

ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DEL SUELO BASADA EN ESPECTROSCOPIA EN VIÑEDO EN GALICIA (ESPAÑA)

M. Rodríguez-Fernández^{1*}, J. Dafonte¹, M. Fandiño¹, J.R. Rodríguez-Pérez², M. García-Fernández² y J.J. Cancela¹

¹PROEPLA Research Group, Universidade de Santiago de Compostela, Escola Politécnica Superior de Enxeñaría. Rúa Benigno Ledo s/n 27002-Lugo, marta.rodriguez.fernandez0@rai.usc.es

²GEOINCA Research Group, Universidad de León. Avenida de Astorga, s/n. 24401. Ponferrada-León. jr.rodriguez@unileon.es

RESUMEN. Se han caracterizado los suelos de tres viñedos enmarcados en la zona vitivinícola de Rías Baixas (Galicia), situados en las provincias de Pontevedra y A Coruña, mediante análisis físico-químicos de 96 muestras tomadas en campo con muestreo sistemático. Además, estas muestras de suelo fueron analizadas en laboratorio para determinar los parámetros clásicos del suelo y caracterizadas espectralmente mediante un espectrorradiómetro de campo (ASD FS4; 350-2500 nm), con fibra óptica y sonda de contacto como metodología comparativa de las muestras. Con objeto de estimar las variables edáficas, se establecieron ecuaciones de ajuste mediante regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) y Random Forest (RF), usando como variables predictoras las reflectancias. Los mejores resultados se han obtenido en las estimaciones del contenido en carbono, nitrógeno y materia orgánica.

ABSTRACT. Soils of three vineyards belonging to the Rías Baixas wine-growing area (Galicia), located in Pontevedra and A Coruña provinces, were characterized by physico-chemical analysis of 96 samples, collected in the field through systematic sampling. In addition, these soil samples were analysed in the laboratory to determine basic soil parameters and spectral data, using a field spectroradiometer (ASD FS4; 350-2500 nm), with optical fiber and contact probe, in order to compare the samples. Models were fit to the measured soil parameters by means of partial least squares regression (PLSR) and Random Forest (RF), using reflectances as predictor variables. The best results have been obtained for the estimation of carbon, nitrogen, and organic matter.

1.- Introducción

El suelo del viñedo es un medio heterogéneo, que condiciona aspectos muy importantes a los viticultores, como puede ser el desarrollo vegetativo de la planta o sus necesidades nutritivas, que influyen directamente a la producción y calidad de la uva.

Una viticultura moderna y sostenible requiere de una monitorización objetiva y continua del viñedo que permita una toma racional de decisiones, así como una aplicación de viticultura de precisión. Esta técnica sólo es posible

aplicando nuevas tecnologías sobre el viñedo (Monteserín, 2017).

La espectroscopía de reflectancia podría ser una alternativa a los métodos de laboratorio estándar, que permiten la definición de la composición del suelo del viñedo, como una metodología que abarata los costes del proceso mediante un sistema más rápido y cómodo para el viticultor. La aplicación de la espectroscopía en campo permite una gran flexibilidad para su aplicación en la agricultura, de la que resulta un gran conjunto de datos que permiten estimar diversas variables a partir de la reflectancia (cantidad de radiación reflejada respecto a la radiación incidente) a diferentes longitudes de onda, dando a lugar a una metodología analítica no destructiva, reproducible y precisa para la estimación cuantitativa de variables de suelo (Lima y Santos, 2020).

El método se basa en el supuesto simplificado de que la reflectancia del suelo es una combinación lineal de las firmas espectrales de sus componentes, ponderados por su abundancia y, por tanto, los cambios en las propiedades químicas, físicas y mineralógicas del suelo, que producen características espectrales distintas detectables mediante espectroscopía de reflectancia (Valenciaga y Saliba, 2006).

Las mediciones en espectroscopía requieren sólo unos segundos para medir una muestra de suelo, pero los espectros de reflectancia son, en gran parte, inespecíficos, debido a la interferencia de los espectros superpuestos de los componentes del suelo, que son variados e interrelacionados (Conforti *et al.*, 2015).

En consecuencia, la información relevante debe extraerse matemáticamente de los espectros y correlacionarse con las propiedades del suelo determinadas mediante métodos tradicionales (Du y Zhou, 2009). Generalmente, para su estudio se emplean técnicas quimiométricas y calibraciones multivariadas, como regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) o metodologías de random forest (RF).

Se trata de un campo abierto en el que se ha de determinar una metodología y procesamiento de datos que permitan una comparación de los datos obtenidos mediante técnicas de espectroscopía y analíticas clásicas de laboratorio, que afiancen las predicciones y estimaciones de estos datos para la consolidación de esta metodología como estrategia rutinaria dentro de la agricultura de precisión.

2.- Material y métodos

2.1. Área de estudio

Los viñedos a estudio se encuentran enmarcados bajo la zona vitivinícola de Rías Baixas, situados en las provincias de Pontevedra (viñedo Lobeira) y A Coruña (viñedos Monteveiga y Ribadulla), en Galicia (Fig. 1).

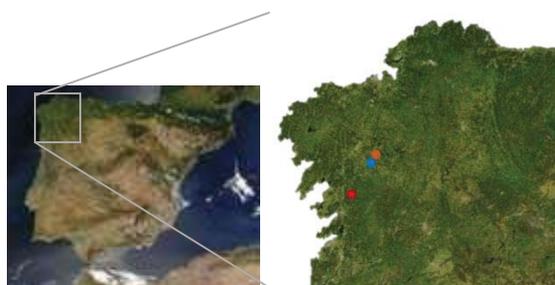


Fig. 1. Localización de los viñedos: (rojo): Lobeira, (azul): Monteveiga y (naranja): Ribadulla.

Los tres viñedos presentan una geología distinta entre ellos, predominando en la parcela Lobeira suelos de granito y granodiorita biotítica, propios de la subzona vitivinícola Val do Salnés; por otro lado, Monteveiga y Ribadulla, en la subzona de Ribeira do Ulla, se caracterizan por suelos precámbricos-devonicos. Monteveiga está caracterizado por la presencia de esquistos verdes, anfibólicos y localmente con rocas más ácidas, mientras que Ribadulla se caracteriza por rocas de definición albitica y paragneises, según la cartografía geológica GEODE.

Los tres viñedos fueron plantados en el año 2004 con la variedad ‘Albariño’, que es autóctona de la zona. El sistema de conducción es en espaldera, con las viñas podadas con el sistema pulgar-vara. La separación es de 2,5 m entre plantas y de 3 m entre filas. El portainjerto empleado es el 110 Richter y, dispone de riego por goteo en toda la superficie cultivada.

2.2. Muestreo de suelo

En cada viñedo, en el mes de junio de 2020, se tomaron muestras de suelo del horizonte superficial (0-40 cm de profundidad) para su análisis físico-químico, siguiendo una cuadrícula de 30 x 30 m con 32 puntos de muestreo para cada una de las parcelas, con un total de 96 muestras de suelo (Fig. 2).

Las muestras se secaron en una estufa a 60°C y se tamizaron a 2mm. Usando los protocolos comunes (Carter y Gregorich, 2008), fueron analizadas para el estudio de concentraciones de Carbono y Nitrógeno (Skjemstad y Taylor, 1999).

También se realizó la caracterización de la

conductividad eléctrica aparente (EC_a), realizada el 10 de junio de 2020, en las parcelas Monteveiga y Ribadulla, y el 12 de junio de 2020 en Lobeira, mediante el equipo EM-38DD. Se obtuvieron medidas tanto del dipolo vertical como horizontal (EC_{a-V} y EC_{a-H}). Las especificaciones del equipo, se pueden encontrar de forma detallada en el trabajo de Corwin y Lesch, 2005. En cada muestreo, el equipo (EM-38DD), se transportó de forma manual en toda la extensión de cada viñedo, georreferenciando las medidas tomadas mediante un GPS-RTK.



Fig. 2. Puntos de muestreo en: (1): Lobeira, (2): Monteveiga y (3): Ribadulla.

2.3. Captura de datos. Espectrorradiómetro

Para la captura de las firmas espectrales se empleó el espectrorradiómetro portátil de campo ASD FieldSpec® 4 Standard-Res (NIR Solutions, USA). Este equipo captura valores de radiancia o reflectancia en el rango de longitudes de onda desde 350 hasta 2500nm, con una resolución espectral de 10 nm, capturando los datos de radiación a través de una fibra óptica multihaz.

Los datos de reflectancia se capturaron de dos maneras: la primera, utilizando la fibra óptica desnuda acoplada al dispositivo pistol grip (la fuente de iluminación fueron dos lámparas exteriores); y posteriormente, empleando una sonda (fuente de iluminación interna) diseñada para mediciones de contacto de materias primas sólidas como minerales, granos y otros materiales granulares, con una fuente de iluminación acoplada en la propia sonda de contacto, que facilita las mediciones de las muestras y la colocación del equipo de medida (Fig. 3).



Fig. 3. De izquierda a derecha, medición de las muestras con pistol grip (fibra óptica) y sonda de contacto.

La metodología seguida para la toma de medidas fue la misma en los dos procesos, siguiendo en ambos casos el protocolo recomendado por el fabricante del equipo. Las 96 muestras de suelo fueron colocadas sobre recipientes plásticos de color negro, con objeto de reducir al mínimo los reflejos de la fuente de iluminación (Fig. 4). Para gestionar el proceso de captura de datos se utilizó el software RMS3TM versión 6.3.0 (Boulder, Colorado).

Para la captura de datos se siguió el siguiente protocolo, recomendado por el fabricante del equipo:

- ✓ optimización del sistema
- ✓ proceso de calibración de los sensores mediante la lectura sobre el panel blanco (Labsphere Spectralon®, Labsphere-China)
- ✓ captura de la signature espectral de cada muestra de suelo. Mediante el proceso de calibración, el equipo pasa de medir valores de radiancia (niveles digitales) a reflectancia (relación entre la energía reflejada respecto a la energía incidente).

En cada muestra de suelo se tomaron tres valores de reflectancia de manera sistemática, en tres posiciones diferentes, con objeto de conseguir signatures espectrales representativas de cada muestra y obtener un valor medio de las tres mediciones para la creación de la base de datos.



Fig. 4. Muestras de suelo y equipo empleado para la medición.

2.4. Procesado y ajuste de datos

Para el procesado y ajuste de los datos, como variables predictoras se utilizaron los valores de reflectancia en todo el rango de longitudes de onda (con fibra óptica desnuda y con sonda de contacto) y las variables predichas fueron las concentraciones de Carbono y Nitrógeno analizadas en el laboratorio.

La base de datos, fue modelada mediante técnicas de PLSR y RF. La regresión PLSR, se trata de una técnica de modelado para análisis quimiométricos, muy empleada para el análisis cuantitativo de datos espectrales (McBratney et al., 2006). El algoritmo que emplea la regresión selecciona factores ortogonales sucesivos que maximizan la covarianza entre datos predictores (en este caso, los datos capturados con el espectrorradiómetro) y variables respuesta (datos de laboratorio).

Las técnicas empleadas de RF, son un modelo de análisis de datos no paramétrico, basado en la construcción de numerosos árboles de regresión (Breiman, 2001). El resultado total de los árboles individuales se analiza para construir una predicción de los datos. Los parámetros del modelo final se seleccionan promediando el valor del parámetro en todos los modelos calculados (Goydaragh et al., 2019). Además, RF es capaz de clasificar las variables según su importancia relativa para la predicción, basándose en el error de predicción de la regresión (Houborg y McGabe, 2018).

Las regresiones PLSR, se han establecido utilizando dos conjuntos de datos (capturados con fibra óptica y sonda de contacto), la estimación de los modelos de ajuste se ha realizado mediante el procesado de validación cruzada que permite entrenar tantos modelos como número de muestras (*full cross validation* o *Leave One Out*) con el empleo del software Unscrambler® X11. El método de validación cruzada (CV) suele emplearse para poblaciones pequeñas, generalmente hasta 150 muestras (Williams y Dardenne, 2017).

Los datos se han distribuido de forma equitativa en las tres parcelas a estudio, siguiendo la misma metodología empleada por autores como Naes et al., 2002 y Cozzolino et al., 2013.

En este estudio, el modelo de RF se calculó utilizando el paquete R “RadomForest”. Primeramente, se ha aplicado el método de RF a los datos de reflectancia y posteriormente, en un segundo enfoque, se ha aplicado el método de componentes principales (PC-RF), usando cuatro componentes principales y sobre estos se empleó el método de RF.

3.- Resultados y discusión

3.1. Captura de datos: fibra óptica vs sonda de contacto (PLSR)

Los resultados obtenidos a partir de la regresión PLSR, aplicada para el análisis del Nitrógeno y Carbono, en ambas metodologías de medición (fibra óptica y sonda de contacto), ha permitido determinar los mejores modelos de predicción de parámetros del suelo del viñedo.

Se ha identificado como mejor modelo, para cada variable, aquel que tiene un coeficiente de determinación aceptable (superior a 0,50 y menores errores en la validación).

En la Tabla 1, puede observarse como en las variables en las que se han determinado los mejores coeficientes de correlación con coeficientes de correlación y errores de validación muy similares entre sí, mostrando unos valores ligeramente superiores cuando los datos se han capturado con la sonda de contacto.

Tabla 1. Correlación (R^2) y error de validación (RMSE) de los datos capturados con la fibra óptica (pistol grip) y sonda de contacto (probe)

Método	Parámetro	R^2	RMSE
Sonda cont.	N	0,52	0,039
Sonda cont.	C	0,61	0,723
Fibra opt.	N	0,51	0,588
Fibra opt.	C	0,57	0,579

*C: carbono, N: nitrógeno

Las técnicas de medición empleadas con el espectrorradiómetro de campo ASD FieldSpec® 4 Standard-Res, con la fibra óptica y la sonda de contacto con la que se han realizado las medidas, han presentado buenos resultados para las propiedades de suelos, de igual forma que Rosero-Vlasova et al. (2016), que han aplicado ambas metodologías de captura de datos para evaluación de suelos tras incendios forestales.

Los resultados obtenidos en el presente estudio para los parámetros de Nitrógeno y Carbono, han sido similares a los obtenidos por Báscones et al. (2020) para estimar los minerales en el suelo, así como para determinar el contenido de agua en la vegetación del viñedo en el caso de González-Fernández et al. (2015), que obtuvieron valores de $R^2 = 0,60$ para la variedad tempranillo.

A partir de los resultados que se muestran en la tabla 1, se continuó el análisis de los datos solamente con la medida con la sonda de contacto debido a los valores ligeramente superiores respecto a la fibra óptica.

3.2. – Regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) vs. random forest (RF)

Los resultados obtenidos en RF, con las dos metodologías comentadas anteriormente (RF: random forest, y PC-RF: aplicando RF en los cuatro primeros componentes principales), han mostrado valores muy próximos entre sí, si bien los resultados obtenidos son ligeramente mejores cuando se aplica RF al conjunto de datos sin descomponer previamente los datos en sus componentes principales (Tabla 2).

Tabla 2. Correlaciones y errores de la validación para los datos procesados con RF

Parámetro	RF		PC-RF	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
N	0,69	0,038	0,62	0,042
C	0,72	0,629	0,70	0,653

*C: carbono, N: nitrógeno

El empleo del RF para el procesado de los datos y realización de un modelo de ajuste de estos, en base a la predicción de datos como contenido de potasio en el suelo, o la caracterización de distintas zonas de manejo agrícola, han sido líneas de trabajo estudiadas por diversos autores mediante técnicas de espectroscopia (Goydaragh et al., 2019).

La comparación de los resultados obtenidos por la predicción de los datos con PLSR y RF muestra como las correlaciones y errores de validación entre ambos métodos son muy similares en los parámetros de suelo analizados. No obstante, los resultados obtenidos con RF mejoran ligeramente las correlaciones, obteniendo valores de 0,72 y 0,69 para el Carbono y Nitrógeno respectivamente.

De igual forma, los valores de error obtenidos en la validación son más bajos cuando son procesados con RF (Tabla 3).

Tabla 3. Correlaciones y errores de validación para los datos procesados con PLSR vs RF

Parámetro	PLSR		RF	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
N	0,52	0,045	0,69	0,038
C	0,61	0,751	0,72	0,629

*C: carbono, N: nitrógeno

En las técnicas de espectroscopia analizadas, se suele trabajar con el total del rango de longitud de onda medido, tal y como se ha hecho en el presente trabajo, o bien se pueden realizar subconjuntos de datos en los distintos rangos de onda del espectro (Chang et al., 2001) (VIS: infrarrojo visible, NIR: infrarrojo cercano y SWIR: infrarrojo de onda corta), que permiten determinar la longitud de onda adecuada para las firmas espectrales de los parámetros a determinar, permitiendo reducir el conjunto de datos, así como facilitando el procesado de los mismos disminuyendo el tiempo y coste del análisis.

4.- Conclusiones

Los modelos ajustados obtenidos con ambas metodologías de medición (fibra óptica y sonda de contacto), han presentado resultados similares entre sí.

No obstante, las medidas realizadas con la sonda de contacto muestran un mejor ajuste de los valores predichos con los valores observados (analizados por los métodos clásicos de laboratorio).

Con los resultados obtenidos, se ha podido estimar el contenido de Carbono y Nitrógeno de los tres viñedos de estudio, con correlaciones aceptables, siempre superiores a $R^2=0,5$. Esta información es de gran interés para el viticultor, ya que le permite realizar una caracterización del viñedo, así como evaluar técnicas de fertilización y realizar un manejo más preciso del mismo.

En cuanto a las dos técnicas empleadas para el procesado de los datos (PLSR y RF), se han obtenido resultados similares en ambas metodologías, aun siendo RF la técnica que ha producido modelos con unas correlaciones mejores con respecto a la regresión PLSR.

En el análisis de RF, la metodología en la que no se han definido componentes principales (RF vs PC-RF), es decir, en la que se ha aplicado el modelo al conjunto de datos de reflectancia, ha sido el que mejores resultados ha presentado.

La espectroscopía de campo se ha mostrado como una técnica complementaria a los análisis clásicos de laboratorio, que permite la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los suelos de viñedo, aportando información muy útil para el viticultor, así como, reduciendo tiempo y costes en el procesado de las muestras.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado en colaboración con la Bodega Mar de Frades – Zamora Company, en el marco del Proyecto ALBASOUL-17 “ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS PARA OPTIMIZAR EL MANEJO DEL VARIETAL ALBARIÑO EN LA ELABORACIÓN DE VINOS TRANQUILOS Y ESPUMOSOS EN LA D.O. RIAS BAIXAS” Vinesalt, financiado por el programa (Programa PID-CDTI) del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

5.- Bibliografía

Báscones, A., Suárez, M., Ferrer-Julíà, M., García-Meléndez, E., Colmenero-Hidalgo, E., y Quirós, A. 2020. Characterization of clay minerals and Fe oxides through diffuse reflectance spectroscopy (VNIR-SWIR). *Remote sensing magazine*, 55, 49-57.

Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal*, 54 (5), 464-465.

Breiman, L. 2001. Random forest. *Machine Learning*, 45 (1), 5-32.

Carter, M.R. y Gregorich, E.G. 2008. Soil Sampling Methods of Analysis. *Canadian Society of Soil Science*: Pinawa, MB, Canada; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2008; p. 1224.

Chang, C. W., Laird, D. A., Mausbach, M. J., y Hurburgh, C. R. 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy–principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 480-490.

Conforti M., Froio R., Matteucci G. y Buttafuoco G. 2015. Visible and Near infrared spectroscopy to predict texture in forest floor: an application in southern Italy. *iForest*, 8: 339-347.

Cozzolino, D., Cynkar, W.U., Damberg, R.G., Shah, N., Sminth, P. 2013. In situ measurement of soil chemical composition by near-infrared spectroscopy: A tool toward sustainable vineyard management. *Communications in soil science and plant analysis*, 44(10), 1610-1619.

Corwin, D. y Lesch, S. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: I. Survey protocols. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1), 103-133.

Du, C., y Zhou, J. 2009. Evaluation of soil fertility using infrared spectroscopy: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 7(2), 97-113.

GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España [en línea]. [Fecha de consulta 10/06/2021]. Disponible en: http://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Geologica/IGME_Geode_50/MapServer/WMServer

González-Fernández, A. B., Rodríguez-Pérez, J. R., Marcelo, V. y Valenciano, J. B. 2015. Using field spectrometry and a plant probe accessory to determine leaf water content in commercial vineyards. *Agricultural water management*, 156, 43-50.

Goydaragh, M. G., Jafarzadeh, A. A., Shahbazi, F., Oustan, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., y Lado, M. 2019. Estimation of elemental composition of agricultural soils from West Azerbaijan, Iran, using mid-infrared spectral models. *Brazilian magazine of agricultural and environmental engineering*, 23(6), 460-466.

Houborg, R. y McCabe, M.F. 2018. A hybrid training approach to leaf area index estimation through cubist and random forest machine learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 135, 173-188.

Lima, M.A. y Santos, A.O. 2020. Estimation of grape isabel's quality in pre-harvest based on spectral signature. *Applied Research and Agrotechnology*, 13, 5838-1.

McBratney, A.B., Minasny, B. y Rossel, R.V. 2006. Soil spectral analysis and inference systems: a powerful combination to solve the soil data crisis. *Geoderma*, 136 (1-2), 272-278.

Monteserín, C. (2017). CULTIVA Decisiones: innovación en sistemas informáticos para el control del viñedo. *Phytoma España: La revista profesional de sanidad vegetal*, (288), 110-111.

Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., Davies, T. 2002. A user friendly guide to multivariate calibration and classification. Chichester: NIR.

Rosero-Vlasova, OA, Pérez-Cabello, F., Llovería, RM y Vlassova, L. 2016. Evaluation of VIS-NIR-SWIR laboratory configurations with different spectroscopy accessories for the characterization of forest fire soils. *Biosystem engineering*, 152, 51-67.

Skjemstad, J.O. y Taylor, J.A. 1999. Does the Walkley-Black method determine soil charcoal. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 30 (15-16), 2299-2310.

Valenciaga, D y Saliba, E.D.O.S. 2006. Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) and its potentialities for forage evaluation. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 40(3), 259-267.

Williams, P. y Dardenne, P. (2017). Tutorial: items to include in a report on a near infrared spectroscopy project. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 25 (2), 85-90.