



9CFE-1999

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



Desarrollo de un modelo NIR-PLSR para estimar la porosidad del corcho de *Quercus suber* L.

ALVES, A. (1), SANTOS, D. (1), AMARAL PAULO, J. (1), GRAÇA, J. (1) Y RODRIGUES, J. (1)

(1) Centro de Estudos Florestais, Laboratório Associado TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Resumen

El alcornoque (*Quercus suber* L.) produce a lo largo de su vida, corcho, un producto no maderable, renovable y ecológico. El uso principal del corcho es la fabricación de tapas de botellas de vino. Comercialmente, el corcho se clasifica en diferentes calidades basadas en la inspección visual de las planchas. Un factor crucial que afecta a la calidad visual del corcho es su porosidad.

Este estudio tuvo como propósito desarrollar un modelo mediante espectroscopía de infrarrojo cercano y de regresión por mínimos cuadrados parciales (NIR - PLSR) para predecir la porosidad en 90 muestras de corcho procedentes de los Municipios de Barrancos y Coruche en Portugal.

El modelo de calibración se elaboró a partir de 90 muestras de corcho. Los resultados del modelo para predecir el valor de porosidad mostraron un coeficiente de determinación del 72% y un error cuadrático medio de validación cruzada de 0.022. Como principal conclusión, los resultados demuestran que los modelos de calibración NIR son eficaces para evaluar la porosidad del corcho. Esto sugiere que la NIR tiene el potencial de convertirse en un método fiable para determinar el coeficiente de porosidad en planchas de corcho, lo que la convierte en una herramienta muy valiosa para los procesos de selección de árboles y evaluación de la calidad del corcho por el valor de porosidad.

Palabras clave

Alcornoque, calibración, validación cruzada, espectroscopía de infrarrojo cercano.

1. Introducción

El corcho, derivado del alcornoque (*Quercus suber* L.), es un producto forestal vital originario de las regiones mediterráneas occidentales. Tiene un importante valor económico como rendimiento primario de los alcornocales. La recolección consiste en la extracción periódica de la corteza exterior del árbol, o peridermis, de una manera sostenible que se mantiene durante toda la vida del árbol (Pereira y Tomé, 2004; Pereira 2015).



A lo largo de su vida, el alcornoque genera tres tipos diferentes de tejido corchoso: (i) corcho virgen, (ii) corcho secundario y (iii) corcho maduro o de reproducción. El corcho maduro se desarrolla tras sucesivos procesos de descortezado, con una duración del ciclo de crecimiento regulada por directrices nacionales (Natividade, 1950; Pereira, 2007).

Tras el descortezamiento inicial de un alcornoque “corcho bornizo”, la capa de corcho posterior presenta características similares al corcho de reproducción (Graça y Pereira, 2004). El corcho se clasifica en siete categorías de calidad en función de factores como el grosor, la uniformidad, la porosidad general y la presencia de defectos como galerías de insectos o inclusiones leñosas (Graça y Pereira, 2004; Pereira, 2007). Entre estos factores, la porosidad es la que más influye en la calidad visual (Fortes *et al.*, 2004), que en última instancia determina si el corcho puede utilizarse para fabricar tapas de botellas de vino (Prades *et al.*, 2010).

La evaluación de la porosidad se realiza mediante el coeficiente de porosidad a través de técnicas de análisis de imagen, tal y como describen Pereira *et al.* (1996), y puede presentar variaciones significativas entre las diferentes regiones de una misma plancha de corcho (Gonzalez-Adrados *et al.*, 2000; Pereira *et al.*, 1996). Este proceso es minucioso y requiere un tiempo considerable. Entre los métodos disponibles, la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) destaca como un enfoque fiable, rápido y no invasivo capaz de analizar simultáneamente múltiples variables. La aplicación inicial de la tecnología NIR al corcho fue realizada por Prades *et al.* (2010) para explorar su potencial en la evaluación de la calidad visual, la porosidad y el contenido de humedad de las planchas de corcho. Posteriormente, Prades *et al.* (2012) demostraron la capacidad de la tecnología NIR para identificar el origen geográfico de las planchas y los tapones de corcho.

Se ha demostrado la eficacia de la NIR para garantizar un control de calidad continuo del contenido de humedad durante la producción de tapones de corcho. Además, se ha utilizado para determinar ciertos componentes químicos, como los extractivos, junto con diversas propiedades físicas y mecánicas, incluida la densidad (Prades *et al.*, 2014). Posteriormente, Sánchez-González *et al.* (2016) desarrollaron modelos para estimar el coeficiente de porosidad en muestras crudas y cocidas, con un coeficiente de determinación de 0,58 y 0,59, respectivamente.

2. Objetivos

Este trabajo se propone establecer una metodología para estimar la porosidad en planchas de corcho mediante técnicas no destructivas y económicas, en concreto, la tecnología NIR. El análisis de imagen se emplea como método de referencia para desarrollar modelos de calibración NIR para la porosidad.

3. Metodología

Los árboles analizados en este estudio procedían de dos alcornocales en Portugal, Barrancos y Coruche. De estos árboles se obtuvieron 90 tiras de corcho



para el análisis: 28 de corcho virgen, 45 de corcho secundario y 17 de corcho maduro.

La porosidad del corcho se determinó en las secciones transversales y radiales lijadas de cada muestra de corcho crudo virgen, secundario y maduro. Se calculó el coeficiente de porosidad del corcho para cada muestra, considerando el efecto de las galerías de insectos, que es la relación entre el área total de poros (mm^2) y la superficie total del corcho (mm^2) (Paulo y Santos, 2023).

Los espectros se recogieron en un Bruker MPA en la gama de números de onda de 12.500 a 4000 cm^{-1} con una resolución espectral de 16 cm^{-1} y 64 barridos por espectro. La ventana de medición de la esfera integradora es un círculo de 20 mm, aproximadamente del mismo tamaño que las tiras de corcho, y la muestra se colocó encima de la esfera integradora. Los espectros NIR del perfil completo de la muestra de corcho se obtuvieron moviendo manualmente la tira de corcho en incrementos de 20 mm en las direcciones radial y transversal, con un número de espectros por tira de corcho que osciló entre 10 y 30. Tras obtener los espectros en ambas direcciones, se promediaron para obtener un espectro por cada tira de corcho.

El modelo PLSR se desarrolló utilizando el software OPUS Quant 2 (versión 7.0, Bruker Optics, Alemania). Se empleó un proceso de validación cruzada (CV), mediante el enfoque de dejar uno fuera, para detectar datos desviados, pero no se identificaron valores atípicos. El modelo abarcó 90 muestras de corcho clasificadas como vírgenes (28), secundarias (45) y maduras (17). El rango espectral fue de 10.000 a 4000 cm^{-1} y el método de preprocesamiento fue la primera derivada y la normalización vectorial (1.^a Der VN).

4. Resultados

La media del coeficiente de porosidad (CP) del corcho con galerías de insectos fue de 0,123 entre las 90 tiras de corcho, con valores que oscilaron entre 0,034 y 0,286. La figura 1 presenta los estadísticos del modelo PLSR para la predicción del coeficiente de porosidad (CP) en muestras de corcho. Los modelos se realizaron con 90 muestras de corcho y se obtuvo un modelo con buenos estadísticos para la combinación de los rangos espectrales 9500-7500 y 6100-5450 cm^{-1} , con el preprocesamiento 1^aDer VN.

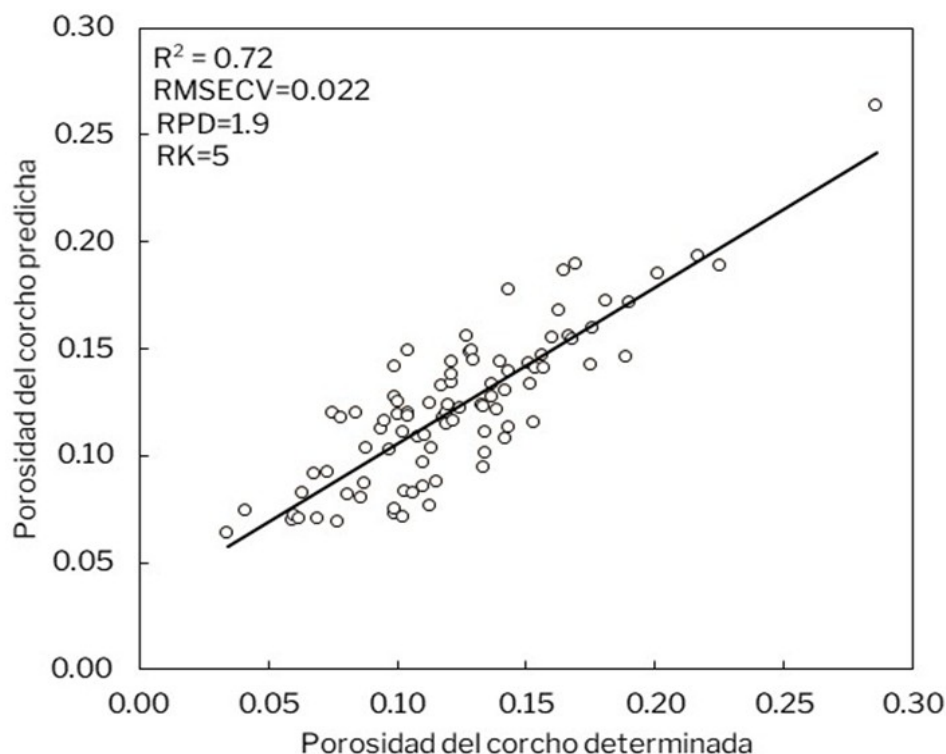


Figura 1. Resultados de la validación cruzada de la porosidad del corcho determinada contra la porosidad del corcho predicha.

El modelo de la validación cruzada para el CP con galerías de insectos, alcanzó un coeficiente de determinación (R^2) relativamente alto, de 0,72, lo que indica una buena precisión predictiva para el CP. El error cuadrático medio de validación cruzada (RMSECV) fue de 0,022, lo que refleja un error bajo, y la desviación residual de predicción (RPD) fue de 1,9, lo que demuestra una gran fiabilidad para las predicciones cuantitativas. El modelo tenía cinco variables latentes (rank -RK) y no se detectaron valores atípicos, lo que indica solidez.

5. Discusión

El coeficiente medio de porosidad del corcho obtenido utilizando el método de referencia (0,123) se alinea estrechamente con los valores comunicados por otros autores en cuanto a corcho virgen y secundario, que fueron de 0,115 y 0,114, respectivamente, en ausencia de galerías de insectos (Paulo y Santos, 2023). Sánchez-González *et al.* (2016) reportaron un rango más amplio de valores, de 0,027 a 0,365, con una media de 0,161, y también desarrollaron modelos predictivos con un valor de desviación residual de predicción (RPD) superior a 1,5. Los resultados más precisos se obtuvieron para los modelos de predicción de la porosidad del corcho crudo o hervido, basados en espectros obtenidos a partir de los mismos tipos de muestras, que arrojaron un valor de R^2 de 0,58 y 0,59, respectivamente. Del mismo modo, Prades *et al.* (2010) desarrollaron modelos de calibración cuantitativa con un coeficiente de determinación de validación cruzada de 0,69 para la porosidad en la sección transversal, con un nivel de precisión similar al de los resultados obtenidos mediante el método de referencia.



Gómez-Sánchez *et al.* (2013) concluirán que las calibraciones del coeficiente de porosidad obtenidas proporcionan resultados satisfactorios, teniendo en cuenta que los errores típicos de validación cruzada (ETVC) y el coeficiente de variación (CV) son similares a los del método de referencia, excepto para tapones, donde el error típico de laboratorio (ETL) es bastante inferior al ETVC. La validación externa corrobora estos resultados.

Los modelos presentados aquí demuestran un ligero aumento en el rendimiento predictivo en condiciones similares, lo que ofrece un enfoque más preciso para predecir la porosidad del corcho.

6. Conclusiones

En conclusión, los resultados demuestran que los modelos de calibración NIR son eficaces para evaluar la porosidad del corcho. Esto sugiere que la NIR tiene el potencial de convertirse en un método fiable para determinar el coeficiente de porosidad en planchas de corcho, lo que la convierte en una herramienta muy valiosa para los procesos de selección de árboles y evaluación de la calidad.

7. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P, a través del Centro de Estudos Florestais [UIDB/00239]. El primer autor contó con el financiamiento de la Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P, a través del contrato: DOI 10.54499/DL57/2016/CP1382/CT0005. Los autores agradecen a Ana Cuartas, del CEF, su ayuda en las correcciones lingüísticas.

8. Bibliografía

FORTES, M.A.; ROSA, M.E.; and PEREIRA, H.; 2004. *A Cortiça*. IST Press, Lisboa.

GÓMEZ-SÁNCHEZ, I.; DE CECA, J. L. G.; GARCÍA-OLMO, J.; LARA-BUIL, L.; LÓPEZ-LUQUE, R.; and PRADES, C.; 2013. Application of Image Analysis and Nirs Technology to the Evaluation of the Porosity of Planks, Sheets and Cork Stoppers, and Its Relation with the Industrial Quality. *Maderas-Ciencia Y Tecnologia* 15, no. 3: 293-309. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2013005000023>.

GONZALEZ-ADRADOS, J. R.; LOPES, F.; and PEREIRA, H.; 2000. Quality Grading of Cork Planks with Classification Models Based on Defect Characterisation. *Holz Als Roh-Und Werkstoff* 58, no. 1-2: 39-45. <https://doi.org/10.1007/s001070050383>.

GRAÇA, J.; and PEREIRA, H.; 2004. The Periderm Development in *Quercus Suber*. *Iawa Journal* 25, no. 3: 325-35. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000369>.

NATIVIDADE, J. V.; 1950. *Subericultura*. Lisboa: Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas.



PAULO, J. A.; and SANTOS, D. I.; 2023. Virgin Cork Colour and Porosity as Predictors for Secondary Cork Industrial Quality. *Industrial Crops and Products* 205 117513. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117513>.

PEREIRA, H.; 2015. The Rationale Behind Cork Properties: A Review of Structure and Chemistry. *Bioresources* 10, no. 3: 6207-29.

PEREIRA, H.; LOPES, F.; and GRACA, J.; 1996. The Evaluation of the Quality of Cork Planks by Image Analysis. *Holzforschung* 50, no. 2: 111-15. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.2.111>.

PEREIRA, H.; 2007. *Cork: Biology Production and Uses*. Edited by Editor(s): Helena Pereira. Elsevier Science B.V. doi:10.1016/b978-044452967-1/50003-0.

PEREIRA, HMN; and TOMÉ, M.; 2004. Non-Wood Products: Cork Oak. In *Encyclopedia of Forest Sciences*, 613–20. Elsevier, Oxford: In: Burley J., Evans J., and Youngquist J.A. (Eds.).

PRADES, C.; GARCÍA-OLMO, J.; ROMERO-PRIETO, T.; DE CECA, J. L. G.; and LÓPEZ-LUQUE, R.; 2010. Methodology for Cork Plank Characterization (*Quercus Suber* L.) by near-Infrared Spectroscopy and Image Analysis. *Measurement Science and Technology* 21, no. 6: 065602. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/6/065602>.

PRADES, C.; GÓMEZ-SÁNCHEZ, I.; GARCÍA-OLMO, J.; and GONZÁLEZ-ADRADOS, J. R.; 2012. Discriminant Analysis of Geographical Origin of Cork Planks and Stoppers by near Infrared Spectroscopy. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 32, no. 1: 54-70. <https://doi.org/10.1080/02773813.2011.599697>.

PRADES, C.; GÓMEZ-SÁNCHEZ, I.; GARCÍA-OLMO, J.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, F.; and GONZÁLEZ-ADRADOS, J. R.; 2014. Application of Vis/Nir Spectroscopy for Estimating Chemical, Physical and Mechanical Properties of Cork Stoppers. *Wood Science and Technology* 48, no. 4: 811-30. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0642-3>.

SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M.; GARCÍA-OLMO, J.; and PRADES, C.; 2016. Correlation between Porosity of Cork Planks before and after Boiling Using near Infrared Spectroscopy. *European Journal of Wood and Wood Products* 74, no. 4: 509-17. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1014-5>.