

CRISTINA VETTORI¹, RAFFAELLO GIANNINI², DONATELLA PAFFETTI^{2,3}

Il materiale vivaistico forestale: variabilità genetica, conservazione, adattamento

¹ Istituto di Bioscienze e Biorisorse (IBBR), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Sesto Fiorentino (FI)

² Accademia dei Georgofili

³ Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze

Oggi, ancora più che in passato, è determinante parlare di vivaismo e del materiale vivaistico forestale da utilizzare e come utilizzarlo. Infatti, il cambiamento climatico ha implicazioni di lunga durata sugli ecosistemi forestali che richiedono azioni urgenti di adattamento e mitigazione da parte dei governi e delle società civili (Osberghaus et al., 2010; IPCC, 2018). Gli effetti del cambiamento climatico (siccità, incremento della CO₂ e della temperatura, ecc.) sulle foreste possono determinare cambiamenti nella produttività (Allen et al., 2010; Reyer et al., 2014; Seidl et al., 2017), nell'intensificazione degli eventi di disturbo, nelle modifiche dei bilanci del carbonio (Jandl et al., 2019) e nelle alterazioni nella composizione in specie, che determinano anche significative variazioni del valore economico delle foreste (Hanewinkel et al., 2013).

Tra diverse opzioni di gestione che possono essere considerate, l'imboschimento e il rimboschimento possono contribuire in modo significativo sia alla mitigazione che all'adattamento delle foreste, ma potremmo considerare anche altre strategie compresa la conservazione *in situ* (Nilsson e Schopfhauser, 1995; Reyer et al., 2014; IPCC, 2018; Spathelf et al., 2018).

I programmi di rimboschimento sono stati ampiamente rivendicati come soluzioni basate sulla natura per sottrarre il biossido di carbonio dall'atmosfera (Griscom et al., 2017; IPCC, 2018; Bastin et al., 2019) sebbene la loro efficacia sia controversa da un punto di vista scientifico (Grainger et al., 2019; Lewis et al., 2019).

I programmi di trasformazione e rimboschimento delle foreste volti a mantenere la fornitura di servizi ecosistemici in futuro possono includere 1) cambiamenti nella composizione in specie, 2) nuove miscele di specie arboree, 3) specie arboree non autoctone e 4) la selezione di materiali riproduttivi forestali adattati (Bolte et al., 2009; Keenan, 2015; Andersson et al., 2017).

Dall'attuazione della direttiva UE sul commercio e l'utilizzo del materiale riproduttivo forestale (Direttiva del Consiglio Europeo 1999/105/CE), le attività di imboscamento e rimboscamento hanno implicato principalmente specie arboree autoctone e provenienze locali dei semi secondo il principio di "local is best" (MCPFE 1993). Tuttavia, poiché si prevede che il cambiamento climatico si verificherà molto più rapidamente della capacità naturale delle specie arboree di adattarsi e migrare (Savolainen et al., 2007; Aitken et al., 2008), il legame tra il clima del rispettivo sito e gli adattamenti locali è a rischio di essere interrotto (Aitken e Whitlock, 2013; Keenan, 2015) pertanto considerare solamente il "local is best" non è l'opzione migliore; ma si dovrebbe considerare "the most local adapted is the best".

Per superare il crescente rischio di disadattamento e maladattamento degli alberi forestali (Bradley St Clair et al., 2007), la migrazione assistita e il flusso genico assistito sono stati suggeriti come misure affidabili di gestione adattativa (Aitken e Whitlock, 2013).

Mentre la migrazione assistita mira a facilitare la colonizzazione delle specie arboree forestali in nuovi habitat con un clima adatto, il flusso genico assistito mira alla traslocazione gestita di semi e piantine preadattati all'interno dell'attuale gamma di specie per facilitare un rapido adattamento ai cambiamenti climatici e migliorare le prospettive a lungo termine degli alberi e delle relative comunità.

L'individuazione di alberi potenzialmente adattati, oltre che tramite la selezione fenotipica che richiede tempi lunghi, oggi può essere fatta tramite la selezione genotipica che può essere più veloce. Quest'ultima viene fatta con un metodo indiretto, geni candidati (fig. 1) (Garosi et al., 2022) e GWAS (*genome-wide association study*), che permette di individuare i genotipi che possono essere meglio adattati a stress abiotici ambientali (innalzamento temperatura, stress idrico, ecc.) (fig. 2).

Questi genotipi poi si possono prelevare e/o raccogliere del seme da questi, produrre da questi delle piantine in vivaio da utilizzare poi nel rimboscamento.

Un'altra opzione di gestione è la selvicoltura adattativa (fig. 3), una gestione forestale che favorisca la rinnovazione naturale derivante da libera impollinazione tra individui identificati come meglio adattati tramite il metodo geni candidati e GWAS, favorendo in questo modo il mantenimento/l'aumento della diversità genetica adattativa.

Probabilmente, la migliore gestione in un clima che cambia è la combinazione delle due strategie sopra riportate (Lefèvre et al., 2014). Con il progetto Life SySTEMiC stiamo applicando lo studio di tale combinazione di gestione (Vettori et al., 2021).

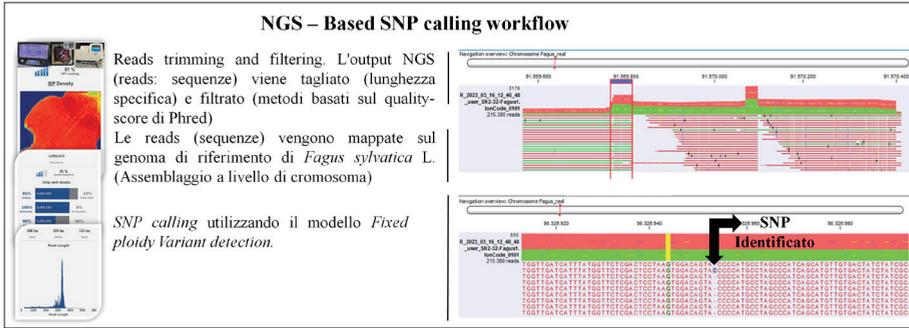


Fig. 1 Utilizzo del NGS (Next Generation Sequencing) per il sequenziamento di un elevato numero di geni potenzialmente adattativi e workflow per le analisi di sequenza e identificazione degli SNPs. Esempio di analisi in «*Fagus sylvatica*» L.

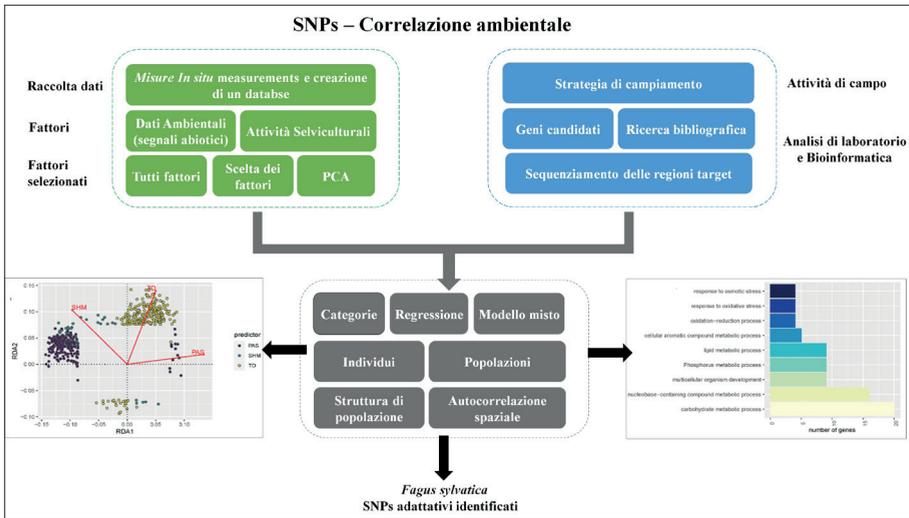


Fig. 2 GWAS («genome-wide association study»): correlazione tra SNPs (polymorphisms) e variabili ambientali con l'identificazione di SNPs adattativi. Esempio di analisi in «*F. sylvatica*» L.

ABSTRACT

The effects of climate change (drought, increase in CO₂ and temperature, etc.) on forests can lead to changes in productivity, intensification of disturbance events, changes in carbon balances, and alterations in species composition; changes which also determine significant variations in the economic value of forests. However, as climate change is expected to will occur much faster than the natural ability of tree species to adapt and migrate, the link between the respective site's climate and local adaptations is at risk of being broken, therefore “local is best” is not the best option, and “the most local adapted

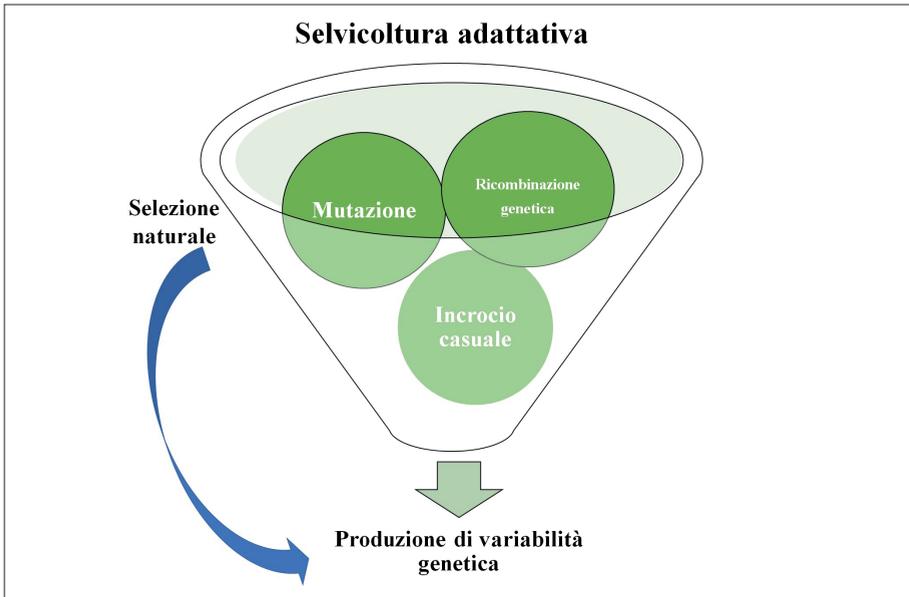


Fig. 3 *La selvicoltura adattativa è un metodo di gestione forestale che favorisce la rinnovazione naturale derivante da libera impollinazione e quindi favorisce il mantenimento o determina l'aumento della variabilità genetica*

is the best” should be considered. The identification of potentially adapted trees, as well as through phenotypic selection which takes a long time, can now be done through genotypic selection which can be faster. The latter is done with an indirect method: candidate genes and GWAS (genome-wide association study) which allows to identify the genotypes that can be better adapted to environmental abiotic stresses (rising temperature, water stress, etc). The best management option is adaptive silviculture, a forest management that favours natural regeneration resulting from free pollination among individuals identified as best adapted through the candidate gene method and GWAS. With the Life SySTEMiC project, we are applying the study of this combination of managements.

BIBLIOGRAFIA

- AITKEN S.N., WHITLOCK M.C. (2013): *Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change*, «Annu Rev Ecol Evol Syst», 44, pp. 67-388.
- AITKEN S.N., YEAMAN S., HOLLIDAY J.A., WANG T., CURTIS-MCLANE S. (2008): *Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations*, «Evol Appl», 1, pp. 95-111.
- ALLEN C.D., MACALADY A.K., CHENCHOUNTI H., BACHELET D., MCDOWELL N., VENNETIER M., KITZBERGER T., RIGLING A., BRESHEARS D.D., HOGG E.H., GONZALEZ P,

- FENSHAM R., ZHANG Z., CASTRO J., DEMIDOVA N., LIM J.-H., ALLARD G., RUNNING S.W., SEMERCI A., COBB N. (2010): *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests*, «For Ecol Manage», 259, pp. 660-684.
- ANDERSSON E., KESKITALO E.C.H., LAWRENCE A. (2017): *Adaptation to climate change in forestry: a perspective on forest ownership and adaptation responses*, «Forests», 8 (12), 493.
- BASTIN J.F., FINEGOLD Y., GARCIA C., MOLLICONE D., REZENDE M., ROUTH D., ZOHNER C.M., CROWTHER T.W. (2019): *The global tree restoration potential*, «Science», 365 (6448), pp. 76-79.
- BOLTE A., AMMER C., LÖF M., MADSEN P., NABUURS G.-J., SCHALL P., SPATHELF P., ROCK J. (2009): *Adaptive forest management in central Europe: climate change impacts, strategies and integrative concept*, «Scand J For Res», 24, pp. 473-482.
- BRADLEY ST CLAIR J., HOWE G.T., ST CLAIR J.B., HOWE G.T. (2007): *Genetic maladaptation of coastal Douglas-fir seedlings to future climates*, «Glob Chang Biol», 13, pp. 1441-1454.
- EUROPEAN COMMISSION (2000): *Council Directive 1999/105/EC of 22 December 1999 on the marketing of forest reproductive material*.
- GAROSI C., FERRANTE R., VETTORI C., PAFFETTI D. (2022): *Meta-Analysis as a Tool to Identify Candidate Genes Involved in the Fagus sylvatica L. Abiotic Stress Response*, «Forests», 13, pp. 159-184.
- GRAINGER A., IVERSON L.R., MARLAND G.H., PRASAD A. (2019): *Comment on "The global tree restoration potential"*, «Science», 366 (6463), 8334.
- GRISCOM B.W., ADAMS J., ELLIS P.W., FARGIONE J. (2017): *Natural climate solutions*, «Proc Natl Acad Sci U S A», 114 (44), pp. 11645-11650.
- HANEWINKEL M., CULLMANN D.A., SCHELHAAS M.-J., NABUURS G.-J., ZIMMERMANN N.E. (2013): *Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land*, «Nat Clim Chang», 3, pp. 203-207.
- IPCC (2018): *Summary for policymakers*, in Global warming of 1.5°C. Intergov Panel Clim Chang.
- JANDL R., SPATHELF P., BOLTE A., PRESCOTT C.E. (2019): *Forest adaptation to climate change is non-management an option?*, «Ann For Sci», 76 (2), 48.
- KEENAN R.J. (2015) *Climate change impacts and adaptation in forest management: a review*, «Ann For Sci», 72, pp. 145-167.
- LEFEVRE F., BOVIN T., BONTEMPS A., COURBERT F., DAVI H., DURAND-GILLMANN M., FADY B., GAUZERE J., GIDOIN C., KARAM M.J., LALAGUE H., ODDOU-MURATORIO S., CICHOT C. (2014): *Considering evolutionary processes in adaptive forestry*, «Annals of Forest Science», 71, pp. 723-739.
- LEWIS S.L., WHEELER C.E., MITCHARD E.T.A., KOCH A. (2019): *Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon*, «Nature», 568 (7750), pp. 25-28.
- MCPFE (1993): *RESOLUTION H1 General guidelines for the sustainable management of forests in Europe*, Second Minist Conf Prot For Eur, 16-17 June, pp. 1-5.
- OSBERGHAUS D., FINKEL E., POHL M. (2010): *Individual adaptation to climate change: the role of information and perceived risk*, «SSRN», Discussion Paper No. 10-061, ftp://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp10061.pdf.
- REYER C., LASCH-BORN P., SUCKOW F., GUTSCH M., MURAWSKI A., PILZ T. (2014): *Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide*, «Ann For Sci», 71, pp. 211-225.
- SAVOLAINEN O., PYHÄJÄRVI T., KNÜRR T. (2007): *Gene flow and local adaptation in trees*, «Annu Rev Ecol Evol Syst», 38, pp. 595-619.

- SEIDL R., THOM D., KAUTZ M., MARTIN-BENITO D., PELTONIEMI M., VACCHIANO G., WILD J., ASCOLI D., PETR M., HONKANIEMI J., LEXER M.J., TROTSIUK V., MAIROTA P., SVOBODA M., FABRIKA M., NAGEL T.A., REYEET C.P.O. (2017): *Forest disturbances under climate change*, «Nat Clim Chang», 7, pp. 395-402.
- VETTORI C. GAROSI C., TRAVAGLINI D., PAFFETTI D. (2021): *Integrare i principi della genetica adattativa: un sistema di risposta ai cambiamenti climatici*, L'Accademia per il Post COVID-19, Supplemento a «I Georgofili. Atti della Accademia dei Georgofili», serie VII, vol. 17, pp 284-289.