

LUIGI SEDDA (*) - SANDRO DETTORI (*)

ANALISI VARIOGRAFICA DEL DIAMETRO IN UN IMPIANTO DI QUERCIA DA SUGHERO. UN ESEMPIO DI STUDIO DELLA CORREGIONALIZZAZIONE IN AMBITO FORESTALE

La geostatistica permette di produrre modelli, stime, mappe e previsioni circa la struttura spaziale delle dimensioni e crescita delle piante. I variogrammi hanno consentito lo studio della dipendenza spaziale del diametro al colletto di un recente impianto di quercia da sughero. Il nostro obiettivo è quello di quantificare la dipendenza spaziale del diametro al colletto attraverso lo studio del suo modello spaziale stocastico. Il modello di variogramma relativo all'intera parcella presenta un'elevata componente casuale. La suddivisione dei dati tra il substrato granitico e quello quarzítico che compongono l'area totale ha permesso di riconoscere modelli di variogramma maggiormente strutturati, soprattutto per l'area granitica. Le funzioni variografiche adottate sono quella sferica per l'area quarzítica ed esponenziale per quella granitica; in entrambi i casi l'autocorrelazione non supera gli otto metri. La ricerca evidenzia come la componente geologica giochi un ruolo primario nella variazione spaziale del diametro. Al contrario, a livello dell'intera parcella esistono una serie di fattori incidenti quali: elevazione, profondità del suolo, linee di flusso idriche, pendenza, esposizione e orientazione, che determinano un generale effetto random. Lo studio, inoltre, vuole dimostrare come l'analisi variografica, oltre che per la stessa geostatistica, sia un utile strumento nelle ricerche sul comportamento delle specie forestali in relazione allo spazio circostante.

Parole chiave: variogramma; teoria delle variabili regionalizzate; geostatistica; diametro al colletto; quercia da sughero.

Key words: variogram; theory of regionalized variables; geostatistics; basal diameter; cork oak.

INTRODUZIONE

In ambito forestale lo studio del diametro e del suo accrescimento ha interessato una notevole produzione letteraria e originato materie scientifiche quali la dendrometria e l'assessamento forestale (BENASSI, 1975). Anche nel caso della quercia da sughero (*Quercus suber* L.) si segnala una articola-

(*) Dipartimento di Economia e Sistemi Arborei, Università degli Studi di Sassari. Via E. De Nicola 9, 07100 Sassari. Corresponding author: lседda@uniss.it

ta ricerca scientifica incentrata sullo studio degli incrementi diametrali soprattutto per l'elevata valenza economica della sua corteccia (il sughero), relegando l'accrescimento del legno in secondo piano (EPHRAT, 1971; CARITAT *et al.*, 1992; MONTERO e CAÑELLAS, 2003). Il diametro sopra scorza (determinato sia dall'accrescimento del legno, per attività del cambio, che da quello del sughero, per attività del fellogeno) è, comunque, il parametro più importante nelle stime di produzione delle sugherete.

In questo lavoro si propone lo studio della variabilità del diametro lungo lo spazio attraverso la funzione di autocorrelazione misurata rispetto alla distanza tra gli individui. Lo strumento utilizzato è la geostatistica, in particolare il variogramma, in grado di quantificare la variabilità spaziale di un fenomeno ambientale anche nei diversi anni in studio (WEBSTER e OLIVER, 2001). L'obiettivo è quello di dare un supporto alla creazione di future mappe di variazione diametrica per la data area di studio e di individuare le eventuali relazioni spaziali tra il diametro e alcune caratteristiche stazionali (GRINGARTEN e DEUTSCH, 2001), contribuendo alle conoscenze eco-fisiologiche della specie e a quelle gestionali. La presente indagine vuole, inoltre, evidenziare come le tecniche geostatistiche possano, in campo forestale, essere uno strumento preciso e accurato per studi ecologici, di indici ambientali e di tecniche di ottimizzazione del campionamento (MATERN, 1960; PAYN *et al.*, 1999; MERINO DE MIGUEL, 2000; NANOS *et al.*, 2002, 2004a e 2004b).

MATERIALI E METODI

Il diametro nella quercia da sughero

Sino ad oggi gli studi hanno relazionato, il più delle volte attraverso modelli deterministici, i parametri climatici all'accrescimento radiale a petto d'uomo, dimostrando un *trend* negativo nel tempo. La precipitazione annuale e la temperatura media sono i parametri più correlati con la larghezza dell'anello del sughero (COSTA *et al.*, 2003). In alcuni casi si sono normalizzate curve di serie di spessori del legno per predire quelle del sughero durante il ciclo totale della pianta (OLIVEIRA *et al.*, 1994).

Il presente lavoro, condotto nel 2003, ha indagato la dipendenza spaziale del diametro al colletto di piante di 7 anni in una parcella sperimentale del centro-Sardegna composta da 2.701 piante di 27 provenienze del bacino del Mediterraneo.

L'area di studio

La parcella sperimentale del Monte Grighine, che rientra nel *Mediterranean Oaks Network* (FAIR I CT 95-0202; VARELA, 2003), si trova in Sar-

degna (settore centro occidentale), nel comune di Siamanna in Provincia di Oristano, ad una quota tra i 430 e i 500 m s.l.m. e con centro in coordinate UTM ED50: N484214 ed E4419890.

I lavori di preparazione del suolo hanno interessato un'area di dimensioni 123 x 275 m pari ad un'estensione di 3,3 ha.

L'area cade in una frattura geologica (Figura 1). La formazione intrusiva ercinica è qui costituita da un complesso granitoide, mentre il complesso metamorfico paleozoico è di basso e medio grado, costituito prevalentemente da quarziti (PROVINCIA DI ORISTANO, 2001).

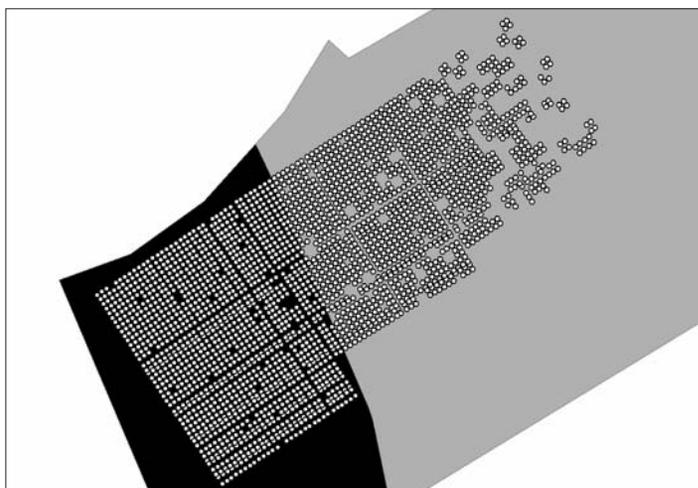


Figura 1 – L'insieme delle piante (punti bianchi) è suddiviso tra un complesso intrusivo ercinico a sinistra (nero) e un complesso metamorfico paleozoico a destra (grigio).

– *Cork oak stand (white points) is subdivided between granite on the left (black) and quartzite on the right (grey).*

Le piante, disposte secondo un sesto di impianto in quadrato di 3 x 3 m, sono pressoché equamente suddivise tra le due parti: 1394 nel complesso intrusivo e 1306 nel complesso metamorfico. La parcella è un ex pascolo cespugliato con pietrosità superficiale da scarsa a moderata. I suoli poco profondi (30-35 cm) sono poveri in sostanza organica e con tessitura franco-sabbiosa.

L'area presenta un'altimetria variabile. La quota media è di 467 m e la pendenza modesta. L'esposizione è inclusa tra i 164-230° (Sud e Sud-Ovest). Il clima, prettamente mediterraneo, può essere ascritto a quello della zona fitoclimatica del *Lauretum* sottozona media. La classificazione mondiale di ALLUE ANDRADE (1990) lo ascrive al clima mediterraneo genuino fresco IV₄ con attributo fitologico del Mediterraneo arboreo ilicino meno secco.

La geostatistica

Se una proprietà varia più o meno continuamente nello spazio geografico, questa potrà essere assunta come una variabile regionalizzata (MATHERON, 1965; GOOVAERTS, 1997) e analizzata attraverso gli strumenti geostatistici. La stima attraverso l'interpolatore *kriging* permette un maggior dettaglio locale della variazione spaziale della proprietà in studio. Questo tipo di interpolazione è appropriata solo nel caso in cui la proprietà vari in modo continuo e i dati siano spazialmente dipendenti o correlati.

Il modello di variazione spaziale per la stima geostatistica è il seguente:

$$Z(x) = \mu_v + \varepsilon(x)$$

dove $Z(x)$ è la variabile casuale nella locazione x , μ_v la media locale di Z nei limiti predefiniti della locazione x , e $\varepsilon(x)$ un termine casuale con valore atteso pari a 0 e una varianza:

$$\text{var}[\varepsilon(x) - \varepsilon(x+h)] = E[\varepsilon(x) - \varepsilon(x+h)]^2 = 2\gamma(h)$$

calcolata per tutte le coppie di locazioni x e $x+h$, dove h è un vettore distanza (lag) per tutte le distanze e direzioni. γ è la semivarianza tra due locazioni, che nel caso di stazionarietà (μ_v localmente costante) sarà equivalente a:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var} [Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E [Z(x) - Z(x+h)]^2$$

e chiamata variogramma di Z .

Il variogramma permette una descrizione dettagliata e non distorta della scala e del *pattern* della variazione spaziale; fornisce, inoltre, il modello spaziale necessario per il *kriging*, e la base per l'ottimizzazione dei disegni campionari (MCBRATNEY *et al.*, 1981). La modellizzazione del variogramma teorico a partire da quello sperimentale, può indicare con quale approccio proseguire l'indagine predittiva.

I valori possono essere stimati per punti o per blocchi attraverso il *kriging*, ovvero una media mobile pesata dei valori osservati sulla base del variogramma entro determinati limiti definiti da un *neighbourhood* N (nei quali valgono i presupposti di stazionarietà della variabile). Per una variabile regionalizzata, Z , con valore misurato $z(x_i)$ alla locazione (x_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, l'equazione del *kriging* ordinario sarà:

$$\hat{Z}(B) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i)$$

dove $Z(B)$ rappresenta il valore stimato per il blocco B , λ_i sono i pesi assegnati nei punti interni ad N . L'estimatore *kriging* è definito non distorto (i pesi sommano ad uno) e ottimale (i pesi sono scelti in modo da ridurre al minimo la varianza di *kriging*). Questo interpolatore ci permette, a differen-

za degli interpolatori classici (*spline*, inverso del quadrato della distanza, triangolazioni, media mobile...) di ottenere oltre ad una mappa di stima del parametro, anche una mappa della varianza di stima (*error kriging*), consentendo di valutare l'affidabilità della predizione.

L'applicazione della geostatistica per l'esplorazione della struttura spaziale del diametro al colletto delle piante di quercia da sughero nel 2003 ha seguito l'approccio variografico (analisi del variogramma), ma non le tecniche di *kriging* ordinario (NANOS e MONTERO, 2002) in sintonia con l'obiettivo del lavoro di concentrare analisi e discussioni sulla produzione dei migliori variogrammi.

ANALISI VARIOGRAFICA E RISULTATI

L'analisi di corregeionalizzazione è stata condotta in due fasi: la prima riguarda l'intero set di dati (2.701 piante), la seconda considera le piante suddivise per tipologia geologica. I principali parametri statistici sono riassunti nella tabella 1.

L'analisi della varianza non riconosce per i tipi geologici nessuna influenza particolare ($F_{pr} = 0,819$), così come i confronti tra coppie attraverso un test *t* di *Student*, relativamente al diametro (diametro nell'area totale – diametro nel granitico; diametro nell'area totale – diametro nel quarzítico; diametro nel quarzítico – diametro nel granitico), mostrano una sostanziale uguaglianza tra le medie.

Le correlazioni con i parametri topografici sono generalmente deboli (tabella 2).

L'analisi degli indici di simmetria del diametro al colletto nei tre ambiti territoriali è resa necessaria per la sensibilità del variogramma agli scostamenti dalla normalità. BAXTER *et al.* (2003) consigliano una trasformazione dei dati solo nel caso di *skewness* maggiore di +1 o inferiore a -1. I valori relativi a questa ricerca sono ampiamente compresi nel *range*, per cui il

Tabella 1 – Statistiche del diametro al colletto all'anno 2003. N, numero di piante; CV, coefficiente di variazione; Var, varianza; SD, deviazione standard; Skew, indice di asimmetria di Skewness.

– Summary statistics of cork oak basal diameter of 2003 year. N, number of plants; CV, coefficient of variation; Var, variance; SD, standard deviation; Skew, index of asymmetry – Skewness.

Area	N	CV (%)	Media (mm)	Mediana (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Var	SD	Skew
Granitica	1.395	25,53	53,97		7,00	97,00	189,93	13,78	-0,12
Quarzítica	1.306	25,82	54,56	55,00	7,00	101,00	198,47	14,09	-0,06
Granitica + Quarzítica	2.701	25,67	54,27		7,00	101,00	194,03	13,93	-0,09

Tabella 2 – Valori ottenuti dalla matrice di correlazione dei diametri con i principali parametri topografici calcolati sulla base di celle di 10x10m.

– Matrix correlation values between basal diameter and main topographic indexes calculated by 10x10m grid.

Parametro	Diametro area totale	Diametro area granitica	Diametro area quarzítica
Curvatura	-0,032	-0,045	-0,016
Quota	0,009	-0,025	0,082
Esposizione	0,031	0,014	0,064
Pendenza	0,021	-0,006	0,061
X	0,007	-0,035	0,052
Y	0,022	-0,011	0,061

variogramma sperimentale è stato costruito direttamente dai valori grezzi attraverso la formula:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2M(h)} \sum_{i=1}^{M(h)} z(x_i) - z(x_i + h)^2$$

dove M(h) rappresenta il numero di coppie (confronti) al lag h.

L'esistenza del variogramma presuppone una qualche ipotesi di stazionarietà. In questo caso l'esistenza del covariogramma (e quindi di una varianza finita) per tutti e tre gli ambiti (area totale, granitica e quarzítica) ci permette di cadere sotto l'ipotesi di stazionarietà del secondo ordine (POSA, 1995).

I variogrammi teorici sono stati ottenuti attraverso la modellizzazione di quelli sperimentali con approssimazione ai minimi quadrati (Figura 2). La ricerca del miglior modello teorico è avvenuta attraverso una serie di prove con i modelli autorizzati (sferico, esponenziale, circolare, lineare, potenza ecc.) e confrontando i valori relativi alla varianza spiegata, al rapporto tra varianza residua e quella regressiva, alla stima dell'errore standard delle osservazioni e soprattutto al rapporto *nugget/sill* associato ad essi.

I parametri variografici e regressivi relativi ai tre modelli adottati sono riportati in tabella 3.

Le equazioni dei modelli teorici sono le seguenti:

$$\gamma(h) = (c_0 + c) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h}{d}\right) \right\} \quad \text{per il modello esponenziale}$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} (c_0 + c) \left\{ \left(\frac{3h}{2d} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{d} \right)^3 \right\} & \text{per } h \leq d \\ (c_0 + c) & \text{per } h > d \end{cases} \quad \text{per il modello sferico}$$

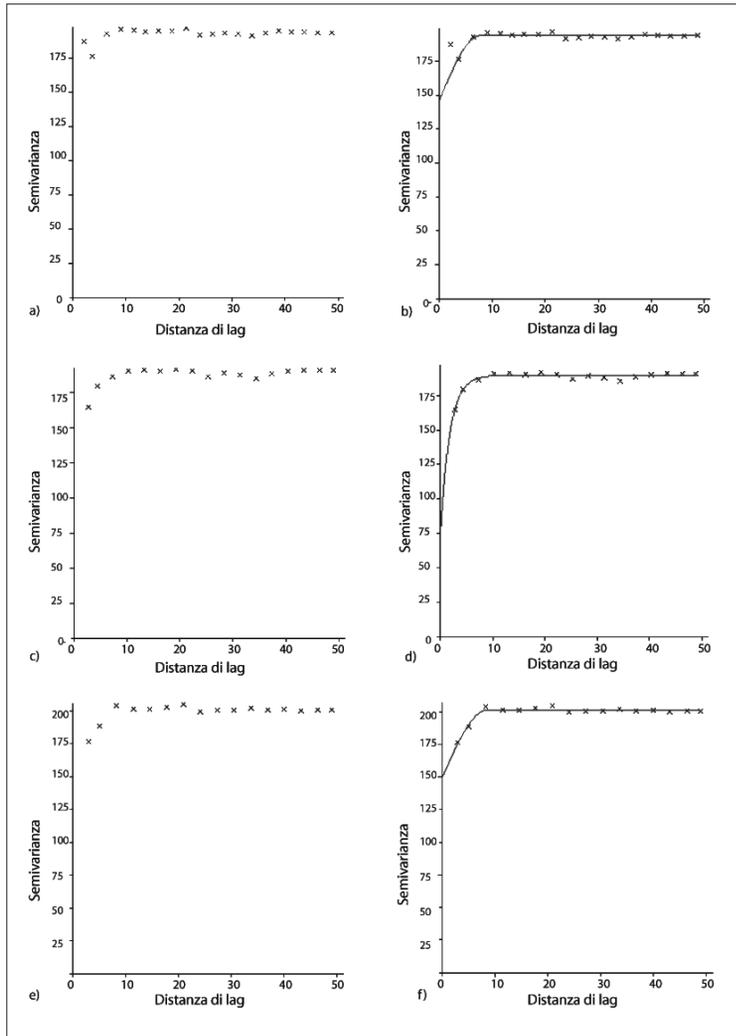


Figura 2 – Variogrammi sperimentali e teorici per il diametro al colletto nell'area intera (a) e (b), in quella granitica (c) e (d), e in quella quarzitica (e) e (f).

– Experimental and theoretical variograms for cork oak basal diameter in whole area (a) and (b), in granite subarea (c) and (d) and in quartzite subarea (e) and (f).

dove c_0 è la varianza di *nugget* (la variazione spazialmente non correlata alla scala di studio utilizzata), c la componente spazialmente correlata, h il lag e d il range (la distanza entro la quale si verifica una correlazione spazialmente dipendente). Infine si definisce il *sill* come la somma ($c_0 + c$). Il rapporto percentuale *nugget/sill* è il parametro più utilizzato per la comprensione della strutturazione spaziale del modello; in altre parole, un valore superio-

Tabella 3 – Modello, range, rapporto *nugget/sill* (N/S), varianza accontentata (V.S.), rapporto varianza spiegata/residui (V.R.) e errore standard delle osservazioni (S.E.) per i tre modelli teorici ottenuti dall'analisi variografica.

– *Theoretical variograms: models, range, nugget/sill ratio (N/S), variance accounted (V.S.), variance regression/variance residuals ratio (V.R.) and standard error of observations (S.E.).*

Area	Modello	Range (m)	N/S (%)	V.S. (%)	V.R.	S.E.
Granitica	Esponenziale	7,58	37,01	92,90	79,59	1,74
Quarzitica	Sferico	7,15	71,00	98,70	353,67	0,81
Granitica + Quarzitica	Sferico	7,43	74,54	96,80	179,64	1,10

re al 70% è indice di variazione casuale alla scala spaziale considerata. Nel caso in studio il modello relativo all'area generale e quello dell'area quarzitica presentano un elevato effetto *nugget* (larga componente locale erratica), mentre si è riusciti nel caso del granitico a strutturare la variazione spaziale (rapporto N/S pari al 37,01%). La fase di incremento monotonic del variogramma (figura 2-d) rappresenta la componente continua della variazione.

Il resto dei parametri regressivi mostrati in tabella 3, indicano dei valori ottimali di varianza spiegata (oltre il 90%), dei residui e dell'errore standard delle osservazioni.

Tutti i modelli sono isotropici: la funzione di semivarianza è identica in tutte le direzioni (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978). Il variogramma, detto unidimensionale, è applicabile all'interpolatore *kriging* senza nessun accorgimento (per i modelli anisotropici vengono richieste particolari correzioni all'atto dell'applicazione del *kriging*).

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

La geostatistica fornisce strumenti utili a quantificare la scala spaziale di cicli e processi ecologici. La conoscenza del comportamento spaziale di una variabile è indispensabile nella definizione di aree omogenee negli ecosistemi forestali ai fini di: ottimizzazione degli schemi di campionamento e degli interventi selvicolturali; riduzione dei costi di gestione (*precision forestry*).

L'analisi variografica è il punto di partenza, e spesso cruciale, dell'intera analisi geostatistica. Essa richiede: studio dell'applicabilità della teoria delle variabili regionalizzate attraverso qualche forma di stazionarietà (in

termini di media e direzione); il calcolo del variogramma sperimentale con una scelta opportuna del *lag* (in genere sulla base dell'osservazione del numero di coppie per ciascuna distanza e dei residui); la ricerca di eventuali anisotropie; la modellizzazione del variogramma per adattamento di un modello matematico continuo al variogramma sperimentale; la valutazione della bontà del modello creato.

I risultati descritti suggeriscono un diverso comportamento della quercia da sughero relativamente al substrato geologico. Infatti, quest'ultimo, è il fattore principale della dipendenza spaziale del diametro al colletto per due motivi: il primo relativo alla bassa correlazione degli altri parametri topografici; il secondo è deducibile dall'analisi variografica presentata, ovvero dall'elevato effetto *nugget* (la variazione è casuale e non spaziodipendente) presente nell'area generale e nella sua porzione quarzifica, in contrasto con la forte componente spazialmente strutturata presente nel modello di variogramma per l'area granitica. Appare quindi un'influenza nel granitico quasi assente nel quarzifico in cui continuano a prevalere altri fattori non riconosciuti in quest'analisi.

Lo studio della variazione spaziale del diametro e la sua regionalizzazione consentono di trarre delle indicazioni per la gestione futura del rimboschimento. Nel caso si debba procedere a dei campionamenti si dovrà tener conto che: nell'area quarzifica domina l'effetto *random*; i campionamenti potranno essere pianificati secondo gli schemi della statistica classica. Nel caso in cui future misure confermino il modello sferico dell'area, ma con una maggiore componente strutturata, allora si dovrà tener presente l'autocorrelazione a corto raggio. Il modello sferico è «meno rapido» di quello esponenziale (presente nel granitico), per cui a seconda dell'indagine e della sua scala, a parità di altri fattori, potranno essere scelti un minor numero di campioni o una distanza di campionamento superiore rispetto all'altra subarea. La conoscenza del variogramma, inoltre, consente l'utilizzo di strumenti di ottimizzazione del campionamento basati sulla minimizzazione della varianza di *kriging*.

Se in avvenire la parcella presenterà un comune variogramma ben strutturato, allora il modello spaziale potrà essere integrato direttamente nell'analisi genetica così come mostrato nei lavori di MAGNUSSEN (1990) e APIOLAZA *et al.* (2000). In questo modo ci si aspetta di rimuovere la variazione legata alla discontinuità dei dati e di ottenere una bassa distorsione dei risultati (JOYCE *et al.*, 2002).

Un'ultima nota vuole sottolineare il rischio dell'applicazione del *kriging* in assenza di un'accurata analisi variografica. Oggigiorno sono disponibili numerosi software in cui è implementato l'interpolatore *kriging*, senza però che vi sia la possibilità di interagire in maniera piena sul variogramma.

Questa ricerca ha dimostrato come una stessa area possa presentare modelli di variogramma differenti e come sia opportuno considerare diversi parametri per la definizione del miglior modello teorico di variogramma, nonché di uno studio statistico accurato a priori. In assenza di una siffatta analisi preliminare, si sarebbe operato verso l'applicazione erronea del *kriging* o ci si sarebbe rivolti agli interpolatori classici privando le mappe di un dato sulla loro attendibilità.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia Giuseppe Cotzia e Giovanni Deplano per l'aiuto nella raccolta dati; la dott.ssa Mariarosaria Filigheddu del Dipartimento di Economia e Sistemi Arborei per il pre-trattamento e l'elaborazione dati; l'Ente Foreste della Regione Autonoma della Sardegna per aver messo a disposizione la parcella sperimentale. Gli autori ringraziano, inoltre, il dott. Andrea Deiana di GeoInfoLab per i suoi consigli utili in fase di revisione.

SUMMARY

Estimating variogram function for cork oak diameter in reforestation. The theory of regionalized variables in forestry application

Geostatistics provides tools to model, estimate, map and predict spatial patterns of tree size and growth. Variogram models were used to study spatial dependence of basal diameter in young cork oak plantation. Our objective was to determine the spatial dependence of stand by studying the related spatial stochastic model. Despite the fact that high nugget effects affect the model for whole area, cork oak diameter shows a better spatial dependence in the two different geological classes that divide the area. An isotropic exponential and an isotropic spherical variogram were the models chosen to represent granite and quartzite subareas. In both models, cork oak diameter was spatially autocorrelated over distances no greater than 8 m, a measure of average patch diameter in this forest ecosystem. The results of survey suggest that geology exerts a strong control on cork oak diameter variation, and in the whole area that other factors are also involved, such as elevation, soil depth, catchment area, slope, hillshade and aspect are creating a general random effect. Simulation models and area estimates of tree performance in young or old-growth forests may be improved by including geostatistical components to summarize ecological spatial dependence.

BIBLIOGRAFIA

- ALLUE ANDRADE J.L., 1990 – *Atlas fitoclimatico de España. Taxonomias*. Collezione monografica Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), Madrid.
APIOLAZA L.A., GILMOUR A.R., GARRICK D.J., 2000 – *Variance modelling of*

- longitudinal height data from a Pinus radiata progeny test*. Canadian Journal of Forest Research, 30: 645-654.
- BAXTER S.J., OLIVER M.A., GAUNT J., 2003 – *A geostatistical analysis of the spatial variation of soil mineral nitrogen and potentially available nitrogen within an arable field*. Precision Agriculture, 4: 213-226.
- BENASSI L., 1975 – *L'evoluzione dell'assessamento forestale e moderni concetti*. Annali Accademia Italiana di Scienze Forestali, 24: 313-330.
- CARITAT A., MOLINAS M., OLIVA M., 1992 – *El crecimiento radial del alcornoque en cinco parcelas de alcornocal de Girona*. Scientia Gerundensis, 18: 73-83.
- COSTA A., PEREIRA H., OLIVEIRA A., 2003. *Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production*. Forest Ecology and Management, 175: 239-246.
- EPHRAT Y., 1971 – *Periderm development and the annual rhythm of phellogen and cambial activity in Quercus suber and Quercus calliprinos*. M. Sc. Thesis, Università di Tel-Aviv.
- GOOVAERTS P., 1997 – *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York.
- GRINGARTEN E., DEUTSCH C.V., 2001 – *Teacher's Aide. Variogram interpretation and modeling*. Mathematical Geology, 4 (33): 507-534.
- JOYCE D., FORD R., FU Y.B., 2002 – *Spatial patterns of tree height variations in a Black Spruce farm-field progeny test and neighbors-adjusted estimations of genetic parameters*. Silvae Genetica, 51 (1): 13-18.
- JOURNAL A.G., HUIJBREGTS C.J., 1978 – *Mining geostatistics*. Academic Press, New York.
- MAGNUSSEN S., 1990 – *Application and comparison of spatial models in analyzing tree-genetic field trials*. Canadian Journal of Forest Research, 20: 536-546.
- MATERN B., 1960 – *Spatial variation*. Springer Verlag, New York.
- MATHERON G., 1965 – *Les variables régionalisées et leur estimation*. Masson, Parigi.
- MCBRATNEY A.B., WEBSTER R., BURGESS T.M., 1981 – *The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables, I. Theory and method*. Computers & Geosciences, 7 (4): 331-334.
- MERINO DE MIGUEL S., 2000 – *Geostatistical and remote sensing: forestry application*. <http://www.geog.ucl.ac.uk/%7Esmerino/>
- MONTERO G., CAÑELLAS I., 2003 – *Selvicultura de los alcornocales en España*. Silva Lusitana, 11 (1): 1-19.
- NANOS N., MONTERO G., 2002 – *Spatial prediction of diameter distribution models*. Forest Ecology and Management, 161: 147-158.
- NANOS N., CALAMA R., MONTERO G., GIL L., 2004a – *Geostatistical prediction of height/diameter models*. Forest Ecology and Management, 195: 221-235.
- NANOS N., GONZALEZ-MARTINEZ S.C., BRAVO F., 2004b – *Studying within-stand structure and dynamics with geostatistical and molecular marker tools*. Forest Ecology and Management, 189: 223-240.
- OLIVEIRA G., CORREIA O., MARTINS-LOUÇÃO M.A., CATARINO F.M., 1994 – *Phenological and growth patterns of the Mediterranean oak Quercus suber L.* Trees, 9: 41-46.

- PAYN T.W., HILL R.B., HOCK B.K., SKINNER M.F., THOM A.J., RIJKSE W.C., 1999 – *Potential for the use of GIS and spatial analysis techniques as tools for monitoring changes in forest productivity and nutrition, a New Zealand example.* Forest Ecology and Management, 122: 187-196.
- POSA D., 1995 – *Introduzione alla geostatistica.* Adriatica Editrice Salentina, Lecce.
- PROVINCIA DI ORISTANO, 2001 – *Carta geopedologica della Provincia di Oristano in scala 1:50.000.* Ufficio Cartografico della Provincia di Oristano.
- VARELA M. C., 2003 – *European network for the evaluation of genetic resources of cork oak for appropriate use in breeding and gene conservation strategies.* Handbook FAIR, ed Varela, MC 2003.
- WEBSTER R., OLIVER M.A., 2001 – *Geostatistics for environmental scientists.* John Wiley & Sons, Chichester.