

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/303372749>

Experiencias de manejo adaptativo derivadas de la retroalimentación investigación-gestión en los pinsapares andaluces

Chapter · January 2015

CITATIONS

0

READS

51

10 authors, including:



[José Antonio Carreira](#)

Universidad de Jaén

84 PUBLICATIONS 2,353 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Benjamín Viñegla](#)

Universidad de Jaén

52 PUBLICATIONS 1,031 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Juan Carlos Linares](#)

Universidad Pablo de Olavide

95 PUBLICATIONS 1,525 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Víctor Lechuga Ordóñez](#)

Universidad de Jaén

8 PUBLICATIONS 8 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Increasing drought sensitivity and decline of Atlas Cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan forests

[View project](#)



Hazelnut water relations [View project](#)

LOS BOSQUES Y LA BIODIVERSIDAD FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España

Informe de Evaluación

Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático



Con el apoyo de:





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



MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

Edita:

© Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones

Distribución y venta:
Paseo de la Infanta Isabel, 1
28014 Madrid

Impresión y encuadernación:
Taller del Centro de Publicaciones del MAGRAMA

Teléfono: 91 347 55 41
Fax: 91 347 57 22

Diseño y maquetación:
Imaginarte con Arte S.L.

NIPO: 280-15-158-4 (línea)
NIPO: 280-15-157-9 (papel)
ISBN: 978-84-491-0038-3
Depósito legal: M-28814-2015

Tienda virtual: www.magrama.es
centropublicaciones@magrama.es

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

Datos técnicos: Formato: 29,7 x 21 cm. Caja de texto: 17 x 26,7 cm. Composición: una columna.
Tipografía: Times New Roman a cuerpo 11. Papel: interior silk de 115 gr. Cubierta: Papel couche de 250 gr.

En esta publicación se ha utilizado papel libre de cloro de acuerdo con los criterios medioambientales de la contratación pública.

Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Herrero A & Zavala MA, editores (2015) Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.

Fotografías:

Todas las fotografías de la portada y la contraportada han sido realizadas por Asier Herrero Méndez.

Esta publicación refleja la opinión de los de los autores y no necesariamente la del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España

Realizado a través del proyecto *Evaluación de Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en España en los sectores de Biodiversidad y Bosques (CA2012)* financiado por la Fundación Biodiversidad y la Universidad de Alcalá y coordinado por la Oficina Española de Cambio Climático y la Universidad de Alcalá. El presente informe se enmarca dentro del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.

Directores

Asier Herrero Méndez
Miguel Ángel de Zavala Gironés

Coordinadores

José Ramón Picatoste Ruggeroni
Cristina García Díaz
Raquel Garza Garrido

Autores contribuyentes

M. Aguilar, J. Álvarez-Jiménez, G. Anguita, I. Aranda, M.B. Araújo, E. Arrechea, J.A. Atauri, J. Bedia, M. Benito-Garzón, J.A. Blanco, M.C. Blanes, F.J. Bonet, J. Bosch, M. Cabeza, R. Calama, J.J. Camarero, J.G. Canadell, R. Carbonell, V. Carraro, J.A. Carreira, M.J. Casado, F.J. Castillo, J. Castro, M.T. Cervera, D.A. Coomes, G. Cuenca-Bescós, I. de la Hera, M. del Arco, M. Delgado-Baquerizo, C. Díaz-Sala, J. Domingo, M. Domínguez-Clavijo, A. Escudero, M. Estevez, Z. Fernández-Haddad, J.F. Fernández-Manjarrés, E. Fernández-Núñez, N. Ferreiro-Domínguez, L. Galiano, A. Gallardo, F. Gallart, C. García, A.D. García-Abril, R. García-Camacho, A. García-Fernández, C. García-Güemes, R. García-Valdés, R. Garza, V. Garzón, M.A. Guevara, E. Gil-Pelegrín, L. Giménez-Benavides, L. Gómez-Aparicio, R. Gómez-Calmaestra, V. Gómez-Sanz, P. González-Moreno, O. Gordo, C. Gracia, M. Gracia, D. Gutiérrez, J.M. Gutiérrez, J. Gutiérrez-Illán, J.R. Guzmán-Álvarez, A. Hampe, S. Hantson, R. Haro, T. Hickler, J.A. Hódar, J.B. Imbert, J.M. Iriondo, C. Lara-Romero, V. Lechuga, A.B. Leverkus, J.C. Linares, E.R. Lines, F. Lloret, J.M. Lobo, J.B. López-Quintanilla, J. Madrigal-González, F.T. Maestre, J.L. Manjón, J.L. Martín, I. Martínez, S. Martínez, J. Martínez-Vilalta, M.V. Marrero, S. Matesanz, L. Matías, J. Merino, I. Mestre, J.D. Miranda, A. Montero-Castaño, G. Moreno, J.M. Moreno, J. Morente, M.R. Mosquera-Losada, D. Nadal-Sala, R.M. Navarro-Cerrillo, E. Ojea, V.M. Ortuño, J.J. Peguero-Pina, J. Pérez-Tris, D.S. Pescador, J.R. Picatoste, J.M. Pleguezuelos, F.I. Pugnaire, S. Quiroga, A. Ramírez, J. Retana, J.M. Rey-Benayas, A. Rigueiro-Rodríguez, E. Rodríguez, G. Rodríguez, P. Ruiz-Benito, S. Sabaté, R. Sánchez-Salguero, D. Sancho-Knapik, G. Sangüesa-Barreda, J.J. Santiago-Freijanes, M. Sanz-Elorza, R. Serrada, F. Sevilla, A. Solís, C. Suárez, L. Taiqüi, J.L. Tellería, W. Thuiller, P.A. Tíscar, M. Triviño, I.R. Urbietta, F. Valladares, V.R. Vallejo, J. Vayreda, M. Vilà, A. Vilà-Cabrera, B. Viñegla, R.J. Wilson, R. Zamora, M.A. Zavala.

Revisores de las contribuciones

R. Alía, C.F. Aragón, I. Aranda, E. Arrechea, J.A. Atauri, C. Bartolomé, J. Belliure, J. Blanco, J.J. Camarero, J.A. Carreira, J. Castro, M. de Cáceres, J.V. de Lucio, M. de Luis, J. Domingo, E. Gil-Pelegrín, C.M. Gómez, A. Gómez-Sal, A. González, O. Gordo, J.A. Hódar, J. Hortal, J.C. Linares, F. Lloret, J. Madrigal-González, C. Manzano, S. Martínez, L. Matías, M. Meijón, I. Mendoza, J.D. Miranda, G. Moreno-Rueda, J.M. Nicolau, M. Nogales, R. Ochoa-Hueso, E. Ojea, M.J. Ortiz Beviá, V.M. Ortuño, J.G. Pausas, J.L. Quero, J.M. Rey-Benayas, G. Rodríguez, M.A. Rodríguez, P. Ruiz-Benito, I. Salcedo, J.S. Sánchez-Oliver, R. Sánchez-Salguero, G. Sangüesa-Barreda, M. Sanz-Elorza, R. Serrada, F. Sevilla, P.A. Tíscar, A. Velasco, A. Vilà-Cabrera, P. Villar-Salvador, R. Zamora

Revisores del documento de síntesis

R. Alía, J.A. Atauri, A. Escudero, J.M. Espelta, C. García, C. García-Güemes, R. Gómez-Calmaestra, A. Gómez-Sal, F. Lloret, T. Marañón, J.M. Moreno, E. Ojea, J.A. Oliet, A. Picardo, J.R. Picatoste, V. Resco de Dios, S. Sabaté, F. Sevilla, R. Zamora.

Con el apoyo de:



Participación en el informe

La elaboración de este informe se ha llevado a cabo a través de un amplio proceso participativo que ha implicado a numerosos investigadores y expertos nacionales e internacionales de diferentes administraciones, universidades, centros de investigación, y otras organizaciones. La representatividad de este proceso participativo queda reflejada por los siguientes datos:

Un total de 140 autores contribuyentes con afiliaciones que incluyen: 13 comunidades autónomas, 12 países, un total de 17 universidades nacionales y 18 internacionales, 14 institutos y centros de investigación españoles y 8 internacionales, 1 centro de educación y formación profesional, 5 unidades del MAGRAMA, 5 unidades de 5 gobiernos autonómicos y 3 organizaciones no gubernamentales.

Listado de instituciones y organizaciones a las que pertenecen los autores contribuyentes:

Universidades españolas:

Universidad de Alcalá (UAH), Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), Universidad de Barcelona (UB), Universidad de Cantabria (UC), Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Universidad Complutense (UCM), Universidad de Córdoba (UCO), Universidad de Granada (UGR), Universidad de las Islas Baleares (UIB), Universidad de Jaén (UJA), Universidad de La Laguna (ULL), Universidad Pablo de Olavide (UPO), Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Universidad Pública de Navarra (UPUNA), Universidad Rey Juan Carlos (URJC), Universidad de Santiago de Compostela (USC), Universidad de Zaragoza (UNIZAR).

Universidades extranjeras:

Universidad Abdelmalek Essaadi-Mhannech II (Marruecos), Universidad de Burdeos (Francia), Universidad de California (EEUU), Universidad de Cambridge (Reino Unido), Universidad College de Londres (Reino Unido), Universidad de Copenhague (Dinamarca), Universidad Estatal de Oregón (EEUU), Universidad de Évora (Portugal), Universidad de Exeter (Reino Unido), Universidad de Goethe (Alemania), Universidad de Grenoble-Los Alpes (Francia), Universidad de Helsinki (Finlandia), Universidad de Jyväskylä (Finlandia), Universidad de Lund (Suecia), Universidad de Padua (Italia), Universidad de París Sur (Francia), Universidad de Sydney Occidental (Australia), Universidad de Stirling (Reino Unido).

Centros e institutos españoles de investigación:

Centro Andaluz de Medio Ambiente (CEAMA), Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF-UAB), Centro de Investigación Forestal (CIFOR-INIA), Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (CITA), Centro de Tecnología Repsol (CTR), Centro Vasco para el Cambio Climático (BC3), Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA-CSIC), Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Instituto de Física de Cantabria (UC-CSIC), Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC), Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC).

Centros de educación y formación profesional:

Centro de Capacitación y Experimentación Forestal de Cazorla.

Centros de investigación extranjeros:

Centro de Investigación para el Clima y la Biodiversidad (BIK-F), Centro de Ecología Funcional y Evolutiva (CEFE-CNRS), Centro Internacional de Investigación Ambiental y del Desarrollo (CIRED-CNRS), Instituto de Meteorología e Investigación Climática - Investigación Atmosférica Ambiental (IMK-IFU), Instituto Nacional de Investigación Agraria (INRA), Instituto Federal Suizo para la Investigación del Paisaje, la Nieve y los Bosques (WSL), Organización para la Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO), Centro de Leibniz para la Investigación Agraria (ZALF).

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente:

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural (DGCEAMN), Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal (DGDRPF), Oficina Española de Cambio Climático (OECC), Organismo Autónomo Parques Nacionales - Centro Nacional de Educación Ambiental (CENEAM).

Otras organizaciones:

EUROPARC-España, FSC-España, WWF-España.

Por comunidades autónomas:

Andalucía, Madrid, Islas Baleares, Cataluña, Navarra, Castilla y León, Castilla-La Mancha, Galicia, Aragón, País Vasco, Islas Canarias, Cantabria, Valencia.

Por países:

Reino Unido, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Marruecos, Dinamarca, Portugal, Suecia, Alemania, Australia, Italia, Suiza.

ADAPTACIÓN

CONTRIBUCIONES, Capítulos del 37 al 57

Índice

8. Instrumentos para la adaptación

| | |
|---|-----|
| Capítulo 37: Marco normativo de la adaptación al cambio climático en España - <i>C. García, R. Garza, J.R. Picatoste</i> | 437 |
| Capítulo 38: La protección legal como marco para las medidas de adaptación al cambio climático de las especies amenazadas en España: Una visión preliminar - <i>R. Gómez-Calmaestra</i> | 443 |
| Capítulo 39: La importancia de los espacios protegidos en la adaptación al cambio climático en España: Una visión general - <i>J.A. Atauri</i> | 451 |
| Capítulo 40: Red Natura 2000, parte de la solución para la adaptación al cambio climático - <i>G. Rodríguez</i> | 457 |
| Capítulo 41: El debate de la migración asistida en los bosques de Europa Occidental - <i>J.F. Fernández-Manjarrés, M. Benito-Garzón</i> | 463 |
| Capítulo 42: La certificación forestal FSC como instrumento para la adaptación de los bosques al cambio climático - <i>S. Martínez, M. Estevez, G. Anguita</i> | 469 |
| Capítulo 43: Costes de adaptación al cambio climático en los bosques y la biodiversidad - <i>E. Ojea</i> | 477 |
| Capítulo 44: Metodologías para la evaluación económica de los impactos del cambio climático y la adaptación en el sector agrícola y forestal - <i>S. Quiroga, C. Suárez, Z. Fernández-Haddad</i> | 487 |

9. Casos prácticos de la adaptación de los ecosistemas

| | |
|---|-----|
| Capítulo 45: Gestión forestal adaptativa en Menorca - <i>J. Domingo</i> | 493 |
| Capítulo 46: La práctica de la selvicultura para la adaptación al cambio climático - <i>C. García-Güemes, R. Calama</i> | 501 |
| Capítulo 47: Experiencias en la transferencia de conocimientos en el Parque Nacional de Sierra Nevada, en el marco del proyecto de seguimiento de cambio global - <i>R. Zamora, F.J. Bonet</i> | 513 |
| Capítulo 48: Experiencias de manejo adaptativo derivadas de la retroalimentación investigación-gestión en los pinsapares andaluces - <i>J.A. Carreira, B. Viñepla, J.C. Linares, M.C. Blanes, V. Lechuga, J. Merino, V. Carraro, L. Taiqiüi, R. Haro, J.B. López-Quintanilla</i> | 521 |
| Capítulo 49: Los efectos de las intervenciones selvícolas en las masas de monte bajo de <i>Quercus pyrenaica</i> en los montes públicos de la Sierra del Moncayo en Aragón - <i>E. Arrechea</i> | 535 |

| | |
|---|-----|
| Capítulo 50: Gestión forestal anticipadora (o cómo prevenir riesgos con intervenciones frecuentes) - <i>F. Sevilla</i> | 543 |
| Capítulo 51: Gestión forestal próxima a la naturaleza: potencialidades y principios para su aplicación en los pinares de montaña mediterráneos como medida de adaptación al cambio climático - <i>P.A. Tiscar, A.D. García-Abril, M. Aguilar, A. Solís</i> | 555 |
| Capítulo 52: Adaptación al cambio climático en pinares pirenaicos: Controlando la densidad del rodal según el tipo de clima - <i>J.A. Blanco, J.B. Imbert, F.J. Castillo</i> | 565 |
| Capítulo 53: Aspectos clave para un plan de adaptación de la biodiversidad terrestre de Canarias al cambio climático - <i>J.L. Martín, M.V. Marrero, M. del Arco, V. Garzón</i> | 573 |
| Capítulo 54: Los sistemas agroforestales como forma de gestión en la adaptación al cambio climático - <i>M.R. Mosquera-Losada, N. Ferreiro-Domínguez, J.J. Santiago-Freijanes, E. Fernández-Núñez, A. Rigueiro-Rodríguez</i> | 581 |
| Capítulo 55: Bases físicas para la elección de ecotipos en la restauración vegetal bajo escenarios de cambio climático - <i>R. Serrada, V. Gómez-Sanz</i> | 589 |
| Capítulo 56: Técnicas blandas para la restauración de zonas quemadas en ambientes mediterráneos - <i>J. Castro, A.B. Leverkus, J.R. Guzmán-Álvarez</i> | 595 |
| Capítulo 57: Establecimiento de islas forestales y otras actuaciones de revegetación estratégica en paisajes agrícolas como mecanismo de adaptación al cambio climático - <i>J.M. Rey-Benayas</i> | 605 |



J.A. Carreira¹, B. Viñeola¹, J.C. Linares², M.C. Blanes¹, V. Lechuga¹, J. Merino², V. Carraro⁵, L. Taiqūi³, R. Haro⁴, J.B. López-Quintanilla⁴

¹ Departamento de Biología Animal, Vegetal y Ecología, Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas B-3, 23071 Jaén, España

² Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo Olavide. Ctra. Utrera km. 1, 41002 Sevilla, España

³ Faculte des Sciences, Universite Abdelmalek Essaadi-Mhannech II. 93002 Tetuán, Marruecos

⁴ Delegación provincial de Málaga, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Avd. Mauricio Moro 2, 29006 Málaga, España

⁵ Land, Environment, Agriculture and Forestry Dept., Universidad de Padua. Agripolis, v.le dell'Università, 16 – 35020 Legnaro, Italia

* Correo electrónico: jafuente@ujaen.es

48

Experiencias de manejo adaptativo derivadas de la retroalimentación investigación-gestión en los Pinsapares andaluces

Resultados clave

- El ambiente competitivo a escala de rodal explica las variaciones en el grado de decaimiento y mortalidad tras episodios de sequía en bosques basales de *Abies pinsapo*. La aplicación de tratamientos de diversificación estructural reduce su vulnerabilidad climática, mejorando el balance hídrico y de carbono de los árboles.
- Altas tasas de deposición atmosférica de nitrógeno contaminante en el pinsapar de Sierra Bermeja (cercano al área industrial del Campo de Gibraltar) han inducido desbalances nutricionales nitrógeno-fósforo, defoliación y mortalidad en los árboles. La fertilización compensatoria con P corrige esos desajustes nutricionales, revirtiendo el decaimiento.
- La catalogación del pinsapo como especie “en peligro de extinción” implicó prohibir su comercialización y cultivo viverístico. Como consecuencia, su demanda para ajardinamientos en la comarca se fue substituyendo por el híbrido *Abies x masjoanis* (*Abies alba* x *Abies pinsapo*). Se generó así un riesgo inédito de contaminación genética de los pinsapares naturales, que está mitigándose con el establecimiento de perímetros de resguardo, la detección/eliminación de híbridos invasores y una reforma legislativa.

Contexto

Sobre la sensibilidad del sistema

Los pinsapares (*Abies pinsapo* Boiss.) son abetales relictos por causa de un singular proceso paleobiogeográfico que los bloqueó en las montañas Béticas suroccidentales bajo condiciones actuales de fuerte sequía estival. El proceso se inició en el Mioceno-

Plioceno cuando la aridificación progresiva de la cuenca Mediterránea fragmentó abetales ancestrales de amplia distribución. Los ciclos glaciares del Holoceno culminaron este proceso de especiación que ha configurado el grupo actual de nueve abetos circunmediterráneos al que pertenece el pinsapo (Linares 2011). Aunque fisionómicamente los pinsapares se asemejan a un bosque de coníferas templado-boreal, su ambiente responde al patrón típico de estacionalidad térmico-pluviométrica mediterránea. Esta circunstancia les confiere *per se* un indudable valor científico como modelo de estudio. El carácter comprimido y en cierta medida subóptimo de su hábitat en el presente sugiere que los pinsapares sean ecosistemas especialmente sensibles al cambio climático, pero también a la alteración de los ciclos de elementos (contaminación) y de los flujos biológicos (genéticos, invasiones biológicas) (Linares & Carreira 2006).

Así, nuestros estudios muestran una escasa plasticidad ecofisiológica del pinsapo frente a la variabilidad intra- e interanual en la disponibilidad de agua de su hábitat. Su patrón y fenología del crecimiento muy prefijados, cierre estomático temprano frente al estrés hídrico y umbral de potencial xilemático poco negativo, representan limitaciones al periodo vegetativo efectivo y suponen riesgos de mortalidad por cavitación y/o agotamiento de las reservas de carbono bajo las condiciones a las que se ve regularmente sometido en verano, especialmente en las zonas a menor altitud (Figura 1; Linares et al. 2012). Asimismo, la eficiencia en el uso del agua es más baja en el pinsapo, y se optimiza menos en respuesta al incremento del CO₂ atmosférico, que en otras especies forestales con las que compete como *Pinus halepensis* (Linares et al. 2011a).

Figura 1.

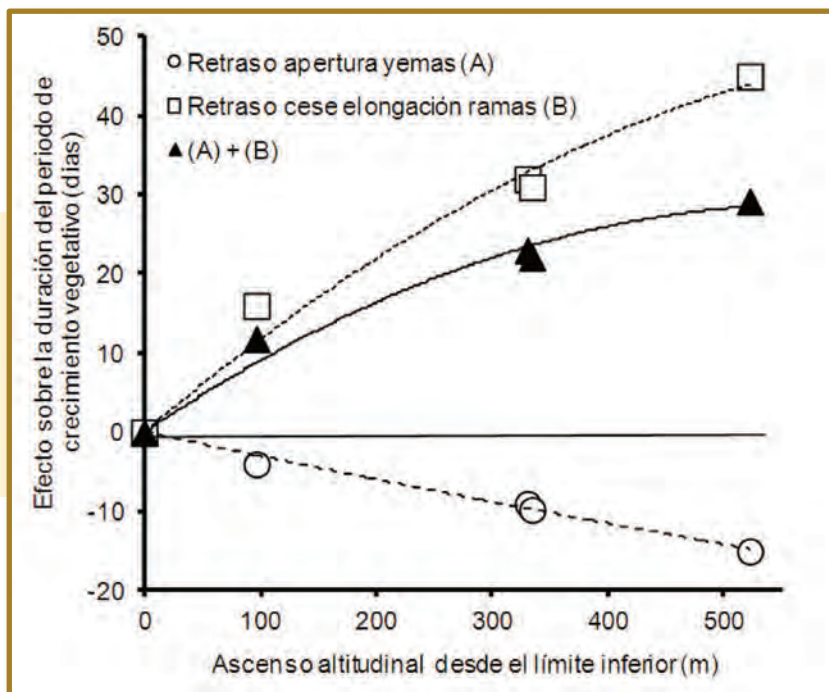


Figura 1. Anomalías fenológicas del crecimiento primario de *Abies pinsapo* en el gradiente altitudinal de la Sierra de las Nieves, Málaga (datos combinados de 2004 y 2005). Al ascender entre los límites inferior (1200 m) y superior (1750 m) de distribución del bosque, la apertura de las yemas se retrasa debido a temperaturas primaverales progresivamente menores. Considerado individualmente, este fenómeno produciría el efecto bien conocido de acortamiento del periodo de crecimiento vegetativo hacia mayor altitud (círculos, trazo discontinuo). Sin embargo, la severidad del déficit hídrico también disminuye con la altitud, lo que retrasa la fecha de cese estival de la elongación de las ramas, y produce un efecto de alargamiento del periodo de crecimiento conforme se asciende (cuadrados, trazo punteado). La combinación de ambos fenómenos resulta en un efecto neto de mayor duración del periodo vegetativo hacia mayor altitud (triángulos oscuros, trazo continuo), explicando que actualmente se observen tasas máximas de crecimiento en el límite de distribución superior.

Fuente: Elaborado a partir de Linares et al. (2012).

Por otro lado, y quizás también asociado a las particulares presiones selectivas de su hábitat, que es oligotrófico o pobre en nutrientes, el pinsapo es frugal pero igualmente poco plástico en cuanto a requerimientos nutricionales (Liétor et al. 2003). Sus acículas son excepcionalmente longevas, y el control de la abscisión es muy contingente. Así, los picos de caída de hojarasca que eventualmente se producen en episodios de intensificación de la sequía llegan a representar una alta proporción del desfronde anual (Linares 2008). En consecuencia, el pinsapo muestra una escasa capacidad de control nutricional tanto en términos de retranslocación (retirada de nutrientes de la hoja hacia otros tejidos antes de su caída; Liétor 2002), como de homeostasis estequiométrica (mantenimiento de las proporciones entre nutrientes foliares; Blanes et al. 2012). Asimismo, el pinsapo parece tener poca capacidad de respuesta genética frente a situaciones de enriquecimiento en nutrientes del medio. Comparando árboles bajo déficit o bajo exceso de nitrógeno (N), apenas observamos diferencias en la expresión de genes relacionados con su adquisición y metabolismo (Blanes 2012). En conjunto, todos estos rasgos apuntan a la vulnerabilidad del pinsapo a frente fenómenos de contaminación eutrófica.

En tercer lugar, la paleobiogeografía de los abetos circun-mediterráneos, con solapamientos entre estirpes durante eventos de expansión-introgresión desde sus refugios glaciares (Linares 2011, Alba et al. 2010), también explica la elevada facilidad de hibridación y riesgo de aparición de ejemplares fértiles entre sus especies. Un caso bien descrito es el de *Abies x masjoannis*, un híbrido entre *Abies pinsapo* y *Abies alba*, cuyo ejemplar más antiguo conocido data de 1910 (Parque El Retiro), y desde cuya población parental en la finca Masjoan (Tarragona) se

han distribuido para jardinería y como árboles de navidad más de 200.000 ejemplares desde 1955 (Soto et al. 2004). Ello representa un peligro potencial de contaminación genética de las poblaciones naturales de pinsapo.

Capacidad adaptativa a los impactos actuales: la importancia del legado de capacidades desarrolladas frente a impactos anteriores

La materialización de todos estos riesgos es relativamente reciente. La situación verdaderamente paupérrima de los pinsapares era la existente en el siglo XIX y primera mitad del XX. Así lo reclamaron con tonos dramáticos numerosos viajeros, naturalistas y forestales, desde el propio Boissier a Ceballos, pasando por de Rojas Clemente, Chapman y Willkomm (Guzmán et al. 2013). Estas fuentes informan sobre pinsapares residuales (apenas unas 750 ha) y en franca regresión como consecuencia del pastoreo, incendios, talas, carboneo y otros usos por la población local (véase figuras 5 y 6 en Linares et al., este mismo volumen). La situación cambió a partir de la década de 1960. Sucesivas administraciones forestales (Patrimonio Forestal del Estado, ICONA, Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía) han venido desarrollando un exitoso programa de conservación con adquisiciones/consorcio de Montes, vigilancia y acotamiento, prevención y lucha contra incendios, plantaciones puntuales y declaración de Espacios Naturales Protegidos, entre otras medidas (Ruiz de la Torre 1994, Álvarez 2013). Estas actuaciones, la celeridad del abandono de usos tradicionales y la concurrencia de un periodo húmedo en los 60s-70s propiciaron una espectacular regeneración y expansión territorial de los pinsapares andaluces (figuras 5 a 8 en Linares et al., en este volumen). Actualmente se han censado unas 4000 ha

con presencia de pinsapo, aproximadamente la mitad de ellas de pinsapares puros y mixtos propiamente dichos (Navarro et al. 2013).

Sin embargo, tras esa fase de expansión, en las dos últimas décadas se están observando algunos episodios de declive y elevada mortalidad (Figura 2). Estas crisis se abordaron inicialmente por la administración forestal de modo reactivo y con criterios fitopatológicos, al relacionarse con el ataque de patógenos: por ejemplo, hongos como *Armillaria mellea* a finales de los 80s en Los Reales de Sierra Bermeja, y *Heterobasidion abietinum*, junto con perforadores como *Cryphalus numidicus*, desde la sequía del 94/95 en Yunquera (Navarro et al. 2013). No obstante, dos consideraciones, una de carácter teórico y la otra observacional, nos indujeron a colaborar con los gestores para profundizar sobre los mecanismos subyacentes. Por un lado, la hipótesis del estrés múltiple (Manion 1991) establece que los fenómenos de decaimiento forestal tienen una naturaleza inherentemente multifactorial. Así, el factor biótico de *contribución* (p. ej., expansión e intensificación del ataque por patógenos) suele requerir la concurrencia de factores estructurales de *predisposición* (p. ej., genéticos, elevada competencia, mala calidad del sitio). Y frecuentemente también el precedente de factores exógenos físicos y/o químicos de *incitación* (p. ej., estrés climático, contaminación). Por otro lado, visitas de intercambio entre investigadores y forestales españoles y marroquíes evidenciaron una aparente paradoja: la problemática de decaimiento descrita en los pinsapares andaluces no se observa en los norteafricanos (Figura 3), con condiciones ambientales comparables, pese a que en ellos la protección es sólo reciente y en todo caso más laxa, persistiendo usos por parte de la población local (provisión de leña, estacas y fustes menores y ganadería extensiva).

■ Figura 2.



▲ **Figura 2.** Síntomas de decaimiento en los pinsapares andaluces. Izquierda: mortalidad tras eventos de sequía en la banda inferior de distribución altitudinal del pinsapo (*Abies pinsapo*) en la Sierra de las Nieves). Derecha: defoliación asociada a contaminación atmosférica en el pinsapar de los Reales de Sierra Bermeja.

Fuente: Fotografías de J.C. Linares (izquierda) y J.A. Carreira (derecha).

Caso 1 (Figura 4). En el caso del pinsapar de Yunquera (Málaga), la mortalidad ha sido y sigue siendo particularmente acusada por debajo de 1300 m, donde afecta hasta a un tercio del área basal total (figura 4 en Linares et al., este volumen). La probabilidad de mayor incidencia aumentaba hacia menor altitud y en orientaciones subóptimas, y existía correlación entre el decaimiento del crecimiento radial y tendencias de aridificación regional tanto a altitudes bajas como medias (figura 3 en Linares et al., este volumen), apuntando al estrés climático como factor de incitación (Linares et al. 2009a). Pero la explicación parecía seguir siendo incompleta, al no existir la misma problemática en pinsapares marroquíes bajo condiciones climáticas y topográficas similares. Una diferencia clara entre ambas regiones es la evolución en los usos del territorio que, de hecho, explica en mayor grado que el clima la variabilidad estructural de los pinsapares (Linares et al. 2011b). En comparación con los andaluces, la diversidad de especies forestales y de clases diamétricas es cinco veces superior en los norteafricanos. En éstos perduran aprovechamientos tradicionales de baja intensidad, cuyo efecto como régimen de perturbaciones menores promueve dinámicas de apertura de huecos, regeneración y diversificación del dosel. Por su lado, en los pinsapares andaluces, partiendo de una situación muy degradada, la protección estricta y el abandono de usos propició el proceso de expansión descrito anteriormente, que vino acompañado de una densificación y homogeneización estructural en muchos de ellos (Linares et al. 2013a). Esto desemboca en los 80s en un estancamiento de las masas jóvenes, en las que no operaba el régimen natural de apertura de huecos propio de masas más heterogéneas y maduras (Linares & Carreira 2009). En definitiva, la creciente competencia a escala de rodal (una consecuencia de las medidas proteccionistas) ha de tomarse en consideración para entender la mayor

Figura 3.

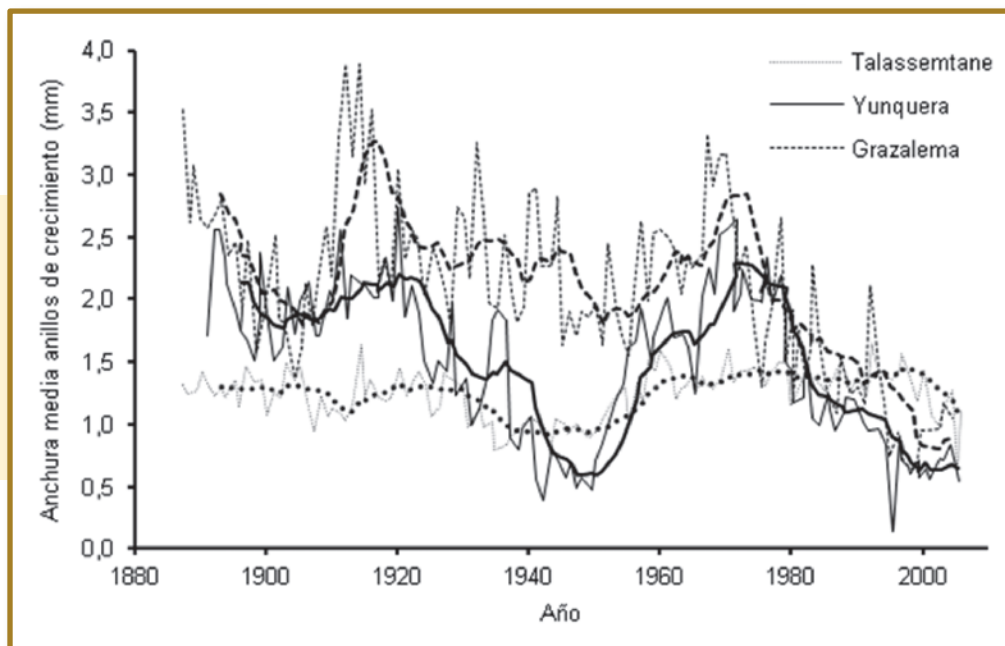


Figura 3. Comparación del crecimiento secundario (anchura de los anillos del tronco; valores anuales –líneas de trazo fino- y suavizados –trazo grueso-) en los pinsapares andaluces y marroquíes. En los primeros (Yunquera –líneas continuas- y Grazalemente –líneas discontinuas-) se observa una tendencia consistente de descenso del crecimiento desde la década de los 1970s, que alcanza el mínimo en el año hidrológico 1994/95, muy seco. Esta tendencia no se observa en los pinsapares marroquíes (Parque Nacional de Talassemntane –líneas punteadas-), que muestran un crecimiento medio más estable en el tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

vulnerabilidad del pinsapar de Yunquera a las tendencias de cambio climático (Linares et al. 2009b, Linares et al. 2010a). El ambiente competitivo de elevada intensidad actuaría como un factor de predisposición. Este estrés se mantuvo además en el tiempo, al no aliviarse ni por mecanismos naturales (autoaclareo frenado por elevada simetría/codominancia de la competencia entre árboles) ni mediante manejo (entresaca). Ello habría comprometido progresivamente el balance energético, hídrico y nutricional de los individuos, cuya capacidad adaptativa al estrés climático se vio consecuentemente limitada. De hecho, la pauta temporal de sequías y el patrón espacial de la densodependencia explican la dinámica espacio-temporal de expansión de la mortalidad en los focos de *Heterobasidion* (Linares et al. 2010b).

Caso 2 (Figura 5). En el pinsapar de Bermeja, tras los brotes de *Armillaria mellea* en los 80s, se comenzaron a apreciar a finales de los 90s síntomas leves de defoliación, especialmente en el área de cumbre, que se han intensificado más recientemente causando alguna mortalidad (Figura 2b). El estrés climático se descartó como agente (elevada pluviometría y rigor invernal leve – altitud < 1500m- en esta sierra). Pero estudios básicos sobre los ciclos de nutrientes en los pinsapares ponían de manifiesto disfunciones en el de Bermeja, indicativas de eutrofia por exceso de N (Liétor et al. 2002, Salido 2007): el suelo tiene mucho nitrato y altas tasas de nitrificación, y el ecosistema tiende a perder nitrógeno (N) con los flujos hidrológico (lixiviación, escorrentía) y gaseosos (desnitrificación). En los abetales, como así ocurre en el resto de pinsapares analizados, lo “normal” respecto al N es un ciclo cerrado con recirculación/retención intrasistema eficientes, escasa disponibilidad y carácter limitante (Vitousek & Howarth 1991). Explorando posibles fuentes del exceso de N, describimos un gradiente geográfico de deposición atmosférica de N con la distancia al área industrializada del Campo de

Gibraltar. En el pinsapar de Bermeja, el más cercano, las entradas de ácido nítrico con la precipitación (lluvia, nieblas...) y la deposición seca de partículas y aerosoles se estimaron entre 8-15 kg N/ha* año. Las anomalías en su ciclo del N se relacionan, pues, con la contaminación atmosférica (Carreira et al. 2013). El fenómeno se corresponde con una “nueva” versión de lluvia ácida descrita a finales de los 80s (hipótesis de la “Saturación de N”; Nilhgard 1985, Aber et al. 1989), en la que está involucrado otro importante motor de cambio: el incremento en las emisiones antropogénicas de formas gaseosas reactivas de N (Vitousek et al. 1997, Galloway 2003). La problemática de la lluvia ácida “clásica” de los 60s-70s se había resuelto razonablemente bien con el control legislativo de las emisiones de SO₂ en los países industrializados (Hedin et al. 1987). Pero las emisiones de N₂O_x no recibieron el mismo tratamiento: su contribución era entonces minoritaria, su control más dificultoso (fuentes más difusas) y el nitrógeno era considerado un nutriente más que un contaminante. Como consecuencia, el nitrato ha ganado protagonismo frente al sulfato en la deposición atmosférica (Hedin et al. 1994, Dentener et al. 2006). Así, a la acidificación, se suma ahora un “efecto fertilización”, con la paradoja de que puede derivar en deletéreo a la larga. En bosques previamente limitados por N, las entradas de este nutriente son inicialmente retenidas, acumulándose en la biomasa vegetal (incremento de producción primaria) y microbiana y, a partir de sus detritos, en la materia orgánica del suelo. Eventualmente, si la deposición es crónica, esta capacidad de retención puede llegar a saturarse, iniciándose una fase de pérdidas de N, elevada nitrificación en el suelo y sobrenutrición nitrogenada de los árboles (Aber et al. 1989). Un mecanismo que puede actuar como “gatillo”, desencadenando esos efectos, es la aparición de limitación por otro nutriente, dejando entonces de serlo el N (Harrison et al. 1999, Carreira et al. 2000). Los estudios sobre la biogeoquímica de

Figura 4.

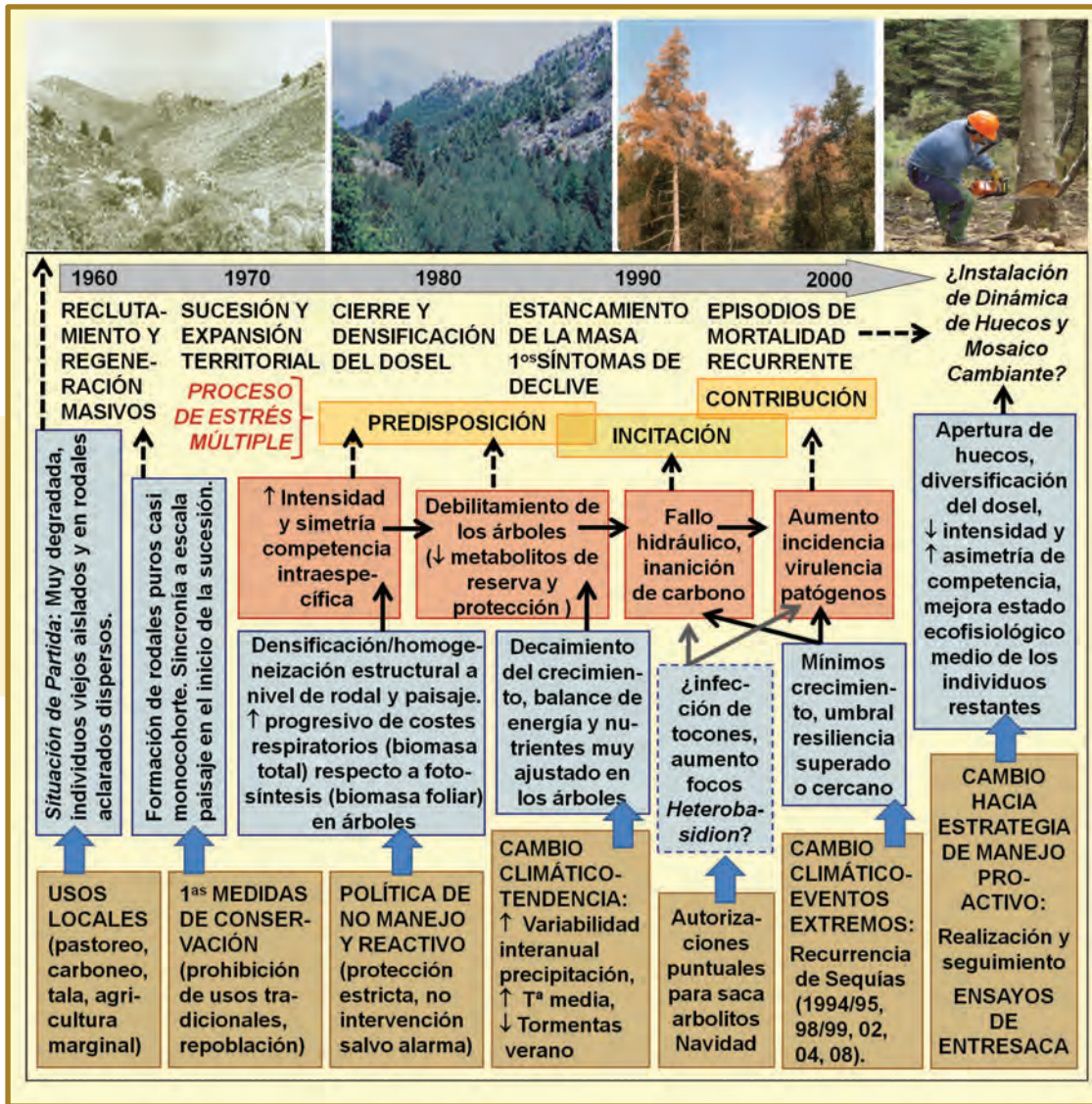


Figura 4. Representación esquemática de la propuesta de sucesión temporal de procesos que han conducido a los síntomas de declive observados en el pinsapar de Yunquera. Las cajas con borde marrón indican cambios en los usos del territorio o en las condiciones ambientales; las de color azul, los efectos de éstos que, a su vez, pueden llegar a constituirse en agentes de estrés (cajas con borde rojo).

Fuente: Elaborado a partir de Linares et al. (2013b).

los pinsapares indicaban en Sierra Bermeja anomalías adicionales a las del ciclo del N, relacionadas con el del fósforo (P) (Figura 6) (Viñegla et al. 2006, Blanes et al. 2013): niveles deficientes de P en las hojas, proliferación de raíces en micrositos ricos en P, y elevada actividad de enzimas fosfatasas (proteínas liberadas al suelo por raíces y microorganismos, capaces de romper los enlaces del fosfato con la materia orgánica). Todo indicaba que la problemática en el pinsapar de Sierra Bermeja tiene relación con la limitación por fósforo y el desbalance nutricional N/P de los árboles, inducidos por la contaminación atmosférica.

Caso 3. La estética singular del porte de *Abies pinsapo* explica la larga tradición de su uso ornamental en jardinería y como árbol de navidad. El primer antecedente se remonta a 1837 con el cultivo, en el entonces vivero más prestigioso del mundo (Vilmorin-Andrieux), de semillas de Yunquera recolectadas por el propio Boissier en su viaje tras el que sistematizó la especie. Desde entonces se ha esparcido por jardines históricos y arboretos tanto de España y el resto de Europa, como de América y Asia

(Soto et al. 2004). También existen pequeñas plantaciones *ex situ* de pinsapo en Gerona, Madrid, Zaragoza, Burgos, Logroño, Soria, Granada y Málaga. Más recientemente, la declaración como Espacios Protegidos de sus enclaves principales, y campañas para su valorización como especie emblemática e identitaria, han renovado el interés por la plantación de pinsapos en parques públicos y jardines privados de las comarcas de su área de distribución natural. Además, esta zona contacta meridionalmente con la Costa del Sol, cuyo gran desarrollo turístico-residencial implica profusión de ajardinamientos. Así, la producción/comercialización de plantas de pinsapo se fue consolidando en viveros comarcales, en adición a los de titularidad de la administración forestal. Paralela e independientemente, como medida de protección, *Abies pinsapo* fue catalogada como “en peligro de extinción” (Catálogo Andaluz de Especies de la Flora Silvestre Amenazada; Decreto 104/1994, Junta de Andalucía). Asimismo, se promulgó la Ley andaluza 8/2003 de la flora y la fauna silvestres que daba protección legal adicional a la especie. Estos desarrollos legislativos, lógicamente, establecen medidas genéricas de protección para especies

Figura 5.

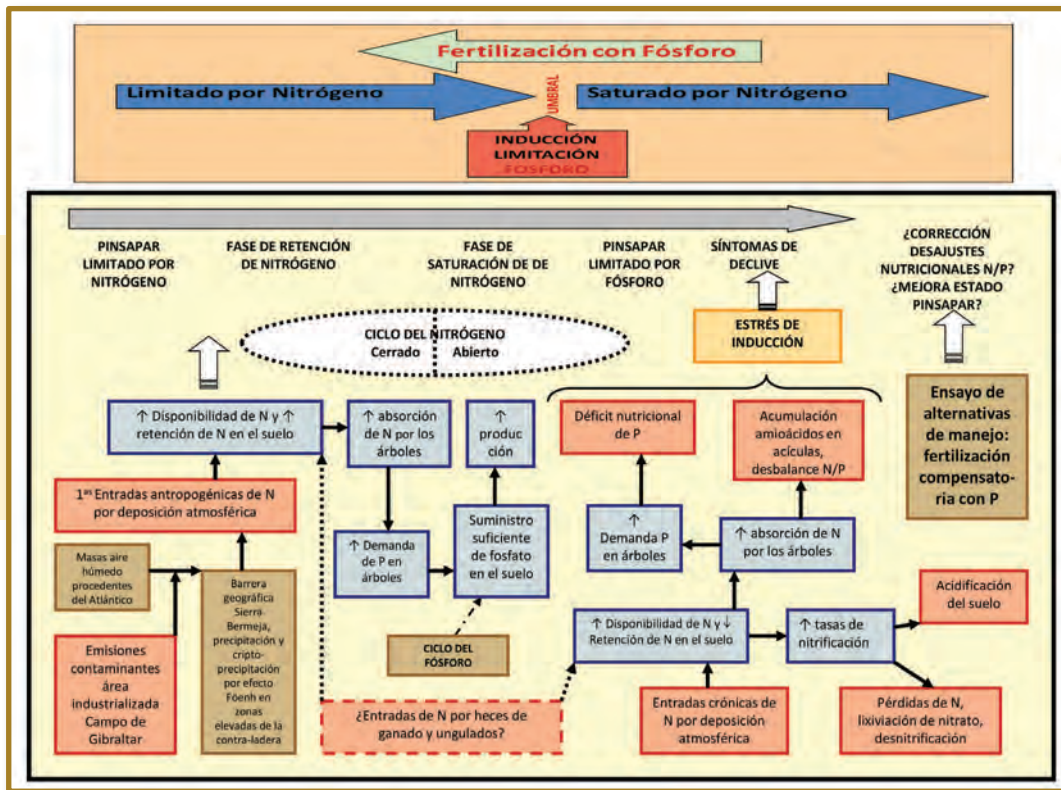


Figura 5. Representación esquemática de la propuesta de sucesión temporal de procesos que han conducido a los síntomas declive observados en el pinsapar de Los Reales de Sierra Bermeja. Las cajas con borde marrón indican cambios en los usos del territorio o en las condiciones ambientales; las de color azul, los efectos de éstos que, a su vez, pueden llegar a constituirse en agentes de estrés (cajas con borde rojo)

Fuente: Elaboración propia.

catalogadas, como la prohibición de la recolección de propágulos, el cultivo en viveros, comercio e intercambio de ejemplares. Pero la demanda de pinsapos siguió existiendo. Así, aunque su actividad viverística hubo de abandonarse, se ha ido sustituyendo por la importación de otras especies de abetos y variedades híbridas. Esto representa una amenaza potencial para el acervo genético de los pinsapares naturales andaluces, ya que el riesgo

de hibridación y la aparición de ejemplares fértiles se valora como elevado (Soto et al. 2013). De nuevo, una medida de protección oportuna tiene consecuencias no intencionadas (sólo como riesgo potencial por ahora) que representan un factor de vulnerabilidad previamente inédito.

Figura 6

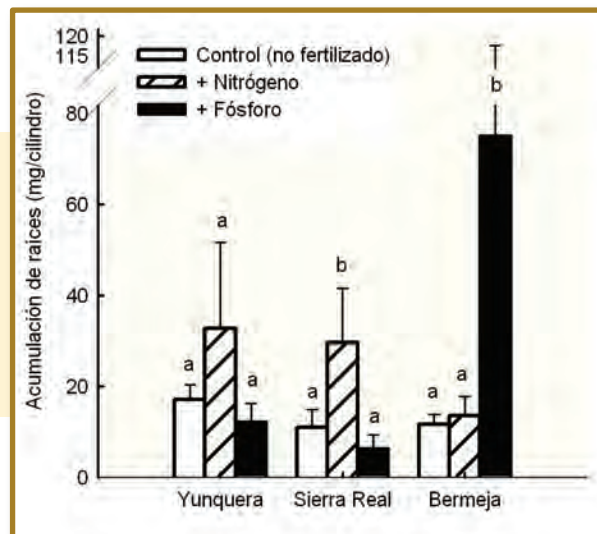


Figura 6. Acumulación de raíces en micrositios del suelo ricos en nitrógeno o fósforo en pinsapares en diferentes posiciones en el gradiente de deposición atmosférica contaminante desde el foco industrial del Campo de Gibraltar, ordenados de izquierda a derecha desde el más lejano al más cercano. Los micrositios del suelo se generaron experimentalmente, enterrando en el suelo cilindros agujereados de PVC rellenos de vermiculita fertilizada con fósforo o con nitrógeno, o sin fertilizar. Dentro de cada pinsapar, letras diferentes sobre las barras del gráfico indican que la acumulación de raíces fue significativamente mayor dentro de los cilindros fertilizados que en los no fertilizados, lo que indica limitación por el nutriente correspondiente.

Fuente: Elaborado a partir de Blanes et al. (2013b).

Adaptación

Caso 1. Manejo adaptativo del pinsapar de Yunquera al estrés climático mediante tratamientos de diversificación estructural

Como se ha expuesto anteriormente, la estructura del dosel, por su efecto sobre la competencia, constriñe la respuesta del crecimiento al clima en algunos pinsapares andaluces. Por tanto, una modificación de su estructura que reduzca la intensidad y aumente la asimetría del ambiente competitivo, podría incrementar la capacidad adaptativa del pinsapar reduciendo así su vulnerabilidad al cambio climático. Con este planteamiento, en el marco del Plan de Recuperación del Pinsapo de la Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía), se desarrolló un ensayo de entresaca de diversificación estructural en el pinsapar de Yunquera (1200 m altitud, Puerto del Saucillo, Sierra de las Nieves). En seis rodales con dosel homogéneo y cerrado, y área basal (AB) entre 35-40 m²/ha, se cartografiaron todos los individuos (dbh > 5 cm) determinándose también su estado (vigor y clase de dominancia). En entresacas convencionales, el % prefijado de reducción del AB se suele conseguir mediante la tala preferente de individuos suprimidos, intermedios y codominantes, dirigida a lograr una estructura espacial regular de la masa. En nuestro caso aplicamos dos intensidades de entresaca: reducción del 30% ó del 60% del AB inicial. Pero el juego concreto de individuos a entresacar se seleccionó como aquél que, mediante un proceso de simulación iterativo con hojas de cálculo sobre el mapa de los individuos de cada rodal, optimizaba los dos criterios siguientes: (i) maximizar

la diversidad de tamaños de árboles tras la entresaca (equivalente a mantener todas las clases diamétricas, “aplanando” o haciendo más equitativo a su vez el histograma), y (ii) maximizar la heterogeneidad de la distribución espacial de los individuos restantes (matriz de huecos y pequeñas manchas variadas en densidad y clases diamétricas; Figura 7). Con estos criterios se pretendía “dirigir” la estructura y funcionamiento del dosel hacia la propia de bosques más maduros en los que la complejidad estructural se mantiene por, y da lugar a, una dinámica natural de parches y mosaico cambiante (Keeton 2006).

Los tratamientos de las dos intensidades de entresaca se efectuaron por EGMASA en diciembre 2004, sobre parcelas duplicadas de 1000 m², aplicando medidas para evitar la infección por esporas de *Heterobasidion* (desinfección de maquinaria, sellado de tocones con urea y cicatrizante). Desde entonces se desarrolla un programa a largo plazo de comparación entre parcelas entresacadas y control (Linares et al. 2013a, Lechuga 2013) que incluye el seguimiento de variables climáticas, la reserva de agua en el suelo, y el crecimiento y ecofisiología de los árboles (fotosíntesis, conductancia estomática, potencial xilemático, flujo de savia, reservas de carbohidratos...). Las respuestas al manejo observadas incluyen aumentos significativos del incremento anual de AB por árbol (+120 %, comparando periodos pre- y post-entresaca, 2000-2004 y 2005-2011 respectivamente) y del crecimiento radial medio (6.4, 9.0 y 13.1 mm en las parcelas control, entresaca del 30% y del 60% del AB, respectivamente; periodo 2005-2011; Figura 8).

Figura 7

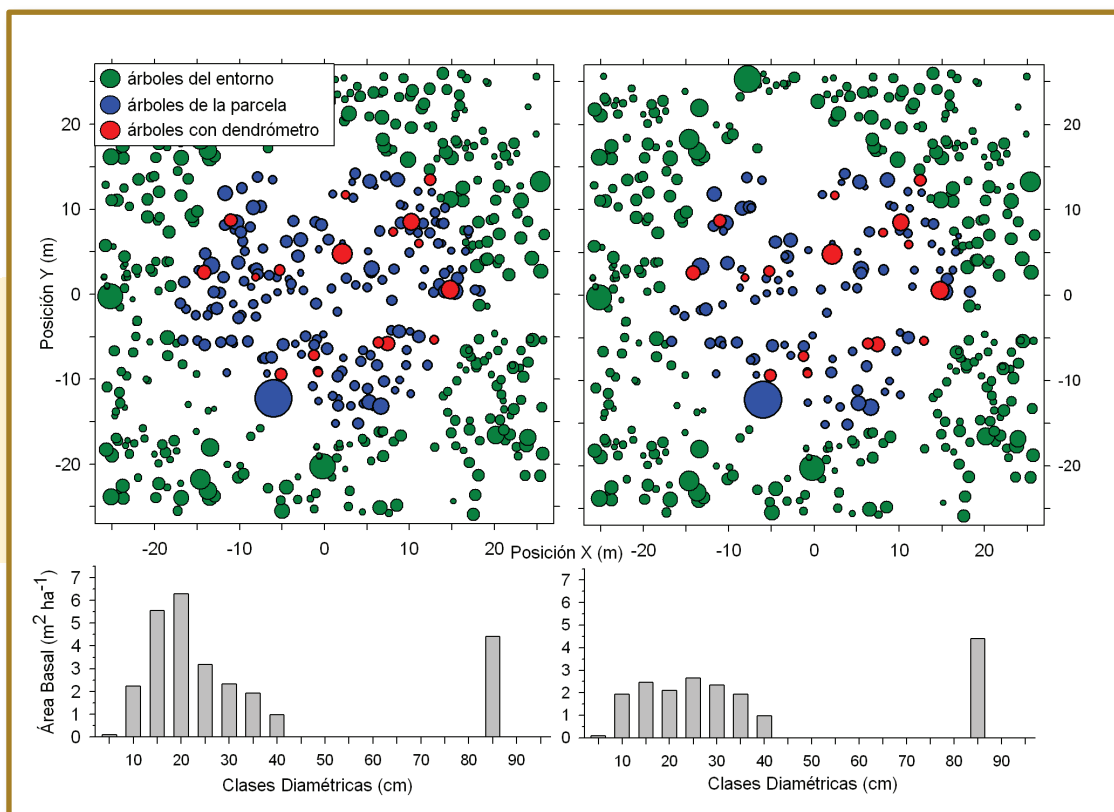


Figura 7. Estructura espacial del dosel en una de las parcelas de Yunquera en las que se aplicó una reducción del 30% del área basal, antes (izquierda) y después (derecha) del tratamiento de entresaca. Los tamaños de los círculos son proporcionales al tamaño de los árboles.

Fuente: Lechuga (2013).

Figura 8

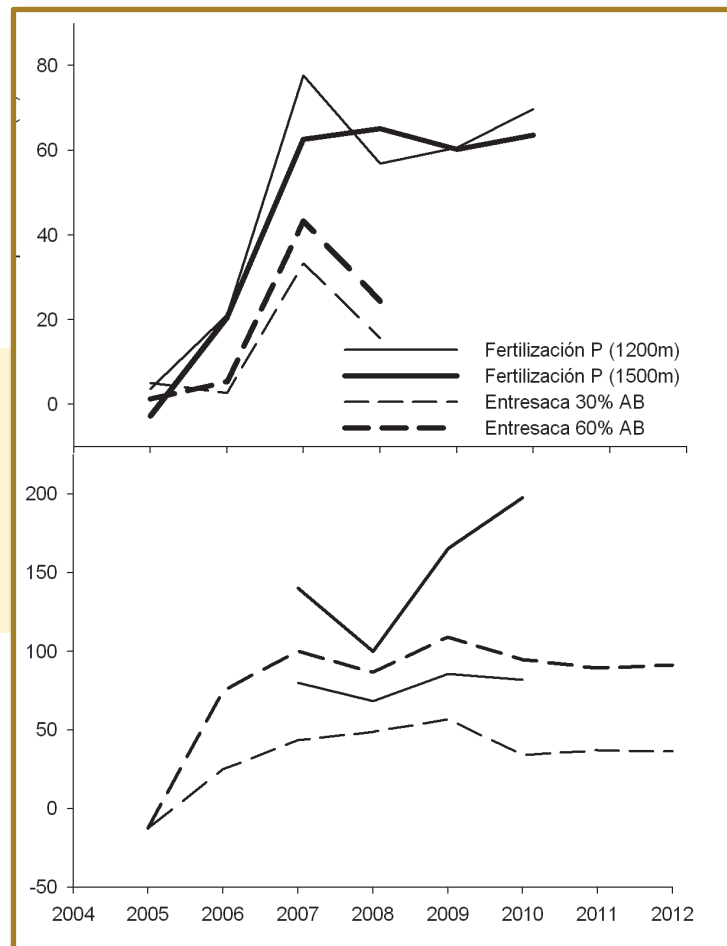


Figura 8. Efecto de los tratamientos de entresaca en el pinsapar de Yunquera, y de fertilización compensatoria con fósforo en el pinsapar de Sierra Bermeja, sobre el crecimiento primario (elongación de ramas, gráfica superior) y el crecimiento secundario (engrosamiento del tronco, gráfica inferior). Se representa el % que representa la diferencia de crecimiento en las parcelas tratadas en comparación con las parcelas control, expresada como % respecto al crecimiento en éstas últimas $((\text{tratamientos} - \text{control})/\text{control}) * 100$. En todos los casos el efecto positivo de los tratamientos fue significativo desde el año 2006.

Fuente: Elaborado a partir de Blanes (2010) y Lechuga (2013).

También se han obtenido indicios de una menor vulnerabilidad al estrés climático en los árboles de las parcelas entresacadas, cuyo balance hídrico y energético ha mejorado en comparación con los de las parcelas densas. El momento de cierre estomático se retrasa y se alcanzan potenciales xilemáticos más negativos en verano. La concentración de carbohidratos no estructurales en sus hojas y ramas es más alta al inicio de primavera (y esta reserva energética se consumen en mayor grado durante el periodo de crecimiento). Y mantienen flujos de savia más altos tanto en primavera (+14%) como verano (+43%) cuando el déficit de vapor de la atmósfera sobrepasa los 11 hPa y la demanda de agua comienza a ser elevada (Figura 9).

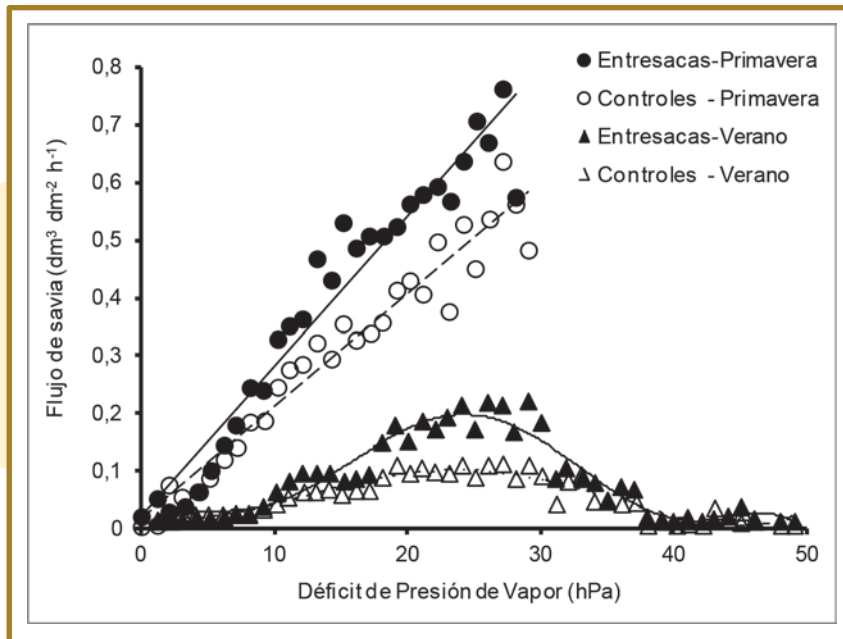
Resulta particularmente interesante que, cuando se compara el consumo de agua per cápita con el grado de agotamiento de su reserva en el suelo al final del verano, el efecto de la entresaca resulta mayor del esperado si simplemente “cada árbol toca a más agua porque hay menos árboles” (Figura 10). Así, la humedad residual en el suelo al final del verano tiende a ser menor en las parcelas entresacadas, y el incremento en el consumo de agua por unidad de AB que permanece en ellas es desproporcionado respecto al porcentaje de reducción del AB aplicado. Un árbol de 16 cm dbh viene a consumir durante el verano unos 400 litros de agua en las parcelas entresacadas, frente a sólo 185 litros si está en una parcela densa. Estos resultados indican un incremento, no sólo de

la eficacia, sino también de la eficiencia de los árboles en la explotación del recurso hídrico del suelo, como consecuencia del tratamiento selvícola. Posiblemente, esto se relacione con el hecho de que los tratamientos no sólo disminuyeron la competencia por el agua, sino también por la luz. La mejora del ambiente lumínico en las parcelas entresacadas parece tener un efecto sinérgico sobre la capacidad de explotación del agua del suelo por los árboles. Esta hipótesis está siendo actualmente investigada (proyecto MICIN CGL2010-18976) mediante el sombreado con andamiajes de árboles en las parcelas entresacadas (Figura 11). Se puede así evaluar el comportamiento de árboles bajo el ambiente lumínico propio de parcelas densas, pero con el descenso en el nivel de competencia por el agua propio de las parcelas entresacadas. Esperamos que ello contribuya a optimizar el protocolo de manejo de diversificación estructural de los pinsapares.

Caso 2. Manejo adaptativo del pinsapar de Bermeja al estrés contaminante mediante fertilización compensatoria

Como ya se comentó, los síntomas de decaimiento en el pinsapar de Bermeja se relacionan con un estado de limitación por P y desbalances nutricionales N/P en los árboles, inducidos por entradas atmosféricas contaminantes. En base a ello, en este pinsapar se ha realizado un ensayo de fertilización compensatoria con P, también dentro del Plan de Recuperación del Pinsapo. El

■ **Figura 9**



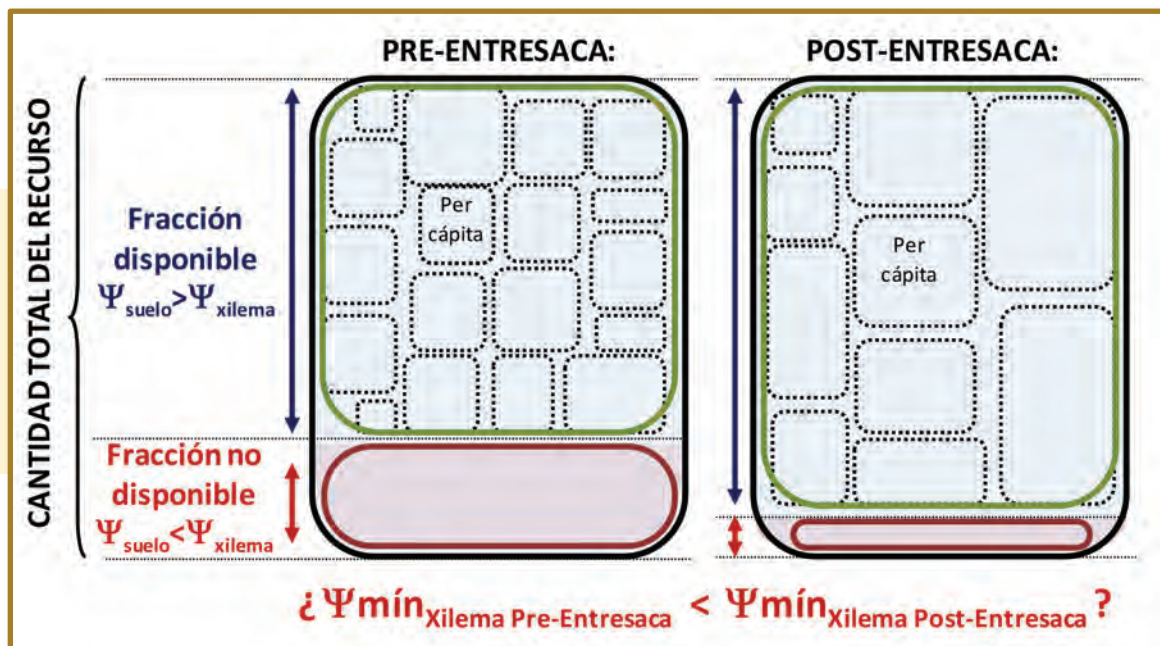
▲ **Figura 9.** Efecto del déficit de presión de vapor del aire (eje de abcisas) sobre el flujo de savia (eje de ordenadas) en árboles de parcelas tratadas con entresaca de diversificación estructural (símbolos oscuros) o en parcelas control (símbolos claros), en primavera (círculos) y en verano (triángulos).

Fuente: Elaboración propia.

objetivo era diseñar un protocolo contrastado de manejo paliativo, aplicable en caso de verificarse un avance de su estado de saturación de N (Blanes 2010). El ensayo se realizó en parcelas triplicadas de 400-500 m², tanto en la franja altitudinal superior (1500 m) como inferior (1200 m) de este pinsapar, añadiendo un total de 144 kg/ha de superfosfato triple granulado (46% P₂O₅), en cuatro aplicaciones sucesivas (octubre 2005, mayo y octubre 2006, octubre 2007). El cálculo de las dosis se basó en

pruebas de laboratorio para determinar la capacidad de fijación de fosfato (muy alta) de los suelos serpentínicos de este pinsapar. Como en el caso anterior, también se desarrolla un programa de seguimiento a largo plazo de las respuestas al tratamiento de fertilización (Carreira et al. 2013, Blanes 2010, Blanes et al. 2012, Blanes et al. 2013a y 2013b). Asociado al incremento en la disponibilidad de P en el suelo se han observado aumentos en superficie foliar, la producción y el crecimiento de los

■ **Figura 10**



▲ **Figura 10.** Interpretación del efecto desproporcionado del ensayo de entresaca sobre el consumo de agua de los árboles. En parcelas densas y homogéneas, el ambiente lumínico es pobre, el cierre estomático estival es más temprano y la tensión máxima que llegan a aplicar los árboles para succionar agua no es tan alta (potencial hídrico del xilema -Ψ_{xilema}- menos negativo). La mejora de la señal lumínica que perciben los árboles en las parcelas entresacadas los hace menos conservativos en el uso del agua: retarda el cierre estomático estival y forzaría potenciales xilemáticos más negativos. Esto permitiría a los árboles acceder a una fracción del agua del suelo que no llega a usarse en las parcelas control, al estar retenida en la matriz edáfica con un potencial hídrico -Ψ_{suelo}- más negativo que la succión máxima que estos árboles pueden ejercer.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11



Figura 11. Experimento en campo de sombreado de árboles en las parcelas entresacadas, con el que se pretende probar la hipótesis expresada en la Figura 10.

Fuente: Elaboración propia.

árboles (crecimiento radial acumulado hasta 2010 un 233% superior que en parcelas control; Figura 8), y un ajuste del desbalance nutricional con fuertes reducciones en las relaciones N/P y C/P de las acículas hasta los valores normales de la especie. Por otro lado, también se observan mejoras en los síntomas de saturación de N a nivel de ecosistema, como descensos en la actividad fosfatasa del suelo y raíces, y en la lixiviación de nitrato. Como muestra un experimento de marcaje *in situ* con ^{15}N y exclusión de raíces, la fertilización compensatoria recupera la capacidad de retención de N del ecosistema, que pasa del 38-61% según la altitud en parcelas control, al 59-96% en las fertilizadas, como consecuencia de la mejora nutricional en los árboles (Figura 12). Como posibles efectos adversos, cuyo alcance se está valorando, cabe mencionar una reducción significativa de la diversidad de la comunidad de ectomicorizas del suelo, y de la ramificación de las raíces aunque no de su % de micorrización. El programa de monitorización se mantiene en la actualidad, aun con menor intensidad, al objeto de verificar el carácter transitorio o no de los efectos descritos y la posible aparición de efectos indeseados a más largo plazo. En todo caso, se cuenta con un protocolo de manejo ensayado para el caso de agudización de síntomas y si no disminuyeran suficientemente en el futuro las entradas contaminantes mediante el control de sus fuentes.

Caso 3. Medidas preventivas de resguardo genético de masas naturales de *Abies pinsapo*

La prohibición del comercio de plantas de pinsapo a raíz de su catalogación como “en peligro de extinción” tuvo la contrapartida, como se comentó anteriormente, de la llegada en número importante a

los viveros de la zona rondeña, es decir, a la zona de distribución natural del pinsapo, de ejemplares del híbrido *Abies x masjoanis* (*Abies alba* x *Abies pinsapo*) procedentes de producciones catalanas. Aunque por el momento no se han detectado individuos naturalizados, existe un peligro potencial de contaminación genética dado que el nuevo híbrido produce piñas estériles y fértiles. Entre las medidas adoptadas y programadas para tratar este riesgo se incluyen la elaboración de una guía para la fácil identificación diagnóstica de los distintos tipos del híbrido (Soto et al. 2013), facilitándose así la labor de los agentes forestales en la detección y eliminación, en su caso, de híbridos invasores. También se pretende declarar áreas de preservación genética de 20 km de radio alrededor de los pinsapares malagueños y gaditanos, de las que se eliminen progresivamente los híbridos que existan. Asimismo, la Consejería de Medio Ambiente está promoviendo cambios legislativos y colaboraciones con los viveristas. Se persigue evitar la comercialización de plantones cuyo origen genético pueda suponer un riesgo para las poblaciones naturales de pinsapo, facilitar acciones de cultivo y comercialización de pinsapo autóctono (en los términos del artículo 28 Ley 8/2003 en tanto no haya cambio normativo), e implantar huertos semilleros que incluyan toda la variabilidad genética detectada en la especie, con el objeto de producir semillas autóctonas.

Recomendaciones para su aplicación. Reflexión final.

En este capítulo hemos presentado nuestras experiencias en el manejo adaptativo (*sensu* Holling

Figura 12

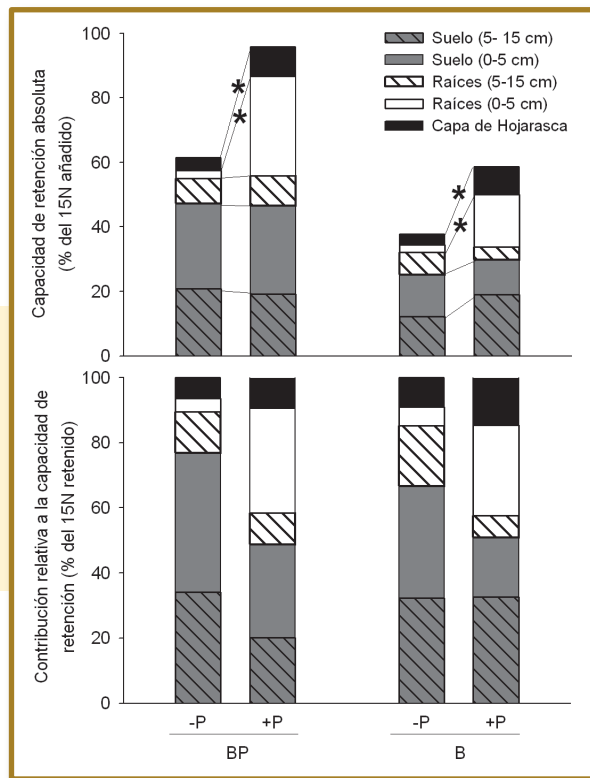


Figura 12. Cambios en la capacidad del ecosistema para retener nitrógeno como consecuencia de la fertilización compensatoria en el pinsapar de Sierra Bermeja. Se muestra, en términos absolutos y relativos, la cantidad del ^{15}N añadido antes del inicio del periodo vegetativo que es posible recuperar después de cinco meses (verano), bien por su retención en la capa de hojarasca y en el suelo (contribución de microorganismos y procesos geoquímicos), o bien por su absorción por las raíces y acumulación en biomasa vegetal. Los asteriscos indican efectos significativos ($P < 0.05$) del tratamiento de fertilización. Símbolos: -P, parcelas control no fertilizadas; +P, parcelas fertilizadas con fósforo; BP, parcelas a 1200 m altitud, B, parcelas a 1400 m.

Fuente: Elaborado a partir de Blanes et al. (2012).

1978) de los bosques de *Abies pinsapo*, endémicos del Sur de la península ibérica. Aun tratándose de bosques muy particulares y con escasa significación territorial, consideramos que su casuística porta una representatividad y valor pedagógico excepcionales, que la hacen directamente extrapolable al contexto general de la gestión forestal en un mundo cambiante. Los tres casos expuestos son heterogéneos respecto a los motores de cambio (usos territoriales, estrés climático, contaminación atmosférica, invasiones biológicas) y las respuestas o riesgos involucrados (ecofisiológicas, poblacionales, biogeoquímicas, genéticos). Sin embargo, resulta ilustrativo que comparten un mismo tipo de secuencia histórica con paradoja final. En todos ellos se acotó el problema de origen local, se acumuló voluntad administrativa suficiente, se aplicaron consistentemente medidas oportunas, y se obtuvieron éxitos. Pero después, también en todos ellos, sorpresivamente, han aflorado dinámicas de riesgo que exigen un replanteamiento radical. A la larga, las soluciones iniciales generaron sinergias con nuevos agentes de estrés, ahora de carácter más global, cuyos efectos se han visto amplificadas. En el escenario actual de mayor incertidumbre, ya no sirven las reglas de manejo prefijadas... y la lección enseña que tampoco un re-diseño que prefije otras nuevas. La estrategia para el futuro ha de ser necesariamente adaptativa.

Estas experiencias tienen también mucho que ver con el marco que suministran algunas medidas legislativas y programas o planes. La catalogación de *Abies pinsapo* como “en peligro de extinción” (Decreto 104/1994 de la Junta de Andalucía) obliga a la Consejería de Medio Ambiente a desarrollar programas/proyectos

de actuación (el tercero está vigente) y a establecer un Plan de Recuperación de la especie (aprobado por Acuerdo 18/01/2011 del Consejo de Gobierno). Esto ha propiciado relaciones entre científicos de una docena de universidades y centros de investigación, la administración forestal y agentes locales. Aunque mantenidas ya por más de una década, la interacción ha sido más informal que reglada, incluso intermitentemente laxa aunque con reuniones al menos anuales, al vaivén de quehaceres y presupuesto. Sin embargo, como reconocemos las partes, está contribuyendo netamente al desarrollo de una gestión más adaptativa de los pinsapares. Los investigadores percibimos que los gestores van sustituyendo concepciones idealizadas del “equilibrio de la Naturaleza”, por las de concurrencia necesaria de un régimen apropiado de perturbación para la estabilidad dinámica de los sistemas complejos (Chapin et al. 1996). Así, no resulta casual que ensayos de manejo pro-activo para la adaptación del bosque a los motores de cambio vayan reemplazando estrategias previas de proteccionismo estricto y actuaciones básicamente reactivas (“no tocar, salvo que aparezcan problemas”). Por nuestro lado, los gestores percibimos que los científicos obtienen el valor añadido de nuevos retos y oportunidades de investigación, tanto básica como aplicada, en un ecosistema singular. Así, aunque la cobertura presupuestaria por la administración forestal haya sido ocasional, los investigadores pueden abordar, con sus fuentes de financiación habitual, nuevas hipótesis cuyo contraste les sería imposible sin la coyuntura de los montajes experimentales en campo que el manejo provee. Por eso, pese a ser adaptativos, sigue habiendo una regla prefijada, el compromiso de retroalimentación permanente de conocimientos, experiencias y necesidades entre gestores e investigadores.

■ Material suplementario

Plan de Recuperación del Pinsapo:

Dirección Web:

<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e-1ca/?vgnextoid=9073b2c42f207310VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=c47b6cbc15e77310Vgn-VCM2000000624e50aRCRD>

Publicación en el Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA):

<http://www.juntadeandalucia.es/boja/2011/25/1>

Monografía “Los Pinsapares en Andalucía (*Abies pinsapo* Boiss.): Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI”. López-Quintanilla J (coordinador); Navarro RM, Carreira JA, Coca M y Rodríguez C (editores científicos). Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba, y Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla. 576 pp. ISBN 978-84-9927-137-8 / 978-84-92807-74-1.

■ Acrónimos

AB: Área basal (m²/ha), superficie que suman las secciones transversales, a 1,3 m sobre el suelo, de los troncos de los árboles en un rodal, respecto a la superficie del mismo.

dbh: Diámetro del tronco a 1,3 m sobre el suelo.

N: Nitrógeno

P: Fósforo

■ Referencias bibliográficas

- Aber JD, Nadelhoffer KJ, Steudler P, Melillo JM (1989) Nitrogen Saturation in Northern Forest Ecosystems. *Bioscience* 39:378-386
- Alba F, López JA, Benito B, Linares JC, Nieto D, López L (2010) Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phytogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models. *Diversity and Distribution* 16:214-228
- Álvarez MA (2013) Repoblaciones y trabajos de regeneración en el pinsapar de la Sierra de la Sierra de las Nieves. En: López-Quintanilla J, Navarro RM, Carreira JA, Coca M, Rodríguez C, editores. *Los Pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Junta de Andalucía-Universidad de Córdoba. pp. 150-157
- Blanes MC (2010) *Alternativas de Manejo de los síntomas de Saturación de N en bosques de Abies pinsapo (Boiss.): Respuestas a la fertilización compensatoria con P*. Tesis Doctoral, Universidad de Jaén
- Blanes MC, Emmett BA, Viñegla B, Carreira JA (2012) Alleviation of P limitation makes tree roots competitive for N against microbes in a N-saturated forest: a test through P fertilization and 15N labelling in *Abies pinsapo* stands. *Soil Biology and Biochemistry* 48:51-59
- Blanes MC, Viñegla B, Merino JA, Carreira JA (2013a) Nutritional status of *Abies pinsapo* forests along a nitrogen deposition gradient: do C/N/P stoichiometric shifts modify photosynthetic nutrient use efficiency? *Oecologia* 171:797-808
- Blanes MC, Viñegla B, Salido MT, Carreira JA (2013b) Coupled soil-availability and tree-limitation nutritional shifts induced by N deposition: insights from N to P relationships in *Abies pinsapo* forests. *Plant and Soil* 366:67-81
- Carreira JA, García R, Liétor J, Harrison AF (2000) Changes in soil phosphatase activity and P transformation rates induced by acid mist-application of N- and S- containing acid-mist to a forest canopy. *Soil Biology and Biochemistry* 32:1857-1865
- Carreira JA, Salido MT, Torres P, Blanes MC, Viñegla B, García R (2013) Efectos de la contaminación atmosférica en los Pinsapares de Andalucía. En: López-Quintanilla J, Navarro RM, Carreira JA, Coca M, Rodríguez C, editores. *Los pinsapares (Abies pinsapo Boiss.) en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Junta de Andalucía y Universidad de Córdoba. pp. 375-387
- Chapin FS, Torn MS, Tateno M (1996) Principles of ecosystem sustainability. *The American Naturalist* 148:1016-1037

- Dentener F, Drevet J, Lamarque I et al. (2006) Nitrogen and sulphur deposition on regional and global scale: a multimodel evaluation. *Global Biogeochemical Cycles* 20, GB4003, doi:10.1029/2005GB002672
- Galloway JN, Aber JD, Erisman JW, Seitzinger SP, Howarth RW, Cowling EB, Cosby BJ (2003) The Nitrogen Cascade. *BioScience* 53:341-356
- Guzmán JR, Catalina MA, Navarro RM, López-Quintanilla J, Sánchez-Salguero R (2013) Los paisajes del pinsapo a través del tiempo. En: López-Quintanilla J, Navarro RM, Carreira JA, Coca M, Rodríguez C, editores. *Los Pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Junta de Andalucía-Universidad de Córdoba. pp. 111-149.
- Harrison AF, Carreira JA, Poskitt JM, Robertson SMC, Smith R, Hall J, Hornung M, Lindley DK (1999) Impacts of acidifying pollutant inputs on forest canopy condition in the U.K.: possible role of P limitations. *Forestry* 72:367-377
- Hedin LO, Likens GE, Bormann FH (1987) Decrease in precipitation acidity resulting from decreased SO₄ concentration. *Nature* 325:244-246
- Holling CS (1978) *Adaptive Environmental Assessment and Management*, Blackburn Press
- Keeton W (2006) Managing for late-successional/old-growth characteristics in northern hardwood-conifer forests. *Forest Ecology and Management* 235:129-142
- Lechuga V (2013) *Modulación denso-dependiente del uso del agua y relaciones crecimiento-clima en árboles con estrategia de evitación de la sequía: un test sobre Abies pinsapo Boiss.* Trabajo Tutelado de Iniciación a la Investigación, Universidad de Jaén
- Liétor J (2002) *Patrones de disponibilidad y limitación por nutrientes como indicadores de estado en masas de pinsapar (Abies pinsapo Boiss.)*. Tesis Doctoral, Universidad de Jaén
- Liétor J, García R, Viñegla B, Ochoa V, Linares JC, Hinojosa B, Salido MT, Carreira JA (2002) Variabilidad biogeoquímica en masas de pinsapar: efecto de la litología y el estado sucesional. *Ecología* 16:45-57
- Liétor J, Linares JC, Martín JM, García R, Carreira JA (2003) Relaciones suelo-planta en bosques de pinsapo (*Abies pinsapo* Boiss.): disponibilidad de nutrientes y estatus nutricional. *Acta Botánica Malacitana* 28:89-104
- Linares JC, Carreira JA (2006) El pinsapo, abeto endémico andaluz. O, ¿Qué hace un tipo como tú en un sitio como éste? *Ecosistemas* 15:171-191
- Linares JC (2008) *Efectos del Cambio Global sobre la Dinámica Poblacional y la Ecofisiología de bosques relictos de Abies pinsapo Boiss.* Tesis Doctoral, Universidad de Jaén
- Linares JC, Carreira JA (2009) Temperate-like stand dynamics in relict Mediterranean-fir (*Abies pinsapo*, Boiss.) forests from Southern Spain. *Annals of Forest Science* 66:610-620
- Linares JC, Camarero JJ, Carreira JA (2009a) Interacting effects of climate and forest-cover changes on mortality and growth of the southernmost European fir forests. *Global Ecology and Biogeography* 18:485-497
- Linares JC, Delgado A, Camarero JJ, Merino JA, Carreira JA (2009b) Competition and drought limit the response of water-use efficiency to rising atmospheric CO₂ in the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Oecologia* 161:611-624
- Linares JC, Camarero JJ, Carreira JA (2010a) Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict stands of the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Journal of Ecology* 98:592-603
- Linares JC, Camarero JJ, Bowker MA, Ochoa V, Carreira JA (2010b) Stand-structural effects on *Heterobasidion abietinum*-related mortality following drought events in *Abies pinsapo*. *Oecologia* 164:1107-1119
- Linares JC (2011) Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography* 38:619-630
- Linares JC, Delgado A, Carreira JA (2011a) Climatic trends and different drought adaptive capacity and vulnerability in a mixed *Abies pinsapo*-*Pinus halepensis* forest. *Climatic Change* 105:67-90
- Linares JC, Carreira JA, Ochoa V (2011b) Human impacts drive forest structure and diversity. Insights from Mediterranean mountain forests dominated by *Abies pinsapo*. *European Journal of Forest Research* 130:533-542
- Linares JC, Covelo F, Carreira JA, Merino JA (2012) Phenological and water-use patterns underlying maximum growing season length at the highest elevations: implications under climate change. *Tree Physiology* 32:161-170
- Linares JC, Camarero JJ, Delgado A, Carreira JA (2013a) Efectos de los cambios de clima y usos del territorio sobre la dinámica y el crecimiento de los bosques de *Abies pinsapo* en las últimas décadas. En: López-Quintanilla J, Navarro RM, Carreira JA, Coca M, Rodríguez C, editores. *Los pinsapares (Abies pinsapo Boiss.) en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Junta de Andalucía y Universidad de Córdoba. pp 401-412
- Linares JC, Ochoa MV, Carreira JA (2013b) Efecto de entresacas de diversificación estructural. En: López-Quintanilla J, Navarro RM, Carreira JA, Coca M, Rodríguez C, editores. *Los pinsapares (Abies pinsapo Boiss.) en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Junta de Andalucía y Universidad de Córdoba. pp. 465-479

- Manion PD (1991) *Tree Disease Concepts*, 2nd ed. Prentice-Hall, New Jersey. pp. 416
- Navarro RM, López-Quintanilla J, Blanco O, Sánchez-Salguero R, Guzman JR, Calzado C, Lara A (2013) Distribución actual y potencial de pinsapo (*Abies pinsapo* Boiss.). En: López-Quintanilla J, Navarro RM, Carreira JA, Coca M, Rodríguez C, editores. *Los Pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Junta de Andalucía-Universidad de Córdoba. pp. 159-186
- Nihlgard B (1985) The ammonium hypothesis - An additional explanation to the forest dieback in Europe. *Ambio* 14:2-8
- Ruiz de la Torre J, García JI, Oria JA, Cobos JM, Neva JC, Navarro RM, Catalina MA, López-Quintanilla J, Álvarez MA, Arista M, Talavera S, Herrera J (1994). *Gestión y conservación de los pinsapares andaluces*. Asociación Forestal Andaluza, Cádiz. pp. 102
- Salido MT (2007) *Evaluación del estado de saturación de nitrógeno en masas de pinsapar (Abies pinsapo Boiss.) en un gradiente geográfico del sur de la Península Ibérica: patrones de entrada, circulación interna y salida de nitrógeno en el ecosistema*. Tesis doctoral, Universidad de Jaén
- Soto D, García JI, Pérez E (2004) Descripción del híbrido *Abies x masjoannis*. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 13:347-356
- Soto D, García JI, Pérez E (2013) Identificación rápida de *Abies x masjoannis* y resguardo genético de los pinsapares. En: López-Quintanilla J, Navarro RM, Carreira JA, Coca M, Rodríguez C, editores. *Los pinsapares (Abies pinsapo Boiss.) en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Junta de Andalucía y Universidad de Córdoba. pp. 455-458
- Vitousek PM, Howarth RW (1991) Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry* 13:87-115
- Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens G, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman DG (1997) Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* 7:737-750
- Viñeola B, García R, Ochoa V, Liétor J, Carreira JA (2006) Soil phosphorus availability and transformation rates in relictic pinsapo-fir forests from southern Spain. *Biogeochemistry* 78:151-172