

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE PARÁMETROS EDÁFICOS Y CLIMÁTICOS EN EL CRECIMIENTO DEL ALCORNOQUE EN UNA DEHESA DE HUELVA (ESPAÑA)

Javier Vázquez-Piqué, Fernando Pereira Naranjo, Raúl Tapias Martín, Arantzazu González-Pérez, Enrique Andivia Muñoz y Daniel Martín-Pérez

Dpto. de Ciencias Agroforestales. Campus de la Rábida. Universidad de Huelva. Crta. Palos-La Rábida s/n. 21819-PALOS DE LA FRONTERA (Huelva, España). Correo electrónico: jpique@uhu.es.

Resumen

En este artículo se analiza la influencia de parámetros edáficos y climáticos en el crecimiento perimetral del alcornoque (*Quercus suber* L.). Los datos de crecimiento diametral fueron medidos con dendrómetros de banda colocados en 107 individuos de una parcela situada en una masa adeshada en Hinojos (Huelva) desde mayo de 2003 hasta julio de 2006. En la parcela se realizó una malla de 12 puntos en la que se recogieron muestras de tierra a cuatro profundidades y en las que se analizaron los parámetros de textura, materia orgánica, pH, CIC, Ca, Mg, Na y K intercambiables, N, P, K asimilables. La estimación de los parámetros edáficos en la parcela a partir de los puntos muestreados se realizó por el método de distancias inversas ponderadas y se asignaron valores medios de las variables edáficas a cada individuo mediante la generación de polígonos de Thyessen. Las variables climáticas consideradas se obtuvieron a través de una estación meteorológica instalada en la propia parcela. Se realizó un modelo de crecimiento que analiza la influencia de los parámetros edáficos y climáticos analizados. La temperatura media de las mínimas, la humedad de suelo a 90 cm de profundidad, el pH y los contenidos de K y Na superficiales son las variables que influyen significativamente en el crecimiento del alcornoque.

Palabras clave: *Variables edáficas, Variables climáticas, Modelo de crecimiento, Alcornoque*

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y la variación temporal de las características climáticas es importante para evaluar la potencialidad productiva de un sitio y para proporcionar herramientas para desarrollar métodos eficientes de gestión.

La variación espacial de las propiedades del suelo debe ser tomada en cuenta en el análisis de datos e interpretación de cualquier estudio sobre

la vegetación (PRASOLAVA et al., 2000). Las propiedades físicas y químicas del suelo pueden variar por cambios en el material parental y por la posición en el territorio (vaguadas, laderas, crestas). En los terrenos forestales, además, la composición de especies y la presencia de árboles individuales pueden afectar a las propiedades del suelo en sus proximidades (BOENER & KOSLOWSKY, 1989). Por otro lado, esta variación espacial de las propiedades del suelo puede influir en el crecimiento de los árboles por lo

que su estudio es necesario para entender mejor las variaciones individuales en el crecimiento y para predecir el crecimiento bajo distintas estrategias de gestión (PRASOLAVA et al., 2000).

El conocimiento y modelización de la influencia de las características climáticas en el crecimiento es una herramienta igualmente importante para la gestión y permite realizar análisis de la influencia que distintos escenarios de cambio climático pueden tener en la productividad de ecosistemas forestales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Sitio de ensayo

Los datos presentados han sido recogidos de una parcela de investigación situada en los Montes de Propios de Hinojos (Huelva) (UTM: 29S 0728041335). La parcela está situada en una masa de alcornoque (*Quercus suber* L.) con pies dispersos de encina (*Quercus ilex* L.), de 1,89 ha de superficie, densidad de 99,6 pies.ha⁻¹ y un área basimétrica de 8,1 m².ha⁻¹. La altitud es de 100 m y la pendiente escasa. La vegetación arbustiva está formada fundamentalmente por *Cistus salvifolius* y *Halimium halimifolium* con presencia más dispersa de *Pistacea lentiscus*, *Phyllirea angustifolia*, *Daphne gnidium* y *Chamaerops humilis*.

El clima es de tipo mediterráneo genuino IV₂ (ALLUÉ, 1990). La caracterización edáfica se ha realizado mediante la elaboración de dos calicatas en la parcela (datos analíticos no mostrados). Se trata de perfiles complejos en los que la parte superior, hasta los 25-40 cm, está formada por una capa de textura arenoso-franca a franco-arenosa formada por depósitos eólicos que conforman un perfil A C. La parte inferior tiene textura más pesada (texturas franco-arcillosas, franco-arcillosa-arenosa o arcillosa) en la que se diferencia un horizonte argílico de color abigarrado por la existencia de procesos hidromórficos. El conjunto se clasifica como un *Thapto Alfic Xerorthent* (USDA, 2003).

Dispositivo experimental y mediciones

Los datos de crecimiento se obtuvieron mediante la colocación de dendrómetros de banda en 107 individuos de la parcela. Las mediciones

del crecimiento perimetral de los individuos tuvieron periodicidad aproximadamente mensual desde abril de 2003 a julio de 2007 (37 mediciones). Todos los individuos de la parcela fueron georeferenciados mediante levantamiento topográfico realizado con estación total topográfica.

Los datos correspondientes a variables edáficas se obtuvieron mediante la realización de una malla de 12 puntos regularmente distribuida en la parcela de la que se obtuvieron muestras de suelo a 4 profundidades distintas, entre 0 y 90 cm de profundidad. Los parámetros analizados fueron: textura, materia orgánica (%), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), Ca, Mg, Na y K intercambiables y N, P, K asimilables. Se obtuvieron 2 valores de cada variable por punto, una correspondiente a la muestra superficial y otra correspondiente a la media ponderada de las 4 muestras. Se realizaron mapas de distribución de las variables para el conjunto de la parcela utilizando el método de las distancias inversas ponderadas con potencia 2 y tamaño de píxel de 1 m². La asignación a cada uno de los árboles de la parcela de un valor de las distintas variables edáficas se realizó mediante la intersección del polígono de Thyessen construido para cada árbol y el mapa de distribución de cada una de las variables. Posteriormente se calculó el valor medio de cada variable edáfica en cada polígono. Este proceso se realizó con ArcGis 9.0.

Los datos correspondientes a variables climáticas y edáficas continuas se obtuvieron de una estación meteorológica instalada en la propia parcela. con recogida cada 15 min de datos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación PAR, velocidad y dirección de viento, humectación de hoja, temperatura de suelo (a 30 cm de profundidad) y humedad de suelo (sensor C-Probe) a 10, 30, 60, 90 y 120 cm de profundidad. Se calcularon los valores diarios y con éstos los valores medios, medias de las máximas, medias de las mínimas, máximas absolutas y mínimas absolutas entre fechas exactas de medición de crecimientos. En el caso de las variables precipitación y radiación se calcularon los valores acumulados.

Modelo inicial

Se parte del modelo inicial de efectos aleatorios:

$$y_{ij} = \mu + a_i + f_j + e_{ij}$$

donde,

y_{ij} : es el crecimiento diario de circunferencia normal en décimas de mm/día del árbol i ($i=1,2,\dots,107$) en el periodo de medición j ($j=1,2,\dots,37$)

a_i : es el efecto aleatorio árbol con $a_i \sim N(0, \sigma_a^2)$

f_j : es el efecto aleatorio fecha de medición con $f_j \sim N(0, \sigma_f^2)$

e_{ij} : es el error residual del modelo con $e_{ij} \sim N(0, \sigma_e^2)$

El objetivo de esta fase inicial fue estimar los valores de los componentes de la varianza del modelo (σ_a^2 , σ_f^2 , σ_e^2), con lo que la distribución de los efectos aleatorios queda definida y predecir para cada árbol y para cada fecha de medición el valor de los componentes aleatorios. La forma por la que se han estimado los componentes de la varianza es por máxima verosimilitud restringida (REML).

Antes de realizar la estimación de los componentes se realizaron hipótesis sobre las relaciones de dependencia existentes entre los datos. En este caso la posible presencia de correlación espacial ha sido analizada suponiendo que la covarianza entre dos árboles es de tipo:

$$\text{cov}(y_i, y_{i'}) = \sigma_a^2 \cdot e^{\left(\frac{-d_{i,i'}}{\theta}\right)}$$

siendo e la base de los logaritmos neperianos, $d_{i,i'}$ la distancia entre los árboles i , i' de la parcela y θ un parámetro que se ajusta simultáneamente con el resto de los componentes de la varianza. Análogamente la presencia de correlación temporal entre las mediciones efectuadas en un mismo árbol se ha analizado suponiendo la siguiente estructura de covarianzas:

$$\text{cov}(y_{ij}, y_{ij'}) = \sigma_e^2 \cdot \rho^{t_j - t_{j'}}$$

siendo $t_j - t_{j'}$ el tiempo transcurrido entre la medición j y la medición j' y ρ un parámetro que se ajusta simultáneamente con el resto de los componentes de la varianza.

Para analizar la mejor estructura de modelo se observan los valores de los estadísticos -2 veces el logaritmo de verosimilitud (-2LL) y el criterio de información de Akaike. Valores menores de estos estadísticos indican un mejor ajuste y permiten seleccionar la mejor estructura de modelo.

Selección de covariables a nivel árbol

El objetivo de este punto será seleccionar aquellas variables medidas a nivel árbol (variables edáficas relacionadas con materia orgánica, textura, CIC, pH y nutrientes) que más van a influenciar la parte de crecimiento correspondiente a nivel árbol. La selección de estas variables se ha realizado construyendo todas las regresiones posibles tomando como variable dependiente la predicción de los efectos aleatorios a nivel árbol (que nos indica el crecimiento en cada árbol asociado a ese factor) y como independientes las variables edáficas asociadas al nivel árbol. Se calcularon todas las regresiones posibles que incluían hasta un máximo de 3 variables de este tipo.

Se ha utilizado para la selección de las mejores regresiones criterios de ajuste (R^2 ajustado -AdjR²-, Error medio cuadrático -EMC-, Criterio de información de Akaike -AIC-, Criterio Bayesiano de Schwarz -SBC-), predictivos (Suma de cuadrados de residuos de predicción -PRESS-, suma de valor absoluto de residuos de predicción -APRES-) y de multicolinealidad (Factores inflatores de la varianza -VIF-, Número de condición -NCOND-) combinados en tres algoritmos de puntuación. El primero (PUNT1) corresponde a la expresión:

$$\begin{aligned} \text{PUNT1} = & \frac{3}{10} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\max(\text{MSE}) - \text{MSE}}{\text{rango}(\text{MSE})} + \right. \right. \\ & \frac{\text{AdjR}^2 - \min(\text{AdjR}^2)}{\text{rango}(\text{AdjR}^2)} + \frac{\text{abs}(\text{AIC} - \max(\text{AIC}))}{\text{rango}(\text{AIC})} \\ & \left. \left. + \frac{\text{abs}(\text{SBC} - \max(\text{SBC}))}{\text{rango}(\text{SBC})} \right) \right] + \\ & \frac{5}{10} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\max(\text{PRESS}) - \text{PRESS}}{\text{rango}(\text{PRESS})} + \right. \right. \\ & \frac{\max(\text{APRES}) - \text{APRES}}{\text{rango}(\text{APRES})} \left. \left. \right) \right] + \frac{2}{10} \left[\frac{1}{2} \right. \\ & \left. \left(\frac{\max(\text{VIF}) - \text{VIF}}{\text{rango}(\text{VIF})} + \frac{\max(\text{NCOND}) - \text{NCOND}}{\text{rango}(\text{NCOND})} \right) \right] \end{aligned}$$

Este algoritmo toma valor 0 si la regresión evaluada es la peor en todos los criterios conside-

rados y 1 en el caso de que sea la mejor en todos los criterios, ponderando en un 30% los criterios de ajuste, en un 50% los criterios predictivos y 20% los criterios de multicolinealidad. Los algoritmos PUNT2 y PUNT3 tienen similar expresión pero con diferente ponderación entre criterios (30%, 60% y 10% en el caso de PUNT2 y 20%, 70%, 10% en el caso de PUNT 3). Se consideró igualmente el valor medio de los 3 algoritmos de puntuación. Se preseleccionaron las 10 mejores regresiones en cualquiera de las 4 puntuaciones. La selección final de las variables más influyentes se realizó introduciendo las integrantes de las mejores regresiones en el modelo de efectos aleatorios y comprobando la reducción estadísticamente significativa de los estadísticos -2 veces el logaritmo de verosimilitud ($-2LL$) y el criterio de información de Akaike (AIC).

Selección de covariables a nivel fecha de medición

La selección de las variables que actúan a nivel fecha (variables climáticas y edáficas de medición continua) se ha realizado calculando todas las regresiones posibles tomando como variable dependiente la predicción de los efectos aleatorios a nivel fecha de medición y como variables independientes las variables de tipo climático y edáfico obtenidas a través de la estación meteorológica. Se calcularon todas las combinaciones posibles entre ellas que incluían un máximo de 5

variables de ese tipo. La selección de variables se hizo de igual forma que el punto anterior. El análisis estadístico se ha realizado con SAS v.9.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimientos mensuales

El valor medio del crecimiento de los 107 árboles sigue un marcado patrón con máximo en primavera (meses de mayo, junio) y otro máximo menos acusado en otoño (Figura 1). Existe una parada invernal motivada por bajas temperaturas y otra al final del verano por escasez de recursos hídricos. Destaca el escaso crecimiento de la primavera de 2005 debido a la extraordinaria sequía de ese año.

Variables climáticas y climáticas seleccionadas

El proceso de selección de covariables se indica en la tabla 1. La primera columna indica los componentes de la varianza del modelo inicial, sin variables edáficas o climáticas. La introducción de la estructura de covarianzas no nulas entre árboles no mejoraba el modelo pero sí la consideración de correlación temporal entre mediciones dentro de un mismo árbol. La varianza total del modelo se debe en un 63% a la existente a nivel fecha, un 31% está asociado a la varianza residual y sólo un 6% a nivel árbol.

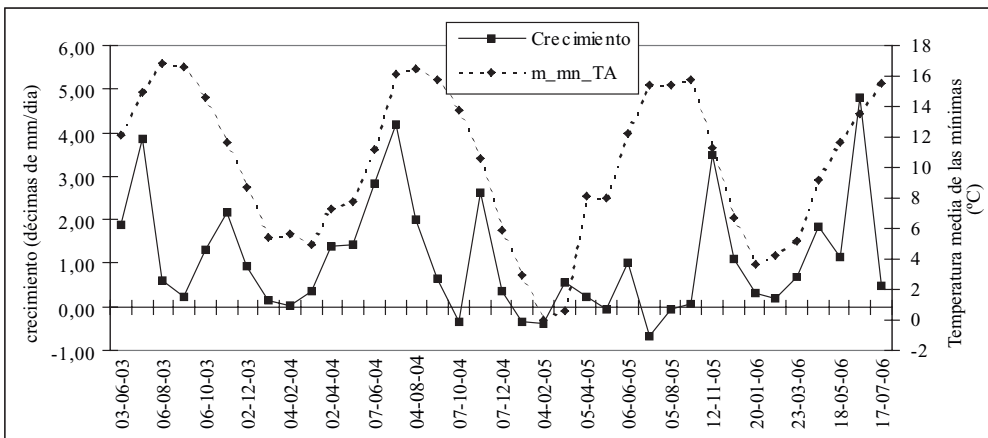


Figura 1. Evolución del crecimiento perimetral diario medio y temperatura media de las mínimas (m_mn_TA) durante el periodo de estudio

Las variables climáticas significativas seleccionadas son la temperatura media de las mínimas (m_mn_TA) y el valor medio del porcentaje de humedad del suelo a 90 cm de profundidad (mCP90). Su inclusión en el modelo reduce la varianza total en un 20% debido exclusivamente a su incidencia a nivel fecha. Los coeficientes estimados se indican en la tabla 2. La temperatura media de las mínimas tiene un efecto limitante del crecimiento en los meses invernales, en los que valores inferiores a 6°C se corresponden a valores de crecimiento nulos e incluso negativos (Figura 1). La reducción del crecimiento a finales del verano (agosto-septiembre) y en la primavera-verano del 2005 es debida a la falta de recursos hídricos. De las variables que reflejan el contenido de humedad del suelo, el valor medio de humedad a 90 cm de profundidad es el que mejor explica el crecimiento de los individuos y la parada de crecimien-

to a finales de verano y en el año 2005 (Figura 2). En los meses de junio-julio, en los que las capas arenosas superficiales ya han alcanzado niveles próximos al punto de marchitez (cercanos al 3%) el crecimiento continúa debido a que el árbol es capaz de acceder a recursos hídricos más profundos.

Las variables edáficas seleccionadas son los contenidos de K, Na y pH en superficie. Los coeficientes estimados se indican en la tabla 2 y los principales estadísticos de distribución en la tabla 3. El potasio tiene un efecto osmoregulator que favorece la resistencia de los individuos frente a la sequía, mejorando por tanto las condiciones de crecimiento (EGILLA *et al.*, 2001; SARDANS & UELAS, 2007; MOINUDDIN & IMAS, 2007) mientras que el sodio puede sustituir al potasio como osmoregulator en condiciones de deficiencia del primero (IVAHUPA *et al.*, 2006). Valores de pH más cercanos a la neutralidad (dentro de los nive-

Pasos	1	2	3
T.independiente	μ	μ	μ
Variables climáticas		mCP90 m_mn_TA	
Variables edáficas			Na K pH
σ^2_{arbol}	0,0174	0,0174	0,0160
σ^2_{fecha}	0,1802	0,1230	0,1802
$\bar{U}$	0,9419	0,9419	0,9419
$\sigma^2_{residuo}$	0,0878	0,0878	0,0878
σ^2_{total}	0,2855	0,2283	0,2839
-2LL	1896,3	1882,2	1888,2

Tabla 1. Estimación de los componentes de la varianza y valor de -2 veces el logaritmo de verosimilitud (-2LL) en el modelo inicial de efectos aleatorios y en los modelos con introducción de covariables edáficas y climáticas seleccionadas. mCP90: Humedad de suelo en % a 90 cm de profundidad. m_mn_TA: Temperatura media de las mínimas (°C)

Variables	Efecto	Unidades	Estimación	G de libertad	Pr>t
Climáticas	T. independiente	-	-0,5908	37	0,0193
	mCP90	%	0,02983	37	0,0110
	m_mn_TA	°C	0,03982	37.1	0,0031
Edáficas	T. independiente	-	-0,5004	115	0,1425
	Na	cmol ⁺ /kg	0,6476	106	0,0481
	K	cmol ⁺ /kg	0,1361	106	0,0695
	pH	-	0,09336	106	0,0266

Tabla 2. Estimación de los coeficientes de las variables climáticas y edáficas seleccionadas y probabilidad asociada

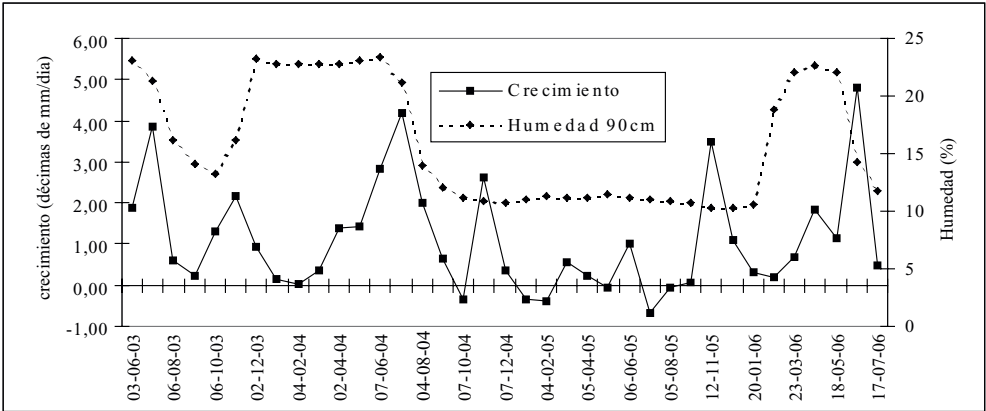


Figura 2. Evolución del crecimiento perimetral diario medio y humedad de suelo a 90 cm de profundidad durante el periodo de estudio

Variable	Unidades	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo
K	cmol ⁺ /kg	0,56	0,30	1,10	0,26
Na	cmol ⁺ /kg	0,25	0,09	0,40	0,11
pH	-	6,5	0,73	7,7	4,8

Tabla 3. Principales estadísticos de las variables edáficas seleccionadas

les ácidos y neutros que presenta la parcela) favorecen una mayor asimilabilidad de nutrientes.

CONCLUSIONES

Las variables climáticas que mejor explican el crecimiento mensual son la temperatura media de las mínimas, cuyos valores inferiores a 6°C limitan claramente el crecimiento de la especie en esta zona geográfica y la humedad media del suelo a 90 cm de profundidad, que tiene un efecto limitante en el crecimiento al final del verano y en la práctica totalidad del año 2005. Las variables edáficas que se expresan a nivel árbol absorben una variabilidad mucho menor. Contenidos más elevados de potasio, sodio y pH están relacionadas con condiciones más favorables para el crecimiento.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los Proyectos de Investigación: SUBERWOOD (V Progra-

ma Marco de la UE, QLK5-CT-2001-007001), MEDCRE (Plan Nacional de I+D+I, 2005, AGL2005-04971) y SUM2006 (Acción movilizadora de sumideros agroforestales de efecto invernadero, Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias). Agradecemos la colaboración prestada para la realización de este trabajo al Excmo. Ayuntamiento de Hinojos y a la Delegación de Medio Ambiente de Huelva de la Junta de Andalucía.

BIBLIOGRAFÍA

ALLUÉ, J.L.; 1990. *Atlas Fitoclimático de España*. INIA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

BOENER, R.E. & KOSLOWSKY, S.D.; 1989. Microsite variations in soil chemistry and nitrogen mineralization in a beech-maple forest. *Soil Biol. Biochem.* 21:795-801.

EGILLA, J.N.; DAVIES, J. & DREW, M.C.; 2001. Effect of potassium on drought resistance of *Hibiscus rosa-sinensis* cv. Leprechaun: Plant

- growth, leaf macro- and micronutrient content and root longevity. *Plant and Soil* 229: 213-224.
- IWAHUPA, S.R.; ASHER, C.J.; BLAMEY, F.P.C. & O'SULLIVAN, J.N.; 2006. Effects of sodium on potassium nutrition in three tropical root crop species. *J. Plant Nutrition* 29: 1095-1108.
- MOINUDDIN & IMAS, P.; 2007. Evaluation of potassium compared to other osmolytes in relation to osmotic adjustment and drought tolerance of chickpea under water deficit environments. *J. Plant Nutrition* 30: 517-535.
- PRASOLACA, N.V.; XU, Z.H.; SAFFIGNA, P.G. & DIETERS, M.J.; 2000. Spatial-temporal variability of soil moisture, nitrogen availability indices and other chemical properties in hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantations of subtropical Australia. *Forest Ecol. Manage.* 136:1-10.
- SARDANS, J. & UELAS, J.; 2007. Drought changes phosphorus and potassium accumulation patterns in an evergreen Mediterranean forest. *Funct. Ecol.* 21: 191-201.
- USDA, 2003. *Keys of soil taxonomy*. 9th edition. United States Department of Agriculture.