar aún más modificaciones en la estructura futura de la vegetación.

La vegetación del futuro

El cambio climático está ocasionando que la dominancia de fanerofitos (*S. supranubius* y *A. viscosus*) en la comunidad vegetal de la alta montaña esté declinando en favor de los camefitos (*P. lasiospermum*, *A. adauctum*, *C. xeranthemoides*, *D. gonzalezi*). Otros fanerofitos que podrían incrementar su abundancia en este ecosis-

tema por la elevación de las temperaturas son los pinos (*P. canariensis*), pero son especies longevas de crecimiento lento cuya penetración en esta zona presumiblemente requerirá de más tiempo. Sin embargo, algunas especies del sotobosque del pinar están ya ocupando el área del retamar, aunque este proceso está posiblemente limitado por la presencia de herbívoros, la adaptabilidad a los cambios de temperatura y precipitación y la llegada de propágulos (Walther 2003, 2010; Bello-Rodríguez et al. 2019). Los desplazamientos de las especies hacia zonas idóneas son a menudo un proceso individual que depende de su propia capacidad de dispersión (Graham y Grimm 1990), de modo que los cambios bruscos en las condiciones climáticas podría desembocar en la aparición de una comunidad nueva formada por especies supervivientes del retamar y aquellas especies del pinar de dispersión más rápida y mayor tolerancia a las altas temperaturas, al stress hídrico y a la mayor densidad de conejos que hay en la alta montaña con respecto al pinar (Cubas et al. 2019) (Fig. 8). La aparición de comunidades no análogas a las preexistentes en respuesta al cambio climático es un proceso cada vez más evidente en muchos lugares del planeta (Keith et al. 2009).

En el caso concreto de la alta montaña de Tenerife entran además en juego otros factores. Por ejemplo, la actual presencia de cedros (*Juniperus cedrus*) dispersos sobre todo por cantiles y lugares de difícil acceso denota que este árbol pudo haber tenido en el pasado mayor protagonismo en la vegetación de la alta montaña que el que tiene en la actualidad (Nogales et al. 2014); de hecho, fue una especie muy explotada por el hombre, aunque aún perviven ejemplares de más de mil años de antigüedad (García-Cervigón et al. 2019). La recuperación de las poblaciones de cedros podría otorgar a esta especie un papel relevante en la nueva comunidad vegetal que se está configurando.



Figura 8. La retama está en retroceso y el rosalillo (en primer plano) en expansión. Obsérvese además como los pinos ocupan las cumbres que bordean la caldera del Parque Nacional y algunos incluso ya están creciendo en su interior. Los pinos y varias herbáceas asociadas a los pinares son cada vez más comunes en la vegetación asociada al retamar y están generando una nueva comunidad vegetal.

Figure 8. *S. supranubius* is declining and *P. lasiospermum* (in the foreground) is expanding. Also notices how the pines occupy the peaks that border the caldera of the National Park and some are even already growing inside. Pine trees and various herbaceous plants associated with pine forests are increasingly common in the vegetation associated with broom and are generating a new plant community.

Referencias

- Alonso-Pérez, S., Cuevas, E., Pérez, C., Querol, X., Baldasano, J.M., Draxler, R., Bustos, J.D. 2011. Trend changes of African airmass intrusions in the marine boundary layer over the subtropical Eastern North Atlantic region in winter. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 63(2): 255-265. doi:10.1111/j.1600-0889.2011.00524.x
- Bello-Rodríguez, V., Cubas, J., del Arco, M.J., Martín, J.L., González-Mancebo, J.M. 2019. Elevational and structural shifts in the treeline of an oceanic island (Tenerife, Canary Islands) in the context of global warming. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 82: 101918. doi:10.1016/j.jag.2019.101918
- Bello-Rodríguez, V., Mateo, R.G., Pellissier, L., Cubas, J., Cooke, B., González-Mancebo, J.M. 2020. Forecast increase in invasive rabbit spread into ecosystems of an oceanic island (Tenerife) under climate change. *Ecological Applications*: e02206. doi:10.1002/eap.2206
- Cubas, J., Martín-Esquivel, J.L., del Arco, M., González-mancebo, J.M. 2017. El conejo europeo como ingeniero del paisaje en la alta montaña canaria. *Conservación Vegetal* 21: 14-17.
- Cubas, J., Martín-Esquivel, J.L., Nogales, M., Irl, S.D.H., Hernández-Hernández, R., López-Darías, et al. 2018. Contrasting effects of invasive rabbits on endemic plants driving vegetation change in a subtropical alpine insular environment. *Biological Invasions* 20(3): 793-807. doi:10.1007/s10530-017-1576-0
- Cubas, J., Irl, S.D.H., Villafuerte, R., Bello-Rodríguez, V., Rodríguez-Luengo, J.L., del Arco, M., et al. 2019. Endemic plant species are more palatable to introduced herbivores than non-endemics. *Proceedings of the Royal Society B* 286(1900): 0190136. doi:10.1098/rspb.2019.0136
- Fernández-Palacios, J.M. 1992. Climatic responses of plant species on Tenerife, The Canary Islands. *Journal of Vegetation Science* 3(5): 595-603. doi:10.2307/3235826
- Fernández-Barragan, J., Reina, I. (en prensa). Estado fitosanitario del retamar de *Spartocytisus supranubius* (L.F.) Christ ex G. Kunkel en el Parque Nacional del Teide. En: Durban, M. Martín-Esquivel, J.L. (ed.) *Ciencia en el Parque Nacional del Teide 2009-2018*. Ed. Turquesa, Santa Cruz de Tenerife, España.
- García-Cervigón, A.I., García-Hidalgo, M., Martín-Esquivel, J.L., Rozas, V., Sangüesa-Barreda, G., Olano, J.M. 2019. The Patriarch: a Canary Islands juniper that has survived human pressure and volcanic activity for a millennium. *Ecology* 100(10): e02780. doi:10.1002/ecy.2780
- González, L., González-Vilar, M. 2001. Determination of relative water content. En: Reigosa Roger, M.J. (eds.) *Handbook of Plant Ecophysiology Techniques*. Springer, pp 207-212, Dordrecht, Países Bajos.
- Graham, R.W., Grimm, E.C. 1990. Effects of global climate change on the patterns of terrestrial biological communities. *Trends in Ecology and Evolution* 5(9):289-292. doi:10.1016/0169-5347(90)90083-P
- Ibarrola-Ulzurrun, E., Marcello, J., Gonzalo-Martín, C., Martín-Esquivel, J.L. 2019. Temporal dynamic analysis of a mountain ecosystem based on multi-source and multi-scale remote sensing data. *Ecosphere* 10(16):1-17. doi:10.1002/ecs2.2708
- IPCC 2013. Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections. En: Stocker, T.F, Qin, D., Plattner, G-K, Tignor, M, Allen, S.K., Boschung, J., et al. (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, Estados Unidos.

- Irl, S.D.H., Steinbauer, M.J., Babel, W., Beierkuhnlein, C., Blume-Werry, G., Messinger, J., Palomares-Martinez, A., et al. 2012. An 11-yr enclosure experiment in a high-elevation island ecosystem: introduced herbivore impact on shrub species richness, seedling recruitment and population dynamics. *Journal of Vegetation Science* 23(6): 1114-1125. doi:10.1111/j.1654-1103.2012.01425.x
- Keith, S.A., Newton, A.C., Herbert, R.J., Morecroft, M.D., Bealey, C.E. 2009. Non-analogous community formation in response to climate change. *Journal for Nature Conservation* 17(4): 228-235. doi:10.1016/j.jnc.2009.04.003
- Martín, J.L., Pérez, M.J. 2019. *Cambio climático en Canarias*. Consejería de Transición Ecológica y Ediciones Turquesa, Santa Cruz de Tenerife, España. 184 pp.
- Martín, J.L., Bethencourt, J., Cuevas-Agulló, E. 2012. Assessment of global warming on the island of Tenerife, Canary Islands (Spain). Trends in minimum, maximum and mean temperatures since 1944. *Climatic Change* 114(2): 343-355. doi:10.1007/s10584-012-0407-7
- Martín-Esquivel, J.L., Marrero-Gómez, M., Cubas, J., González-Mancebo, J.M., Olano, J.M., del Arco, M. 2020. Climate warming and introduced herbivores disrupt alpine plant community of an oceanic island (Tenerife, Canary Islands). *Plant Ecology* 221(11): 1117-1131. doi:10.1007/s11258-020-01066-5
- Nogales, M., Rumeu, B., de Nascimento, L., Fernández-Palacios, J.M. 2014. Newly discovered seed dispersal system of *Juniperus cedrus* questions the pristine nature of the high elevation scrub of El Teide (Tenerife, Canary Islands). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 46(4): 853-858. doi:10.1657/1938-4246-46.4.853
- Olano, J.M., Brito, P., González-Rodríguez, A.M., Martín-Esquivel, J.L., García-Hidalgo, M., Rozas, V. 2017. Thirsty peaks: Drought events drive keystone shrub decline in an oceanic island mountain. *Biological Conservation* 215: 99-106. doi:10.1016/j.biocon.2017.09.008
- Pereyra, P.J. 2020. Rethinking the native range concept. *Conservation Biology* 34(2): 373-377.
- Perera-Castro A.V., Brito, P., González-Rodríguez, A.M. 2017. Light response in alpine species: different patterns of physiological plasticity. *Flora* 234: 165-172. doi:10.1016/j.flora.2017.07.007
- Perera-Castro A.V., Brito, P., González-Rodríguez, A.M. 2018. Changes in thermic limits and acclimation assessment for an alpine plant by chlorophyll fluorescence analysis: Fv/ Fm vs. Rfd. *Photosynthetica* 56(2): 527-536. doi:10.1007/s11099-017-0691-6
- Pulido-Suárez, L., Díaz-Peña, F., Notario-del Pino, J., Medina-Cabrera, A., León-Barrios, M. 2021. Alteration of soil rhizobial populations by rabbit latrines could impair symbiotic nitrogen fixation in the insular alpine ecosystem of Teide National Park. *Applied Soil Ecology* 160: 103850. doi:10.1016/j.apsoil.2020.103850
- Santana, B., Martín, J.L. 2013. Catálogo de mapas climáticos de Gran Canaria y Tenerife - Tomo 5. Proyecto Clima-Impacto (MAC/3/C159). Viceconsejería de Medio Ambiente del Gobierno de Canarias (122 páginas). Disponible en: <https://www.climaimpacto.eu>
- Somero, G.N. 2010. The physiology of climate change: how potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine 'winners' and 'losers'. *Journal of Experimental Biology* 213: 912-920. doi:10.1242/jeb.037473
- Sventenius, E.R.S. 1946. Notas sobre la flora de Las Cañadas de Tenerife. *Boletín del Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas* 15: 149-171.
- Wallingford, P.D., Morelli, T.L., Allen, J.M., Beaury, E.M., Blumenthal, D.M., Bradley, B.A., et al. 2020. Adjusting the lens of invasion biology to focus on the impacts of climate-driven range shifts. *Nature Climate Change* 10(5): 398-405. doi:10.1038/s41558-020-0768-2
- Walther, G.R. 2003. Plants in a warmer world. *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics* 6(3): 169-185. doi:10.1078/1433-8319-00076
- Walther, G.R. 2010. Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365(1549):2019-2024. doi:10.1098/rstb.2010.0021
- Wheeler, C.T., Dickson, J.H. 1990. Symbiotic nitrogen fixation and distribution of *Spartocytisus supranubius* on Las Cañadas, Tenerife. *Vieraea* 19:309-314

Material suplementario

El video (ver archivo suplementario) de la evolución de las temperaturas medias decadales en el Parque Nacional del Teide se obtuvo a partir del promediado de las temperaturas medias anuales, extrapoladas a partir de los registros de temperaturas máximas y mínimas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la isla de Tenerife. Los datos mensuales utilizados como base para obtener las medias anuales fueron previamente homogenizados mediante la metodología expuesta en [Martín et al. 2012](#). La técnica de interpolación fue regresión lineal múltiple entre la temperatura, la longitud, la latitud y la altitud con ajuste de errores mediante IDW de residuos, con el paquete de r RegRain ([Alzate-Velásquez 2017](#)).

Alzate Velásquez, D.F. 2017. RegRAIN: Method RegRAIN (MLR, Spline and IDW) for spatial interpolation of daily rainfall and air temperature data from climate stations.R package version 0.1.0.

Martín, J.L., Bethencourt, J., Cuevas-Agulló, E. 2012. Assessment of global warming on the island of Tenerife, Canary Islands (Spain). Trends in minimum, maximum and mean temperatures since 1944. *Climatic Change* 114(2):343-355. doi:10.1007/s10584-012-0407-7