



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1753

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Respuesta de un robleal de 180 años a la adición de nutrientes

MAYORAL, C. (1,2), SMITH, A. (3), RAVAIOLI, D. (4), ULLAH, S. (2,5) GRZESIK, R. (2,5), HARTLEY, I. (6) y MACKENZIE, R. (2,5)

- (1) Department of Biosciences, Universidad de Birmingham, Reino Unido.
- (2) Birmingham Institute of Forest Research (BIFoR), Reino Unido.
- (3) Department of Geography, Universidad de Exeter, Reino Unido
- (4) Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Universidad de Bologna, Italia.
- (5) Department of Geography, Universidad de Birmingham, Reino Unido.
- (6) Department of Geography, Universidad de Exeter, Reino Unido

Resumen

Los robleales centenarios son ecosistemas forestales esenciales para la captura y almacenamiento de carbono, pero su capacidad de asimilación de carbono podría estar comprometida por la disponibilidad de nutrientes. En el bosque experimental BIFoR-FACE (Reino Unido), se ha aumentado artificialmente el nivel de CO₂ desde 2017. A los 6-7 años de exposición a CO₂ elevado, el bosque ha mostrado un incremento en la biomasa leñosa; sin embargo, hay indicios que sugieren que la capacidad de acumular carbono extra podría verse afectada por una progresiva limitación de nutrientes. En 2021, se implementó un experimento de adición de nutrientes con el objetivo de evaluar si el bosque está efectivamente limitado por nutrientes. Los resultados de tres años de fertilización muestran un aumento significativo en la producción foliar con la adición de N y N+P, mientras que el sistema radical no mostró cambios significativos. El análisis de los incrementos de área basimétrica evidenció una respuesta significativa al aporte de N, mientras que no se observó una respuesta a la adición de P. Los resultados indican una posible limitación en la capacidad de absorción de carbono del bosque a corto o medio plazo, lo que conlleva importantes implicaciones para las dinámicas del cambio climático.

Palabras clave

Adición de nutrientes, productividad, bosques maduros, Cambio Global

1. Introducción

Los bosques templados desempeñan un importante papel en la regulación del clima global debido a su capacidad para capturar y almacenar carbono atmosférico. Sin embargo, la respuesta al aumento de las concentraciones de CO₂ de estos ecosistemas forestales sigue siendo incierta, en parte debido a que muchos de los suelos donde se encuentran estos bosques podrían estar limitados en términos de nutrientes (Du et al. 2024). La capacidad de los bosques maduros para absorber CO₂ es una de las variables utilizadas por los modelos de sistemas terrestres para la estimación de parámetros críticos como la temperatura media del planeta, sin embargo, tan solo a partir de experimentos FACE (Free Air CO₂ Enrichment) es posible obtener datos empíricos sobre la respuesta de los bosques a la elevación del CO₂ atmosférico.



La primera generación de experimentos FACE se realizó en sistemas forestales jóvenes, establecidos principalmente sobre suelos agrícolas degradados. En estos contextos, las condiciones nutricionales aún no se habían estabilizado tras la reforestación. Entre los ejemplos más destacados se encuentran Duke FACE (DeLucia et al., 1999) y Oak Ridge FACE (Norby et al., 2021), ambos realizados en plantaciones monoespecíficas: *Pinus taeda* en Duke FACE y *Liquidambar styraciflua* L. en Oak Ridge FACE. Los dos experimentos evidenciaron un efecto positivo del CO₂ en la productividad forestal, aunque en Duke FACE la deficiencia en nitrógeno limitó el crecimiento de manera más significativa que en Oak Ridge FACE.

La segunda generación de experimentos FACE se ha centrado en ecosistemas forestales maduros, y cuenta tan solo con dos experimentos a nivel mundial: EucFACE, ubicado en un bosque monoespecífico de *Eucalyptus tereticornis* en Australia y BIFoR-FACE, bosque objeto de este estudio y ubicado en Reino Unido. Se trata de un bosque de 180 años de edad, mixto, con una estructura compleja y está dominado por *Quercus robur* y ubicado en Reino Unido (Hart et al., 2020). Al contrario que en los experimentos FACE desarrollados en bosques jóvenes, en EucFACE no se ha observado un efecto significativo del aumento de CO₂ en la productividad primaria neta (NPP) del bosque, principalmente debido a una limitación en la disponibilidad de fósforo en el suelo (Ellsworth et al., 2017; Jiang et al., 2024).

En BIFoR-FACE sin embargo se ha observado un incremento en la biomasa leñosa en 2021 y 2022 (Norby et al., 2024). Sin embargo, aunque la respuesta al CO₂ es positiva, se desconoce el grado de limitación de los nutrientes en este ecosistema, o si efectivamente existe una limitación, lo que dificulta evaluar si los efectos observados del CO₂ están siendo condicionados por restricciones nutricionales.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio ha sido evaluar si el bosque experimental BIFoR-FACE se encuentra limitado por la disponibilidad de nitrógeno (N), fósforo (P) o ambos. Para ello se ha realizado un experimento factorial de fertilización aplicando estos nutrientes en parcelas situadas en el mismo bosque experimental donde se ubica BIFoR-FACE. Este análisis permitirá determinar si la capacidad del bosque para absorber carbono adicional podría estar restringida por una disponibilidad limitada de nutrientes. Los objetivos específicos incluyen:

1. Determinar los efectos de la adición de nutrientes (N, P y N+P) en la productividad de biomasa foliar, radical y leñosa.
2. Analizar las variaciones en los incrementos de área basimétrica de los árboles antes y después del inicio de la fertilización a través de la extracción de cores.

3. Metodología

Para desarrollar este estudio se establecieron 13 nuevas parcelas circulares donde se aplicó N, P y N+P en 3, 4 y 3 parcelas respectivamente. Se instalaron además 3 parcelas control (C). El área de las parcelas osciló entre 350 y 450 m². El centro de cada parcela se ubicó en un roble maduro alrededor del cual se suministraron manualmente sobre el suelo 50 kg ha⁻¹ de N granulado (NH₄NO₃) y

20 kg ha⁻¹ de P granulado Ca(H₂PO₄)₂ al año, distribuidos durante la estación de crecimiento (de marzo a julio) en 3 aplicaciones, siguiendo el esquema de la Figura 1.

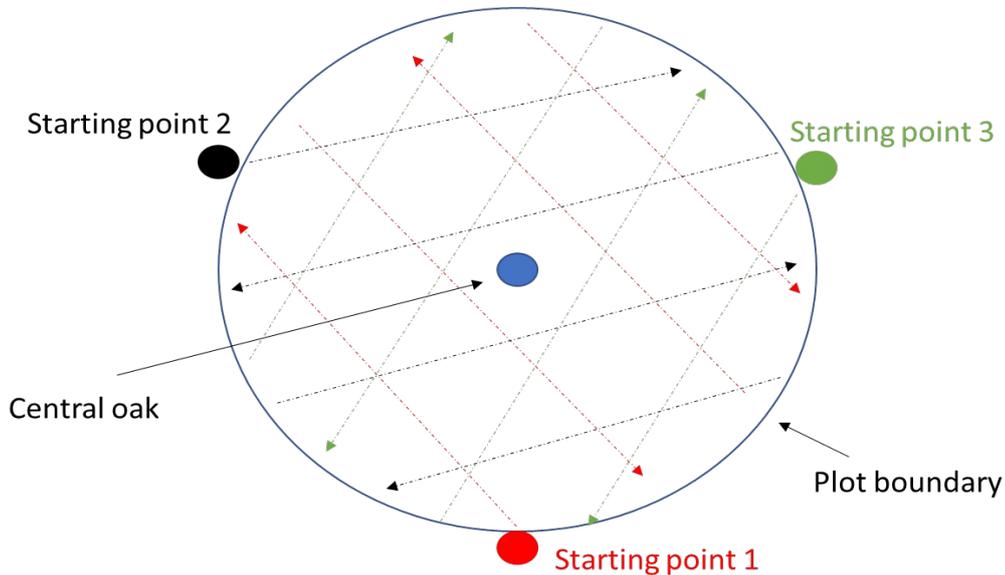


Figura 1. Estrategia de aplicación de fertilizante

Para calcular la productividad leñosa, se instalaron dendrómetros manuales a una altura de 1,3 metros en todos los árboles adultos, realizando mediciones mensuales a lo largo del período de estudio. Para cuantificar la producción foliar se instalaron 6 trampas de hojarasca de 0.25 m² por parcela y se vaciaron periódicamente. La hojarasca recogida fue clasificada por especies: roble y resto de especies, secada al horno durante 48 horas a 60°C y pesada.

La productividad radical se calculó mediante la instalación de cilindros de nylon de malla 1 mm, 23.7 cm² de sección y 30 cm de longitud previamente rellenos con suelo recogido en las inmediaciones, tamizado y libre de raíces. Cada 4 meses se llevó a cabo la extracción y reemplazo de las mallas rellenas nuevamente con suelo libre de raíces. El suelo extraído se dividió por horizontes (O, A y B), las raíces fueron separadas del suelo, lavadas con agua destilada, secadas al horno durante 48 horas a 60°C y pesadas.

La toma de datos comenzó en 2020, año previo al inicio de la fertilización, y continuó hasta 2023, excepto para la productividad de raíces que no se midió en 2020.

Para lograr una mayor precisión en los cálculos de incrementos de área basimétrica anuales (BAI) y poder compararlos con los incrementos anuales anteriores al inicio del experimento, se extrajeron cores de dos *Quercus robur* por parcela al final del experimento. Para la extracción se utilizaron barrenas de 5,15



mm de diámetro y 350 mm de longitud posicionadas de forma perpendicular a los anillos de crecimiento, introducidas en el tronco hasta la profundidad máxima de la barrena. Los cores se escanearon y el grosor de los anillos se midió utilizando el software Coorecorder 7.8.1. Los datos obtenidos se sometieron a una datación cruzada con mediciones de árboles de la región. Las posibles discrepancias en los anillos se resolvieron mediante el análisis de los coeficientes de correlación entre las mediciones obtenidas y los datos de referencia regionales. Para tener en cuenta las variaciones de crecimiento de los árboles antes del comienzo de la fertilización, se calculó la media por parcela del BAI de cada árbol desde 1988 a 2020, y la media global de BAI de todos los árboles para el mismo periodo. La diferencia relativa del BAI medio por parcela antes del tratamiento y la media global se utilizó para normalizar los datos de BAI de cada árbol.

Todos los análisis estadísticos se realizaron con SAS 9.4 proc mixed. Para la biomasa foliar y radical se usó un RMANOVA con trampas anidadas dentro de parcelas como estructura jerárquica en el caso de la biomasa foliar, y cilindro anidado dentro de parcelas en el caso de la biomasa radical. Para el análisis de los BAI se incluyó la circunferencia a 1.3 m como covariable, tratamiento y periodo (pre y post fertilización) como efectos fijos, y árbol anidado dentro de parcela como efecto aleatorio.

4. Resultados

No se observaron diferencias significativas en la biomasa radical entre tratamientos, mientras que sí las hubo entre años ($P=0.02$). El análisis de la biomasa foliar sin clasificar por especie no mostró diferencias significativas entre tratamientos, ni en términos totales ni relativos con respecto al año base (2020). El análisis de la biomasa foliar de roble sin relativizar con respecto a 2020 mostró diferencias significativas entre tratamientos ($P=0.02$), años ($P<0.0001$) y en la interacción tratamiento x año ($P=0.01$) (Figura 2).

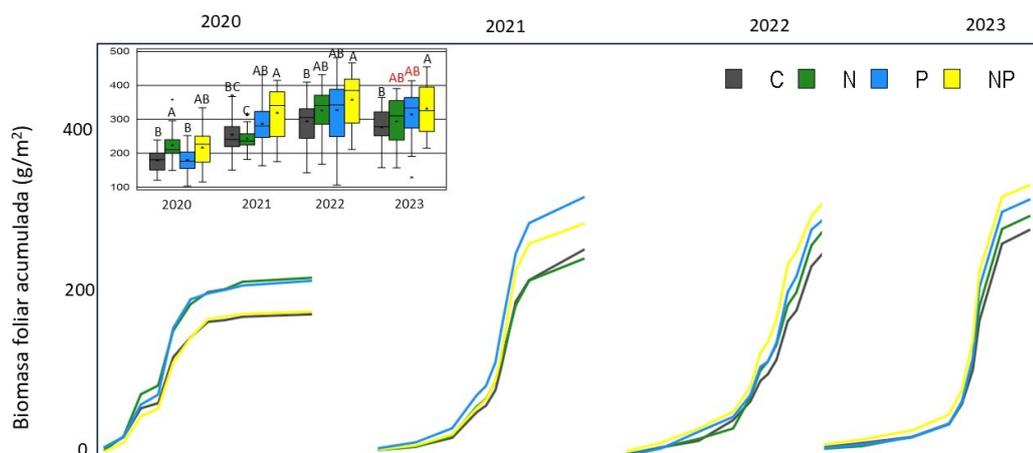


Figura 2. Biomasa foliar acumulada promedio por tratamiento. Resultados test de Tukey para la comparación de medias representados en

recuadro interior. Barras con la misma letra no presentan diferencias significativas. Las barras de error representan el error estándar de las medias de tratamiento basado en las trampas como unidades de medición.

Aunque no hubo diferencias significativas en el cambio relativo de biomasa con respecto a 2020 entre tratamientos ($P=0.06$), sí las hubo entre años ($P<0.0001$) y en la interacción tratamiento x año ($P=0.02$). El análisis post-hoc de Tukey, clasificó el tratamiento de N en un grupo de media menor que el resto de los tratamientos (Figura 3).

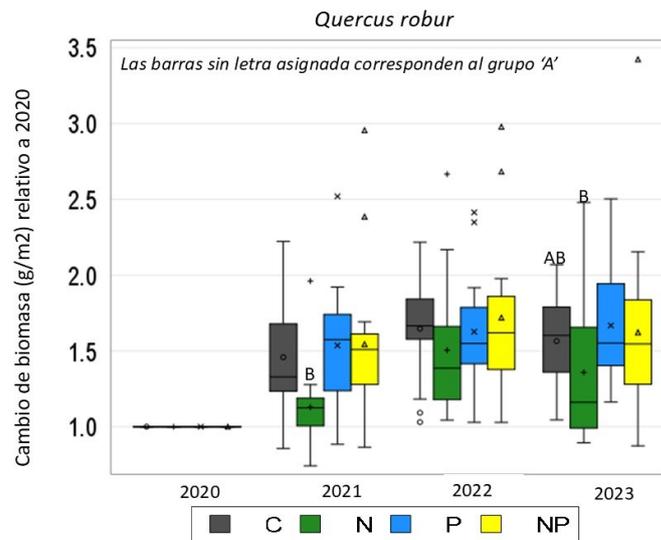


Figura 3. Cambio de biomasa relativo a 2020. Barras con la misma letra no presentan diferencias significativas. Las barras de error representan el error estándar de las medias de tratamiento basado en las trampas como unidades de medición.

Los tratamientos P y N+P fueron los más productivos en términos foliares.

El análisis de los anillos de crecimiento evidenció una gran variabilidad entre árboles. De los 26 robles que fueron muestreados, 2 dos fueron excluidos del análisis por presentar una mala correlación con la referencia regional, seis mostraron un crecimiento muy bajo especialmente durante los últimos 15 años, y tres de ellos se encuentran en las parcelas de adición de P (Figura 4).

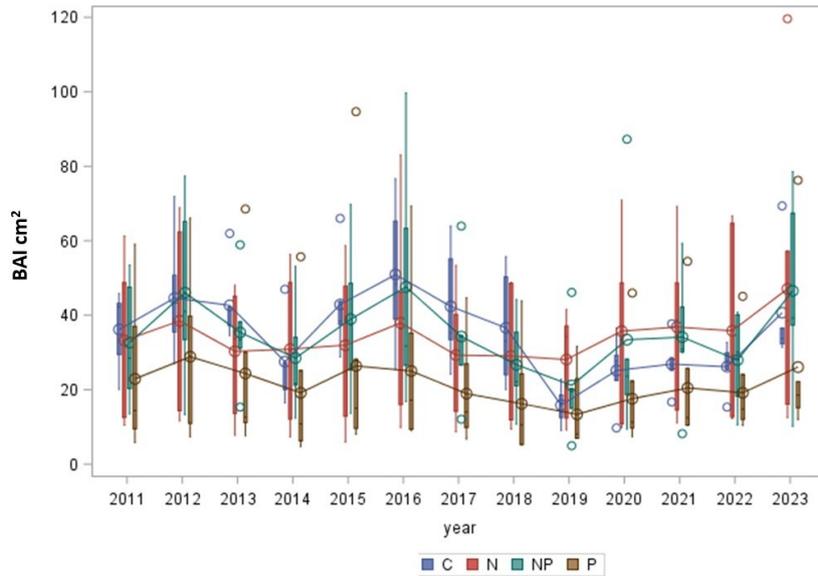


Figura 4. Promedio de BAI por tratamiento desde 2011.

El análisis de los BAI normalizados se realizó sistemáticamente para múltiples bloques de 3 y 5 años. En la mayoría de los bloques de años estudiados se observaron diferencias significativas entre los BAI pre y post fertilización, sugiriendo una respuesta positiva a la adición de N, mientras que no se detectó un efecto significativo para P o N+P (Figura 5).

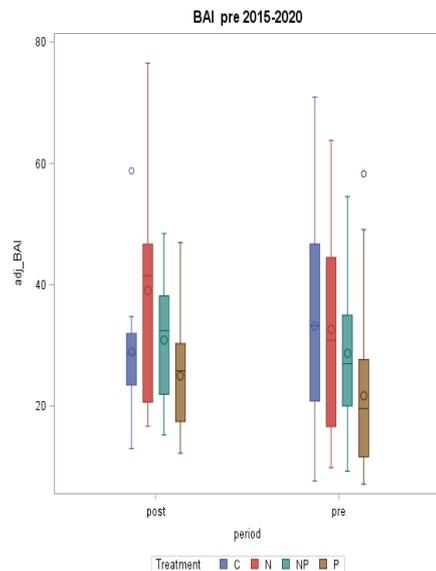


Figura 5. Promedio de BAI por tratamiento desde 2011. Las barras de error representan el error estándar de las medias de tratamiento basado en los árboles como unidades de medición.

5. Discusión



Los resultados de 3 años de fertilización indican que los nutrientes aplicados impactan de forma diferente dependiendo del compartimento del bosque de que se trate, siendo el P un mejor promotor de la productividad foliar y el N interviniendo en mayor medida en el crecimiento radial. Debido a la variabilidad en las respuestas de los diferentes compartimentos del bosque y la baja replicación, consecuencia de la extensión limitada del área experimental, estos resultados ofrecen indicios valiosos, pero no permiten una respuesta definitiva sobre la respuesta general de los árboles. El crecimiento radial, analizado a través del BAI antes y después del inicio de la fertilización, muestra una respuesta positiva a la adición de N, lo que destaca la importancia de este nutriente para el crecimiento leñoso.

6. Conclusiones

Estos resultados tienen importantes implicaciones sobre los hallazgos de BIFoR-FACE, donde el incremento de la biomasa leñosa bajo condiciones de CO₂ elevado evidencia una respuesta positiva del bosque al aumento del CO₂ atmosférico. Sin embargo, una progresiva disminución en la disponibilidad de nitrógeno debido a una mayor demanda impulsada por el CO₂ podría convertirlo en un factor limitante clave, comprometiendo a medio plazo la capacidad del bosque para mantener la asimilación sostenida de carbono adicional.

7. Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el proyecto NERC 'QUINTUS' NE/S015833/1. Se utilizaron fondos de la Royal Society para financiar movilidad de investigadores y realizar trabajos de campo.

8. Bibliografía

DELUCIA, E.H., HAMILTON, J.G., NAIDU, S.L., THOMAS, R.B., ANDREWS, J.A., FINZI, A., LAVINE, M., MATAMALA, R., MOHAN, J.E., HENDREY, G.R. AND SCHLESINGER, W.H.; 1999. Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO₂ enrichment. *Science*, 284(5417), pp.1177-1179.

DU, E., TERRER, C., MCNULTY, S.G. AND JACKSON, R.B.; 2024. Nutrient limitation in global forests: current status and future trends. *Future Forests*, pp.65-74.

ELLSWORTH, D.S., ANDERSON, I.C., CROUS, K.Y., COOKE, J., DRAKE, J.E., GHERLEND, A.N., GIMENO, T.E., MACDONALD, C.A., MEDLYN, B.E., POWELL, J.R. AND TJOELKER, M.G.; 2017. Elevated CO₂ does not increase eucalypt forest productivity on a low-phosphorus soil. *Nature Climate Change*, 7(4), pp.279-282.

HART, K.M., CURIONI, G., BLAEN, P., HARPER, N.J., MILES, P., LEWIN, K.F., NAGY, J., BANNISTER, E.J., CAI, X.M., THOMAS, R.M. AND KRAUSE, S.; 2020. Characteristics of



free air carbon dioxide enrichment of a northern temperate mature forest. *Global change biology*, 26(2), pp.1023-1037.

JIANG, M., CROUS, K.Y., CARRILLO, Y., MACDONALD, C.A., ANDERSON, I.C., BOER, M.M., FARRELL, M., GHERLEND, A.N., CASTAÑEDA-GÓMEZ, L., HASEGAWA, S. AND JAROSCH, K.; 2024. Microbial competition for phosphorus limits the CO₂ response of a mature forest. *Nature*, pp.1-6.

NORBY, R.J., TODD, D.E., FULTS, J. AND JOHNSON, D.W.; 2001. Allometric determination of tree growth in a CO₂-enriched sweetgum stand. *New Phytologist*, 150(2), pp.477-487.