



9CFE-1783

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

Organiza





Aproximación al índice de fertilidad para la implementación de 3PG en función de variables edáficas

MIGUEL VALLEJO ORTI (1, 2), FEDERICO RUIZ FERNÁNDEZ (2), GENILDA CANUTO AMARAL (2), EVA CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS (3), JUAN M. DOMINGO-SANTOS (3), ROQUE RODRÍGUEZ SOALLEIRO (4)

1. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Zaragoza, España
2. Energía y Celulosa (ENCE), Huelva, España
3. Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva, Huelva, España
4. Departamento de Producción Vegetal y Proyectos de Ingeniería, Universidad de Santiago de Compostela, Lugo, España.

Resumen

El modelo 3PG considera los procesos fisiológicos de los árboles bajo determinadas condiciones de clima, suelo y exposición solar para predecir el crecimiento de las masas forestales. Entre los parámetros de entrada que considera se encuentra el índice de fertilidad (FR), cuyo cálculo entraña cierta ambigüedad. Una solución generalmente adoptada es el uso de inventarios forestales sucesivos de la misma localización para ajustar el mejor valor de este parámetro. Sobre los valores ajustados se plantea la estimación FR a partir de variables físicas y químicas del suelo. Primero realizamos un análisis de correlaciones de los FR ajustados a 54 parcelas de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Huelva, con distintas combinaciones de parámetros de suelo (textura, materia orgánica, profundidad, composición química). Posteriormente, realizamos ajustes para evaluar posibles configuraciones de estos parámetros que puedan explicar un determinado FR, comparando diversos algoritmos de aprendizaje automático. Si bien los resultados obtenidos no muestran patrones claros, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el carbono orgánico total, la capacidad de retención de agua (CRADU) y el pH de la solución del suelo presentan las mayores correlaciones positivas con FR.

Palabras clave

Modelos de crecimiento forestal, inventario forestal, fertilidad del suelo, roca madre, machine learning

1. Introducción

Los modelos predictivos de crecimiento del arbolado se utilizan para estimar el balance de carbono y las diferentes fracciones de biomasa de una masa forestal que se esperan obtener en distintos momentos del ciclo de desarrollo de una masa forestal. Los modelos de tipo estadístico utilizan los datos dasométricos históricos de cada sitio para establecer curvas y tablas de crecimiento y producción (DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2009). Estos modelos se basan en la hipótesis de que las condiciones ambientales medias permanecen aproximadamente constantes, cuando esta media se refiere a periodos suficientemente largos, en general iguales o superiores a 10 años. Los modelos de tipo fisiológico tratan de reproducir el



comportamiento de la masa forestal ante las distintas condiciones ambientales, adaptándose a sus posibles variaciones, por lo cual es evidente su aplicabilidad para predicciones de alta resolución temporal, periodos anuales o incluso menores, y para establecer proyecciones de producción en los diferentes itinerarios SSP (IPCC, 2023), de las variaciones climáticas y escenarios socioeconómicos climáticos futuros.

Uno de estos modelos basados en ecuaciones fisiológicas para simular el crecimiento forestal es el denominado 3PG (LANDSBERG Y WARING, 1997). Este modelo se ha utilizado en distintas especies, destacando su aplicación en eucaliptos (HAKAMADA et al., 2024), contándose en la actualidad con parametrizaciones para la Península Ibérica en los casos de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* (FONTESET al., 2006; PÉREZ-CRUZADO et al., 2011).

El modelo reproduce cómo los sistemas foliares fotosintetizan moléculas de biomasa en función de la energía recibida y las condiciones físicas (temperatura, agua) y químicas (suelo). El modelo tiene un carácter determinista, no establece posibles horquillas de variación, si bien, como parámetro de ajuste se ha utilizado el relacionado con la fertilidad del sitio, conocido como Índice de fertilidad o fertility rate (FR). Este parámetro debe adaptarse a cada zona donde se va a realizar la modelización del crecimiento del arbolado, lo que representa un desafío ya que no existe un procedimiento claro y consensuado para su cálculo.

Este problema ha sido documentado por diversos investigadores en estudios previos. ALMEIDA et al. (2010) proponen la obtención de FR como una combinación de parámetros que no se contemplan en el conjunto de procesos del modelo (o no se les da la suficiente dimensión), aunque no sean estrictamente edafológicos, como son: la limitación topográfica, a la que dan un peso del 10% del parámetro; las limitaciones de manejo, con un 20% del peso; la limitación por aireación radicular que tiene un peso del 10%; la limitación por disponibilidad hídrica con un peso del 20%; y la limitación por fertilidad a la que asignan el 40% del peso. PAUL et al. (2007) establecen los valores de FR de forma discrecional aproximativa en función de la presencia de salinidad, baja fertilidad, fertilización esporádica o buena fertilización, si bien admiten que este parámetro necesita un mayor estudio y ajuste. PÉREZ-CRUZADO et al. (2012) asumen el planteamiento de ALMEIDA et al. (2010), planteando que la limitación por fertilidad esté relacionada con la reacción de la solución del suelo (pH en H₂O), el porcentaje de materia orgánica, la presencia de Ca, Mg y K en el complejo de cambio, la saturación en Al, el contenido en P y la capacidad de intercambio catiónico. VEGA NIEVA et al. (2013) ajustan varias ecuaciones lineales de estimación de FR basadas en el contenido en arcilla y en el contenido relativo de nutrientes (RNC) alcalinos y alcalino-térreos (Ca, Mg, K y Na), entendiendo por RNC la proporción entre el contenido real del nutriente y el contenido óptimo para el desarrollo forestal. Estos investigadores obtienen resultados significativos, si bien quedaría por determinar, entre otras cuestiones, si los valores óptimos de nutrientes se ven modificados por otras condiciones ecológicas.

El valor que se asigne a FR, variable en el rango de 0 a 1, da lugar a desviaciones



significativas en las estimaciones del crecimiento de la biomasa forestal. En aquellos casos en los que se dispone de datos de crecimiento del arbolado medidos en un lugar específico, es posible estimar el valor de FR que mejor se ajusta a dichos datos en una serie temporal, por ejemplo, minimizando el error residual en los puntos de control de inventario forestal continuo (IFC). Sin embargo, como indican los trabajos citados en el párrafo anterior, el valor de FR puede evolucionar en el tiempo, en los distintos ciclos de cultivo y con la aplicación de fertilizaciones.

Por otro lado, las distintas formulaciones para la estimación de FR muestran este parámetro con un cierto carácter de “caja negra” cuya determinación puede precisar de aproximaciones estadísticas regionalizadas.

En consecuencia, resulta de gran interés establecer relaciones entre el parámetro FR y otros factores del sitio que sean medibles, por ejemplo, datos relacionados con la calidad de estación, clima, suelo, y litología del lugar. En este artículo proponemos una metodología que aborda este desafío.

2. Objetivos

Este estudio tiene como principales objetivos los siguientes:

Generar una metodología automatizada que permita determinar el valor óptimo de FR para un conjunto de parcelas en la provincia de Huelva.

Establecer relaciones entre el FR óptimo calculado para las parcelas de estudio y los valores asociados con las características físicas y químicas del suelo.

Establecer relaciones entre el FR óptimo calculado para las parcelas de estudio y los valores asociados con la litología dominante del suelo.

Llevar a cabo experimentos para explorar la viabilidad de utilizar estas relaciones en la predicción del FR.

3. Metodología

3.

a. Zona de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en el conjunto de montes con plantaciones de eucaliptar de ENCE en la provincia de Huelva, sobre un conjunto de parcelas del Inventario Forestal Continuo de la empresa, que pueden tener varias mediciones entre los años 2003 y 2013. De este conjunto de parcelas se dispone de datos de suelos para 110 localizaciones, provenientes de estudios de suelos desarrollados por la UHU para ENCE o en otros proyectos de investigación (*Figura 1*). Se han tomado como válidos estudios de suelo (DOMINGO-SANTOS Y CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS, 2025) que se encuentren a menos de 200 m del centro de la parcela, sobre la misma litofacies.

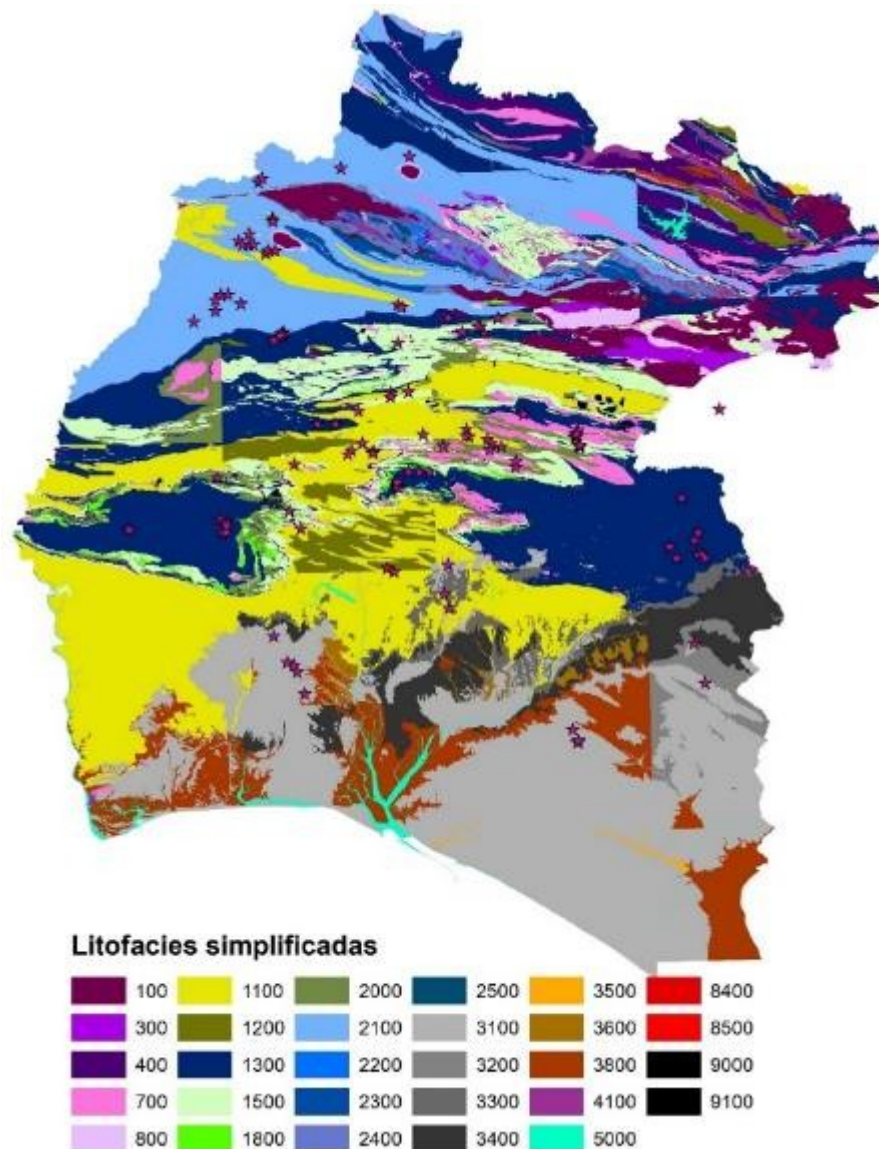


Figura 1. Distribución de las parcelas seleccionadas en la zona sur para el proyecto “Modelos de estimación del impacto del cambio climático en la productividad de las zonas de actuación de Ence en la Península Ibérica”

De las 110 parcelas se han desechado aquellas que sólo presentan datos de un inventario. También se han desechado los inventarios que presenten fuertes inconsistencias, como variaciones importantes en el número de pies para una misma parcela. Si existe un número suficiente de inventarios de la parcela se desechan sólo los inconsistentes; en caso contrario se desecha la parcela completa. También se han desechado parcelas que no tienen la información inventarial necesaria completa. De este modo, se han seleccionado 54 parcelas que cumplen los necesarios criterios de rigor en sus datos.

3.

a. **Variables de entrada**

Como se ha indicado en la introducción, 3PG es un modelo de base eco-fisiológica desarrollado para el nivel parcela o masa forestal. La Figura 2 y la Figura 3 muestran respectivamente un esquema simplificado del funcionamiento del modelo y de las variables que lo componen. Cabe destacar la radiación solar como variable de entrada fundamental en el modelo, para cuyo cálculo se desarrolló una metodología novedosa que incorpora tanto la información general de la atmósfera como la información derivada de la topografía local (CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS et al., 2024). Otras variables necesarias son de tipo climático, edáfico y dasométrico, tal y como se puede consultar en la Figura3.

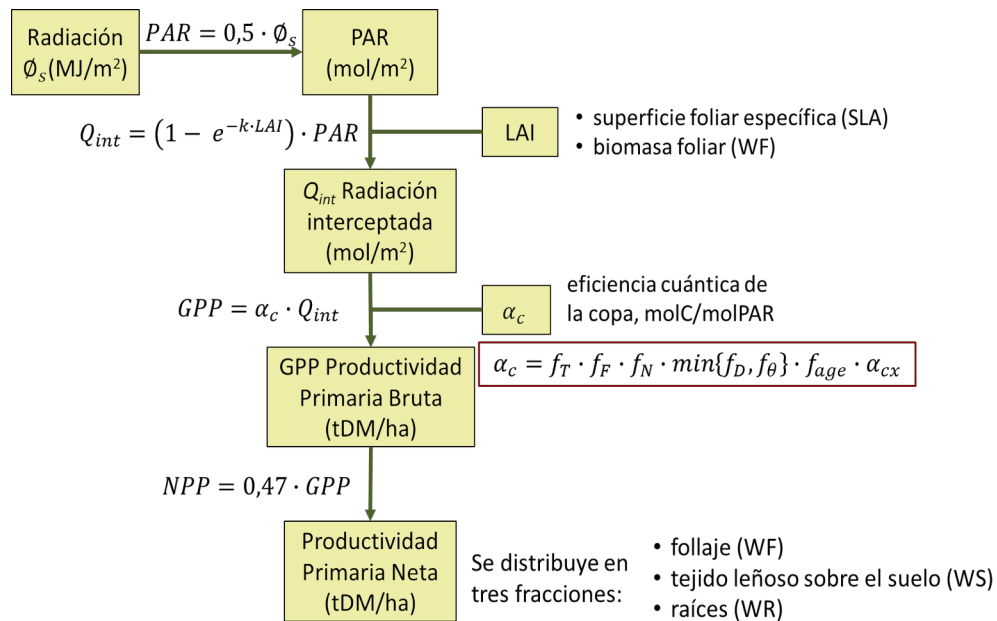


Figura 2. Esquema general del funcionamiento del modelo 3PG.

FR es un factor necesario para el cálculo del modificador o restricción de fertilidad f_N que se presenta en la Figura3. ; f_N presenta una relación funcional con FR en la forma:

$$f_N = 1(f_{N0}) \cdot (1FR)^{f_{Nn}}$$

Donde: f_{N0} es un parámetro de ajuste que da el valor de f_N cuando $FR=0$, para *Eucalyptus globulus* se propone el valor de 0,6 (LANDSBERG Y WARING, 1997); f_{Nn} es un parámetro de ajuste de la curvatura de la ecuación. Si $f_{Nn}= 1$, la función se hace lineal, con la expresión siguiente (SANDS Y LANDSBERG, 2002):

$$f_N = f_{N0}(1f_{N0}) \cdot FR$$

$$\alpha_c = f_T \cdot f_F \cdot f_N \cdot \min\{f_D, f_\theta\} \cdot f_{age} \cdot \alpha_{cx}$$

→ valor máximo de la eficiencia cuántica de la copa

Restricciones impuestas a la utilización de la radiación.
Varían entre 0 (limitación total) y 1 (sin limitación)

f_D Déficit de Presión de Vapor

- Tm_max y Tm_min
- HR(%)

f_θ Humedad del suelo

- Textura
- CRA
- Balance hídrico (P)

f_T Temperatura

- Temperatura media mensual
- Valores umbrales → si $T > T_{max}$ o $T < T_{min}$, entonces $f_T = 0$

f_F Días de helada

- Número de días de helada durante el mes

f_{age} Edad

- Edad de la parcela (meses)

f_N Fertilidad

- Arcilla, P Olsen, K, Na, Ca y Mg

Figura 3. Variables de entrada que intervienen en el modelo 3PG.

Tabla 1. Listado de variables utilizadas para el análisis

Longitud
Latitud
M_TF
M_arena
M_limo
M_arcilla
M_AMF
CO(tn/ha)
M_K_Saxton_RM
M_K_Brak_RM
M_RM_pHagua
M_pHagua
M_RM_pHKCL
M_pHKCL
M_Cond_e
M_RM_Cond_e
M_Ca
M_RM_Ca

M_Mg
M_RM_Mg
M_Na
M_RM_Na
M_K
M_RM_K
M_CIC
M_RM_CIC
M_V
M_RM_V
Itex_In_Pf
tipo_Itex_In
M_RM_Dg
M_RM_SIGMAg
M_RM_DensAp
ProfUtil
CRA
CRAMU
CRADU

3.

a. Modelos de predicción

Tal y como se muestra en la *Figura 4*, la metodología desarrollada se divide en cuatro etapas:

1. Aplicación del modelo 3PG: Se utiliza el modelo 3PG con variables de entrada de suelo, radiación solar y clima del sitio. El modelo se prueba con diferentes valores de FR a lo largo de una serie de años.
2. Identificación del mejor ajuste de FR: Por aproximación numérica se determina el valor de FR del modelo 3PG que mejor se ajuste a datos reales de biomasa obtenidos de inventarios forestales (IFC), que corresponderá al FR del sitio.
3. Análisis de correlación: Los valores ajustados de FR de todas las parcelas de estudio se tratan de relacionar con parámetros del suelo (textura, materia

orgánica, profundidad, composición química), a la búsqueda de patrones generales que expliquen el comportamiento del FR.

4. Modelos de aprendizaje automático-Machine Learning (ML): Se prueban modelos de ML para realizar regresiones basadas en los parámetros del suelo y el FR como variable objetivo. Además, se evalúa la capacidad predictiva de los modelos mediante un análisis de precisión.

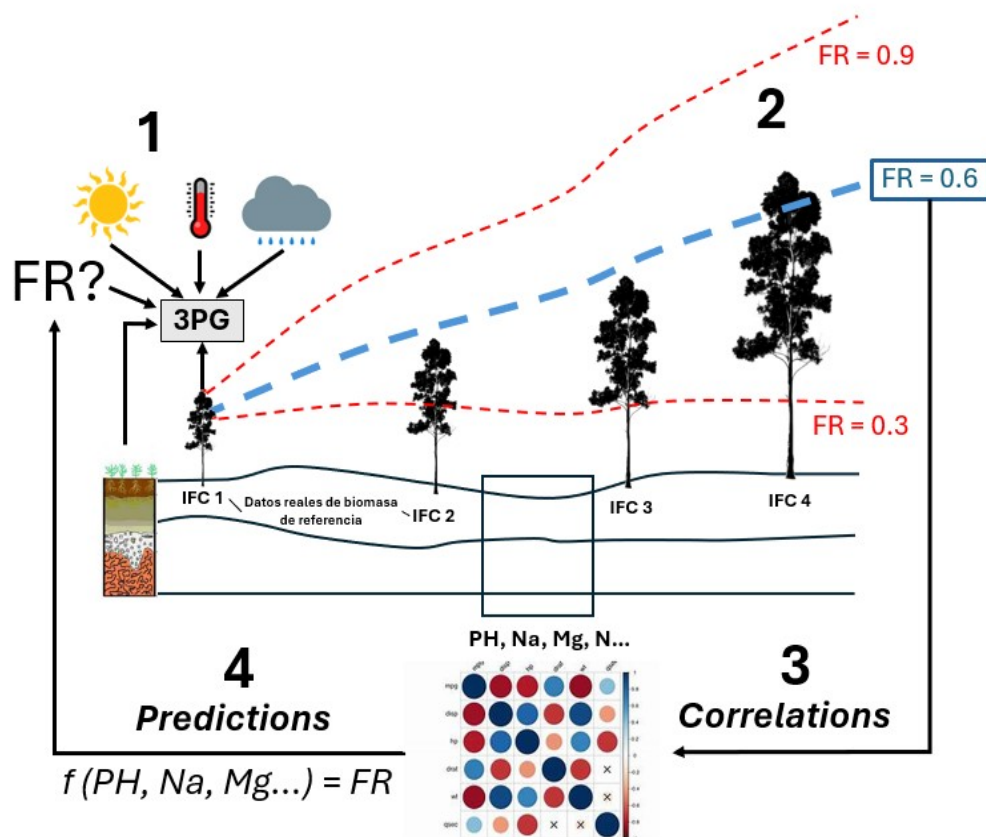


Figura 4. Descripción gráfica de la metodología general empleada para el cálculo (1) y posterior ajuste (2) del fertility rate (FR) del modelo 3PG, y la búsqueda de patrones y correlaciones con variables de sitio medibles (3), con el objetivo de extrapolar el FR a zonas donde no hay datos de inventario (4).

4. Resultados

En la Figura 5 se muestra un ejemplo (para una parcela concreta) del ajuste por aproximación numérica del valor de FR para cada parcela. Se corre el modelo 3PG para diferentes valores de FR (0.1, 0.2, ..., 1), estimando la biomasa producida para una serie temporal alineada con datos de campo del IFC. Luego, simplemente se calcula el error medio cuadrático (RMSD) entre los valores de inventario y los valores del 3PG (puntos rojos en la figura 3), y se selecciona el FR que registra el menor RMSD. Esta operación se repite para cada parcela del conjunto de datos.

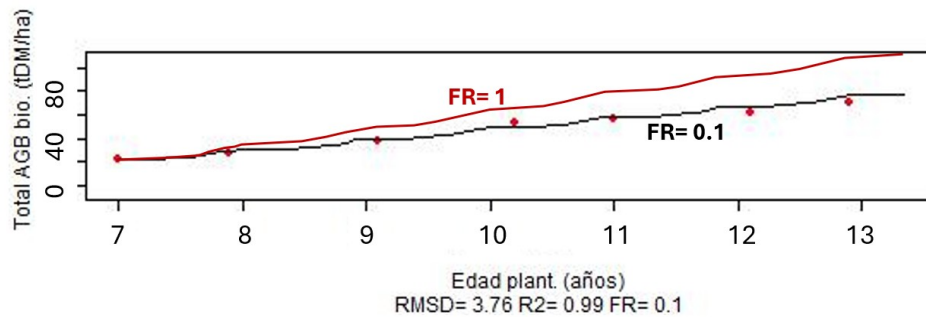


Figura 5. Ejemplo de ajuste del FR para una parcela, donde se detecta que el valor 0,1 es el más adecuado, pues registra el menor error cuadrático medio con respecto a las mediciones de biomasa del Inventario Forestal (puntos rojos).

Una vez calculado el FR que mejor se ajusta, analizamos las correlaciones existentes con los parámetros de suelo de cada sitio. La Figura 6-a muestra las relaciones entre las correlaciones de los valores obtenidos para el parámetro FR (best_fr) en cada una de las 54 parcelas consideradas, y su relación con diferentes parámetros de suelo y sitio descritas en el apartado 3.b. La información de interés en este estudio se centra en la relación entre el parámetro best_fr y los diferentes parámetros del sitio, representada en la Figura 6-b.

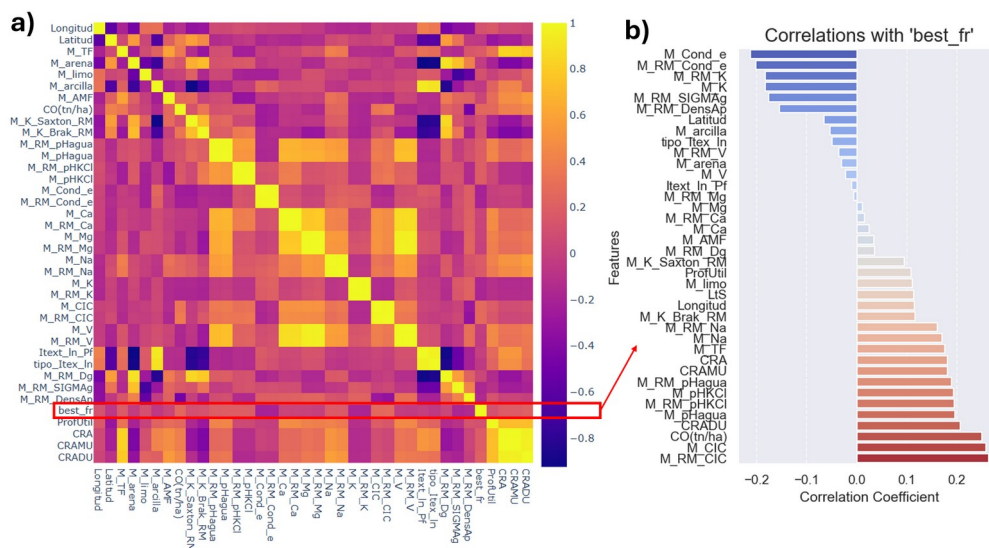


Figura 6. a) Matriz de correlaciones de todas las variables incluidas en la base de datos de las parcelas. b) Detalle de las correlaciones entre las diferentes variables explicativas y el fertility rate ajustado (best_fr).

Se observa que las correlaciones de best_fr con el resto de los parámetros oscilan en un rango de -0.25 a +0.25, lo que indica que son correlaciones relativamente débiles y denotan alta aleatoriedad en los resultados de best_fr. Para analizar más a fondo estas relaciones, en la Figura 7, mostramos en detalle la distribución de los datos y la relación entre estos parámetros para los diferentes valores únicos adoptables por el FR, mediante el análisis de boxplots.

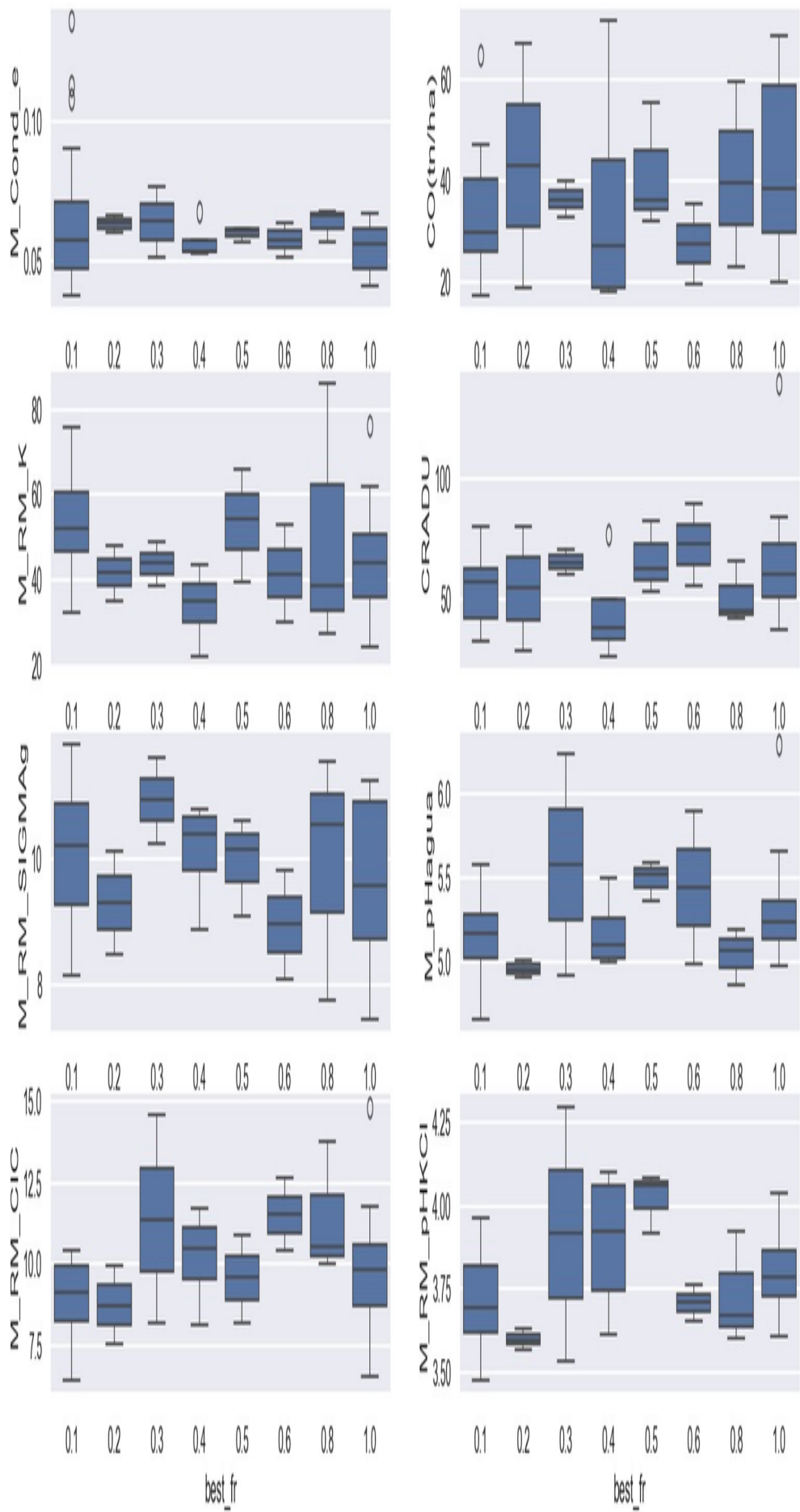




Figura 7. Boxplots que muestran la distribución de las variables de sitio con mayor correlación lineal con best_fr, separadas por los valores adoptados por FR.

En la Figura 7, no se observa una tendencia clara en las relaciones analizadas. Sin embargo, sí se pueden observar tendencias dentro de los parámetros CO y M_RM_CIC con best_fr, consistentes con la expectativa de mayores niveles de fertilidad del sitio al incrementarse estos valores y con los resultados observados en la Figura 6b.

Además, se observa que los valores extremos de best_fr presentan una mayor variabilidad en K y sigma G, lo que podría estar asociado con el menor tamaño muestral de las clases intermedias de best_fr (0.3-0.7).

Finalmente, llevamos a cabo un estudio exploratorio para intentar entender la tendencia espacial del best_fr, así como su relación con las diferentes litologías de la zona. Aunque el tipo de litología no parece ser un factor determinante, ya que dentro de una misma litología el best_fr muestra una gran variabilidad, se observa que las parcelas con best_fr más bajos se concentran en la zona central de la provincia de Huelva, en la región de El Andévalo, en los alrededores de la Faja Pirítica. Por otro lado, los valores más altos, cercanos a 1, se encuentran en la zona norte y sur de la provincia.





Figura 8. Mapa de la zona de estudio, donde se muestran las parcelas de estudio con simbología por tamaño, representando el FR y agrupadas por colores según el tipo de litología.

5. Discusión y conclusiones

En este artículo, desarrollamos una metodología para ajustar el FR del modelo 3PG, un parámetro difícil de estimar, para el crecimiento de masas de eucalipto en la provincia de Huelva. Ajustamos este parámetro para minimizar el error respecto a los datos de inventarios in-situ y analizamos las correlaciones con parámetros de suelo, como litología, composición química y materia orgánica, utilizando los valores obtenidos de 54 parcelas estudiadas.

Los resultados muestran que las correlaciones son débiles, aunque las más altas se registraron con variables relacionadas con la conductividad, contenido de K, CO, pH, CRAD y CIC, siempre con valores absolutos inferiores a 0,25 en el coeficiente de correlación.

Las relaciones con la litología tampoco son claras, aunque existe cierto agrupamiento de parcelas con los FR más bajos en la franja central que recorre de oeste a este la provincia de Huelva (comarca Andévalo) que se correspondería a las condiciones edafo-climáticas más extremas, en general.

Trabajos futuros podrían centrarse en la transformación y combinación de variables ambientales, así como la exploración de valores óptimos de nutrientes para poder ajustar las variables de contenido relativo en nutrientes (RNC). Así mismo, se deberá explorar la distribución de FR en componentes que no sean únicamente edafológicos y la posibilidad de que la relación entre f_N y FR no tenga un carácter lineal (f_{Nn} mayor o menor de 1). También se considera necesario ampliar el número de parcelas de estudio para garantizar una representación más equitativa de cada grupo de valores de FR en términos de número de muestras. Para ello, se prevé extender este estudio a las plantaciones de eucaliptos en la zona norte de España, abarcando Galicia, Asturias y Cantabria.

En el estado de avance del trabajo, el método de obtención de FR solo asegura los resultados para ajustar el modelo 3PG a las parcelas donde se realizan mediciones periódicas, de manera que pueda servir para comparaciones con proyecciones climáticas y evaluar diferentes escenarios. Sin embargo, aún existen claras limitaciones para calcular un mapa de FR de un cierto detalle en zonas donde no hay datos inventariados de referencia.

6. Agradecimientos

ENCE, Energía y Celulosa S.A. ha prestado su apoyo económico y humano para el desarrollo de este trabajo.



Programa de recualificación del profesorado universitario, Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, Ministerio de Universidades, Financiado por la Unión Europea-Next Generation EU.

7. Bibliografía

- ALMEIDA, A.C., SIGGINS, A., BATISTA, T.R., BEADLE, C., FONSECA, S., LOOS, R., 2010. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. *For. Ecol. Manage.* 259, 1730–1740. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.008>
- BRAKENSIEK, D.L., RAWLS, W.J., STEPHENSON, G.R., 1984. Modifying scs hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- BRAÑAS, J., GONZÁLEZ-RÍO, F., MERINO, A., 2015. Contenido y distribución de nutrientes en plantaciones de Eucalyptus globulus del noroeste de la Península Ibérica. *Invest. Agrar. Sist. Recur. For.* 24, 316–335.
- CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS, E., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G., BASURCO, F., CANUTO AMARAL, G., DIÉGUEZ-ARANDA, U., PÉREZ-CRUZADO, C., RAPP-ARRARÁS, Í., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., RUÍZ-FERNÁNDEZ, F., VALLEJO-ORTI, M., DOMINGO-SANTOS, J.M., 2024. Adaptación de la selvicultura de Eucalyptus sp. en el norte y el suroeste españoles : Estimación de parámetros relativos a la irradiación solar. *Cuad. la Soc. Española Ciencias For.* 50, 233–256.
- DIÉGUEZ-ARANDA, U., ROJO-ALBORECA, A., CASTEDO-DORADO, F., GONZÁLEZ, J., ANTA, M., CRECENTE-CAMPO, F., GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, J.M., PÉREZ-CRUZADO, C., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., LÓPEZ-SÁNCHEZ, C., BALBOA-MURIAS, M., VARELA, J., SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F., GÓMEZ-GARCÍA, E., 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia, Lugo.
- DOMINGO-SANTOS, J.M., 2010. El eucalipto y los suelos bajo clima mediterráneo. *Bol. CIDEU* 8-9, 15–30.
- DOMINGO-SANTOS, J.M., CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS, E., 2025. Suelos forestales de la provincia de Huelva: propiedades, evolución y distribución territorial. Universidad de Huelva, Huelva.
- FONTES, L., LANDSBERG, J., TOMÉ, J., TOMÉ, M., PACHECO, C.A., SOARES, P., ARAUJO, C., 2006. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. *Can. J. For. Res.* 36, 3209–3221. <https://doi.org/10.1139/x06-186>
- GONZÁLEZ-GARCÍA, M., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., 2015. Modelización de la producción de biomasa de Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden en Galicia (noroeste de España). *For. Syst.* 24(2), 113–125.
- HAKAMADA, R., PRADOS CORONADO, J., LAGES MARINHO FALCÃO, C.J., CARRERO, O., SULBARÁN RANGEL, B.C., 2024. Modelo 3PG para estimar la productividad, almacenamiento de Carbono e Índice de Aridez en plantaciones forestales de Eucalyptus L'Hér. en México. *Rev. Mex. Ciencias For.* 16, 127–152. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i87.1474>
- IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2023. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- LANDSBERG, J.J., WARING, R.H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and



- partitioning. *For. Ecol. Manage.* 95, 209–228.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1)
- PAUL, K., BOOTH, T., JOVANOVIĆ, T., SANDS, P.J., MORRIS, J., 2007. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. *For. Ecol. Manage.* 243, 237–247.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.029>
- PÉREZ-CRUZADO, C., MUÑOZ-SÁEZ, F., BASURCO, F., RIESCO, G., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., 2011. Combining empirical models and the process-based model 3-PG to predict *Eucalyptus nitens* plantations growth in Spain. *For. Ecol. Manage.* 262, 1067–1077.
- PÉREZ-CRUZADO, C., MUÑOZ-SÁEZ, F., BASURCO GARCÍA-CASAL, F., RIESCO MUÑOZ, G., ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, E., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., 2012. Estrategias de parametrización del modelo ecofisiológico 3-PG. Una aplicación a plantaciones de *Eucalyptus nitens*. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 201–206.
- SANDS, P.J., LANDSBERG, J.J., 2002. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *For. Ecol. Manage.* 163, 273–292.
- SAXTON, K.E., RAWLS, W.J., ROMBERGER, J.S., PAPENDICK, R.I., 1986. Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1031–1036. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x>
- VEGA-NIEVA, D.J., TOMÉ, M., TOMÉ, J., FONTES, L., SOARES, P., ORTIZ, L., BASURCO, F., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., 2013. Developing a general method for the estimation of the fertility rating parameter of the 3-PG model: application in *Eucalyptus globulus* plantations in northwestern Spain. *Can. J. For. Res.* 43, 627–636. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0491>