



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI AGRARIA

Scuola di Dottorato di Ricerca in
Innovazione Tecnologica per le Scienze Agro-Alimentari e Ambientali
XXIII ciclo

**Valutazione del rinforzo radicale del suolo operato dalle radici
delle principali specie forestali della Lombardia**

Tutor: Prof. **Gian Battista BISCHETTI**
Dipartimento di Ingegneria Agraria, Sezione di Idraulica

Direttore della scuola di dottorato: Prof. **Roberto PRETOLANI**
Dipartimento di Economia e Politica Agraria Agro-Alimentare e Ambientale

Tesi di dottorato di:
Thomas Epis
Matricola n. R07660

Anno Accademico 2009 – 2010

Ringraziamenti

Innanzitutto voglio esprimere la mia sincera gratitudine al Prof. G.B. Bischetti per avermi guidato e sostenuto nel lavoro di ricerca. Un ringraziamento particolare al dott. E. Morlotti, al dott. A.E. Chiaradia, alla dott.ssa C. Vergani, al dott. E. Spelta e a tutte quelle persone dell'Istituto di Idraulica Agraria che mi hanno consigliato e aiutato.

Al Servizio Bacini Montani – Provincia Autonoma di Trento rivolgo la mia riconoscenza per avermi permesso di concludere il percorso di dottorato.

Infine devo un ringraziamento speciale alla mia famiglia che mi ha sostenuto e appoggiato nel corso di tutti questi lunghi anni di studio e di ricerche.

Indice

1	INTRODUZIONE	6
2	GLI EFFETTI DELLA VEGETAZIONE SULLA STABILITÀ DEI VERSANTI	13
2.1	RINFORZO RADICALE DEL TERRENO	15
2.1.1	TEORIA DEL RINFORZO DELLE TERRE	15
2.1.2	MODELLI TEORICI DI RINFORZO RADICALE DEL SUOLO	18
2.1.3	DIMENSIONI DELLE RADICI E LORO INFLUENZA SULLE TIPOLOGIE DI RINFORZO E SUI MECCANISMI DI SFILAMENTO, ALLUNGAMENTO E ROTTURA.	21
2.1.4	TR-RESISTENZA A TRAZIONE DELLE RADICI	23
2.1.5	ROOT AREA RATIO (RAR) – DISTRIBUZIONE DELLE RADICI E DENSITÀ DI RADICAZIONE	25
2.1.6	INFLUENZA DELL'ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO DEL TERRENO, DELL'INCLINAZIONE E DELLA DISTORSIONE DELLE RADICI SULLA COESIONE RADICALE	27
2.1.7	SOVRASTIMA DELLA COESIONE RADICALE - W&W MODEL VS FBM	30
2.1.8	COESIONE RADICALE BASALE E LATERALE	31
2.1.9	COESIONE RADICALE – VARIAZIONE E MODELLI SPAZIALI DEL RINFORZO RADICALE.	32
3	MATERIALI E METODI	35
3.1	SPECIE CONSIDERATE	35
3.2	LOCALIZZAZIONE DEI RILIEVI	40
3.3	SPECIE ANALIZZATE	48
3.4	METODOLOGIE DI CAMPIONAMENTO, DI MISURAZIONE E DI STIMA DELLE GRANDEZZE	51
3.4.1	MISURA DELLA RESISTENZA A TRAZIONE	51
3.4.2	MISURA DELL'AREA RADICATA	53
3.4.3	CALCOLO DELLA COESIONE RADICALE	56
3.5	METODI STATISTICI	57
	RISULTATI	59
3.6	RESISTENZA A TRAZIONE	59
	CONFRONTO DEI VALORI DI T_R DI UNA STESSA SPECIE IN STAZIONI DIVERSE	61
	CONFRONTI T_R TRA SPECIE DIVERSE IN UNA STESSA STAZIONE	67
	CONFRONTO DI T_R TRA SPECIE	71
3.7	AREA RADICATA	76
	ANALISI PER SPECIE	79
	ANALISI PER STAZIONE	84
	CONFRONTO VALORI DI RAR IN FUNZIONE DELLA MORFOLOGIA DEL VERSANTE	88
3.8	COESIONE RADICALE	92
	MODELLO DI W&W	92
	FBM	94
4	DISCUSSIONE E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	105
4.1	RESISTENZA A TRAZIONE	105

CONFRONTO TRA T_R DI UNA STESSA SPECIE IN STAZIONI DIVERSE	105
CONFRONTI TRA T_R DI SPECIE DIVERSE IN UNA STESSA STAZIONE	105
CONFRONTO T_R TRA SPECIE	106
4.2 AREA RADICATA	106
CONFRONTO RAR DI UNA STESSA SPECIE IN STAZIONI DIVERSE	107
CONFRONTO DELLA RAR DI SPECIE DIVERSE IN UNA STESSA STAZIONE	107
CONFRONTO RAR DISPLUVIO-COMPLUVIO	107
4.3 COESIONE RADICALE	108
4.4 CONCLUSIONI	109
5 BIBLIOGRAFIA	111

1 INTRODUZIONE

Da sempre le foreste proteggono l'uomo e i suoi insediamenti dai numerosi pericoli naturali che affliggono il territorio montano, e in particolare dalle frane, dalle alluvioni, dalle colate detritiche, dalle valanghe, ecc. (Sidle et al. 1985; Brang et al. 2001; Cheng et al. 2002; Sidle and Ochiai 2006). Il concetto di bosco di protezione, termine coniato dall'uomo per descrivere i boschi che difendono le comunità antropiche dal dissesto idrogeologico, affonda le proprie radici nella storia. In Europa, fin dal medioevo si possono trovare documenti che attestano come gli antichi fossero a conoscenza dell'importante ruolo protettivo delle foreste e come essi cercassero di tutelarne l'efficacia attraverso degli strumenti di tipo vincolistico (Motta e Haudemann, 2000; Bischetti et al., 2009). Risalgono a questo periodo i numerosi decreti promulgati dalle autorità feudali per vietare il taglio nelle foreste che assicuravano protezione ai villaggi alpini (Dotta e Motta, 2000; Regione Autonoma Valle d'Aosta e Regione Piemonte, 2006). In quei tempi la conservazione dei popolamenti era ricercata attraverso la semplice interdizione dei tagli, e ancora oggi le antiche "bandite" sono talora riconoscibili grazie alla toponomastica o ad un'attenta lettura della struttura dei popolamenti forestali (Regione Autonoma Valle d'Aosta e Regione Piemonte, 2006).

Fin dal quattrocento, anche nelle alpi orientali, la Repubblica di Venezia emanò degli importanti regolamenti volti a salvaguardare il bosco dai tagli indiscriminati (Bischetti, 2003). Bisogna tuttavia attendere il pensiero illuminista e i frutti che esso diede, prima, durante e dopo gli sconvolgimenti della Rivoluzione Francese dell'Impero Napoleonico, per giungere ad una legislazione moderna e organica anche nel campo forestale. Essa, in forme e modalità diverse, trovò espressione in gran parte degli Stati Pre-unitari e, dopo l'unificazione d'Italia, i suoi principi furano alla base dell'assetto legislativo del Regno Sabauda. Solo nel primo dopoguerra tuttavia si approdò alla cosiddetta Legge Forestale o Legge Serpieri (R.D. 30 dicembre 1923, n. 3267 "Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di territori montani"), che riconobbe alla vegetazione forestale un importante ruolo nella prevenzione e mitigazione dei pericoli naturali. Essa, al fine di tutelare la copertura forestale, introdusse il noto "*Vincolo per scopi idrogeologici*" e il meno noto e spesso disatteso "*Vincolo per altri scopi*". Il primo volto alla salvaguardia dei "*terreni di qualsiasi natura e destinazione che, per effetto di forme di utilizzazione contrastanti possono con danno pubblico subire denudazioni, perdere la stabilità o turbare il regime delle acque*" (art. 1 del R.D. 3267 del 1923), e il secondo destinato a preservare "*i boschi, che per la loro speciale ubicazione, difendono terreni o fabbricati dalla caduta delle valanghe, dal rotolamento di sassi, dalla furia dei venti, e quelli ritenuti utili per le condizioni igieniche locali, possono, su richiesta delle Province, dei Comuni o di altri enti e privati interessati, essere sottoposti a limitazione nella loro utilizzazione*" (art. 17 del R.D. 3267 del 1923). Il R.D. n.3267 del 1923 da un lato incorpora al proprio interno quanto maturato nel corso dei secoli nei confronti della gestione e della tutela dei boschi di protezione e dall'altro precorre i tempi proponendo, in particolar modo con l'art. 17, il concetto di bosco di protezione diretta, oggi più che mai attuale. Negli ultimi anni si assiste infatti ad un rinnovato interesse per i boschi protezione. Dal secondo dopoguerra, l'aumento della diffusione degli insediamenti antropici e delle vie di comunicazione nei territori alpini, e la crescente necessità di una maggior sostenibilità economica e ambientale nelle politiche di difesa del suolo hanno portato ad una riscoperta del ruolo protettivo dei popolamenti forestali. In Svizzera, in Austria e più recentemente anche in Francia e in alcune Regioni italiane (ad es. Regione Piemonte e Regione Autonoma Valle d'Aosta), sia a livello legislativo che a livello tecnico, si è cercato di porre una maggiore attenzione all'azione di protezione svolta dai popolamenti forestali. Come base e conseguenza di questa riscoperta, vi è anche una più precisa e corretta definizione di bosco di protezione. Diversi Autori (Schönenberger, 1998 e 2000, Dotta e Motta, 2000, Motta e Haudemann 2000, Lingua et al. 2003, Frehner et al., 2005, Meloni et al., 2005, Meloni et al., 2006, Regione Autonoma Valle d'Aosta e Regione Piemonte, 2006), seppur con sfumature diverse, distinguono tra una protezione generica o indiretta nei confronti dell'erosione e della regimazione delle acque, e

una protezione diretta, che caratterizza le foreste in grado di tutelare l'uomo (insediamenti, attività economiche, vie di comunicazione) dai pericoli naturali (caduta massi, frane superficiali, colate detritiche, valanghe ecc.). Le foreste di protezione diretta così definite traggono fondamento dalla tradizione e trovano un riferimento normativo chiaro e ineluttabile nell'art. 17 del R.D.L. 3267 del 1923. Rispetto al passato questo nuovo concetto di bosco di protezione prevede tuttavia una gestione attiva dei popolamenti, che vada ben oltre la semplice apposizione di un vincolo. Differenza quest'ultima dovuta essenzialmente ai mutamenti socio-economici del Novecento, che videro il passaggio da uno sfruttamento eccessivo delle risorse forestali, da tutelare perlopiù attraverso gli strumenti vincolistici, ad un generalizzato abbandono degli interessi legati al bosco, che è ben testimoniato dalla progressiva espansione delle superfici a macchiatico negativo¹ e dalla conseguente diminuzione delle utilizzazioni. Per tutti i boschi di protezione diretta e in particolare per i popolamenti a macchiatico negativo, sono state condotte ampie ricerche che hanno trovato spazio in manuali di indirizzo tecnico, volti ad indicare le cure minime necessarie per garantirne la continuità (Frehner et al., 2005; Regione Autonoma Valle d'Aosta e Regione Piemonte, 2006).

Se dal punto di vista selvicolturale ed ecologico sono stati delineati dei chiari riferimenti, ancora molti sforzi devono essere compiuti al fine di comprendere i legami tra vegetazione e pericoli naturali, e tra efficacia protettiva e pratiche selvicolturali.

Un ulteriore elemento innovativo introdotto con la revisione concettuale di Foreste di Protezione Diretta risiede nella propensione di quest'ultime ad essere gestite secondo i criteri del rischio² (Bepi et al., 2005; Fischer, 2009), e di conseguenza ad essere inserite nei piani per la gestione del rischio idrogeologico.

Anche con riferimento a questi possibili sviluppi, è necessario approfondire come e in quale misura si esplica il contributo protettivo e come esso possa essere influenzato dai tagli, siano essi intercalari o di utilizzazione.

La particolare attenzione verso l'azione di salvaguardia del territorio offerta dai boschi non è un'esclusiva dei paesi dell'arco alpino. In Giappone, Taiwan, Stati Uniti sono almeno 100 anni che ci si rivolge alla vegetazione forestale al fine di ottenere un'adeguata protezione dai pericoli naturali (Cheng et al., 2002; Sakals et al., 2006). Ciononostante è in Europa, dove l'uomo da secoli ha colonizzato i territori montani e dove da secoli vive a stretto contatto con i pericoli naturali, che si è assistito alla nascita di discipline che vanno oltre la semplice conservazione delle foreste di protezione e che si pongono l'ambizioso obiettivo di prevenire, contrastare e mitigare gli effetti dei fenomeni alluvionali, dei processi erosivi e franosi, delle colate di detrito e di fango e delle valanghe (Puglisi 2003). Esse assunsero il nome di "Restauration de Terrains en Montagne" in Francia, di "Wildbach und Lawinenverbauung" in Austria e Germania, e di "Sistemazioni idraulico-forestali" in Italia (Bischetti et al., 2009). Antiche e numerose sono le tracce documentali di dispositivi per il contenimento delle erosioni sui corsi d'acqua montani (Puglisi 2003), tuttavia la prima definizione di una strategia organica di contrasto ai fenomeni di dissesto sembra essere quella contenuta nel "Discorso al serenissimo Cosimo III Granduca di Toscana" di Vincenzo Viviani (Bischetti e D'Agostino, 2010) in cui già verso la fine del seicento si indicava, per risolvere i problemi che affliggevano il fiume Arno, la combinazione di opere biologiche e ingegneristiche nei

¹ Il valore di macchiatico di un popolamento forestale rappresenta il risultato economico ottenuto, in condizioni di "ordinarietà", dal bilancio parziale dell'attività di utilizzazione forestale, mettendo a confronto il ricavato della vendita degli assortimenti legnosi (attivo) con i costi necessari per le tutte le operazioni di trasformazione (passivo) (Brun et al., 2009).

² Il rischio è la probabilità che si verifichino conseguenze negative (per la vita umana, per i beni e le risorse, per le attività economiche e per l'ambiente) derivanti dall'interazione tra la dinamica di eventi naturali e le aree antropizzate. Convenzionalmente il rischio (R) è espresso come prodotto della pericolosità (P) per il danno atteso (D) (Regione Autonoma Valle d'Aosta e Regione Piemonte, 2006). La pericolosità indica la probabilità che una data area possa essere interessata da un pericolo caratterizzato da una certa intensità. Il danno atteso esprime invece la combinazione del valore d'uso dei beni che possono essere interessati dai pericoli naturali (abitazioni, aree industriali, aree agricole, ecc.) e della loro vulnerabilità (propensione a subire dei danni degli elementi esposti al pericolo).

bacini di monte: *“Dico esser mio parere che (oltre a rinnovare gli antichi bandi, e ridurre a più esatta osservanza le proibizioni del taglio de’ boschi sull’Alpi) [...] si andassero dal piè de’ lor fondi su su verso i loro principj, disponendo, e fabbricando, in aggiustate distanze fra loro, più Serre o Chiuse, o Leghe, o Traverse, che dir si vogliano, di buon muro a calcina, traforate da spesse feritoie, su larga pianta stabilmente fondate, e con grandissima scarpa al di fuori, [...] Con tali serre verrebbe moderata la pendenza di quelle Valli [...] Fabbricate, e ricalzate queste chiuse, si dovrebbe su per esse Valli, in que’ luoghi ove già non fossero, fare diverse e folte piantate di bosaglia o da fuoco, o da taglio [...] provvedendo, qui ancora, con pene, alla conservazione perpetua dei boschi, i quali però debbano sempre restare a domini de’ loro veri Padroni”*. (Viviani, 1687).

Quanto maturato da Viviani (1687) si ritrova due secoli dopo in Francia, dove si era formato un discreto corpo di letteratura sull’argomento dei dissesti montani e sui sistemi per porvi rimedio e dove vide la luce l’opera di Prosper Demontzey (1882), che grande successo ottenne anche al di fuori dai confini francesi. Tant’è che essa influenzò, grazie alle traduzioni in lingua tedesca di Athur von Seckendorff, le altre grandi scuole sistematorie che stavano fiorendo in Austria, in Svizzera e in Germania. Anche l’Italia fu poi contagiata dal germe che in Italia era nato. Tra i principali *“untori”* vi furono alcuni ingegneri del Genio Civile, che dopo un viaggio nei paesi alpini confinanti pubblicarono una memoria dal titolo *“Sulla sistemazione dei bacini montani in Svizzera, Austria e Carinzia”* (Tornani et al., 1894). Essi restarono tanto impressionati dalle sistemazioni compiute negli altri paesi alpini da sostenere che *“Per ottenere la sistemazione vera e completa di un bacino montano, i lavori di rimboschimento e quelli nell’alveo del torrente devono fondersi completamente, ed aiutarsi a vicenda, anzi gli uni devono essere fatti per gli altri e viceversa”*. Nelle sistemazioni montane, il fortunato sodalizio tra opere e vegetazione non si esaurisce con il proficuo mutualismo che le unisce e le accomuna. La vegetazione stessa è nella tradizione sistematoria più classica, un eccellente materiale per la costruzione delle opere e un elemento spesso imprescindibile per la stabilizzazione dei versanti e delle aste torrentizie. Già l’articolo 12 del tuttora vigente D.M. 20 agosto 1912 *“Approvazione delle norme per la preparazione dei progetti di lavori di sistemazione idraulico-forestale nei bacini montani”* dispose che nei lavori di sistemazione montana sono *“da impiegare i materiali rustici del sito, pietre, legnami, chiedendo alla forza di vegetazione i materiali viventi per il consolidamento dei terreni, ricorrendo anche a opere miste di legname e sasso”*. È chiaro che l’utilizzo della vegetazione nelle sue varie forme era anzitutto un’esigenza, dettata dalla scarsità dei mezzi tecnici ed economici, e da quel regime autarchico che ancor prima del ventennio fascista contraddistingueva le economie delle regioni montane. La rivoluzione tecnica che portò ad avere mezzi meccanici sempre più performanti e la disponibilità di calcestruzzo e altri materiali a prezzi accessibili hanno consentito la realizzazione di nuove tipologie di opere, che si sono evolute nel tempo per poter meglio fronteggiare le molteplici forme del dissesto montano. Sebbene ciò abbia rappresentato un indiscutibile progresso nel campo delle sistemazioni, l’approccio originario, che faceva della vegetazione, sia in termini di copertura forestale che in termini di materiale da costruzione, un elemento cardine per una corretta difesa del suolo, è sopravvissuto ai profondi cambiamenti del Novecento. Questo tipo di impostazione ha infatti prevalso nelle sistemazioni montane italiane per quasi un secolo e, pur con le dovute evoluzioni e diversificazioni, continua ad essere quello più utilizzato nella maggiore parte dei paesi dell’arco alpino. Alla fine dell’ottocento, quando le sistemazioni idraulico-forestale andavano acquisendo un rango di vera e propria disciplina, nel mondo di lingua tedesca, i movimenti sociali e culturali più attenti ai danni provocati dallo sviluppo urbano e industriale più disordinato, influenzarono il pensiero tecnico-sistematorio, al punto che si crearono i presupposti per la nascita di una nuova materia, che assunse, a partire dagli anni cinquanta del secolo scorso, il nome tedesco di *Ingenieurbiologie* (Di Fidio, 2008). Essa vide da subito la realizzazione di opere in grado di svolgere azioni di tipo statico ed estetico-paesaggistico, dove con paesaggio si intende far riferimento alla sua accezione biologico-naturalistica. In altre parole essa può essere considerata come una sorta di snodo, o meglio di raccordo, tra le sistemazioni idrauliche e montane e la

costruzione del paesaggio, inteso anche in senso naturalistico (Bischetti e D'Agostino, 2010). Su queste basi, una delle definizioni di Ingegneria Naturalistica più esaustive è quella di Von Kruedener, il padre della *Ingenieurbiologie*, citata da Schiechl e Stern (1992, 1994): l'ingegneria naturalistica (o bioingegneria forestale) *“E' una tecnica costruttiva ingegneristica, che si avvale di conoscenze biologiche nell'eseguire costruzioni in terra e idrauliche e nel consolidare versanti e sponde instabili. Per questo scopo è tipico l'impiego di piante e di parti di piante, messe a dimora in modo tale, da raggiungere, nel corso del loro sviluppo, sia da sole, come materiale da costruzione vivo, sia in unione con materiale da costruzione inerte, un consolidamento duraturo delle opere. L'ingegneria naturalistica non si deve intendere come sostituzione, ma come necessaria e razionale integrazione delle modalità costruttive meramente tecniche”*. Da questa definizione emerge come sia da ritenersi assolutamente scorretto, da una parte attribuire la definizione di ingegneria naturalistica a tutte le opere costruite utilizzando vegetazione e materiale naturale secondo lo spirito “autarchico” che ha dato origine alle SIF, e dall'altra considerare opere di ingegneria naturalistica quelle che, pur avendo una finalità “naturalistica”, non usano la vegetazione con finalità di stabilizzazione (Bischetti e D'Agostino, 2010). Un compromesso, non da tutti condiviso, è quello di indicare i lavori che vedono l'utilizzo di vegetazione viva ai fini sistematori come interventi di Sistemazione idraulico-forestale con tecniche di ingegneria naturalistica. Risalendo alle definizioni delle due discipline si coglie l'essenza della sostanziale diversità che le separa: le SIF si pongono l'obiettivo di contrastare o prevenire i pericoli naturali, eventualmente utilizzando anche le piante vive o parti di esse, mentre l'Ingegneria naturalistica si propone di consolidare versanti e sponde con l'impiego della vegetazione.

Una volta che l' *Ingenieurbiologie* si diffuse nel resto dell'Europa il suo recepimento non fu sempre semplice e scontato. Quanto maturato nel mondo di lingua tedesca non aveva chiari riferimenti scientifici e tecnici negli altri paesi del continente, al punto che in molte realtà non fu pienamente compreso il nuovo messaggio dell' *Ingenieurbiologie* (Bischetti e D'Agostino, 2010). In Italia si può a ragione sostenere che l'accoglimento dei principi dell' *Ingenieurbiologie* non abbia sempre avuto dei risvolti positivi. Nei casi più estremi essa venne ignorata oppure presa a riferimento quale nuovo paradigma delle SIF, con conseguenti gravi danni per la difesa del territorio montano. Ancora oggi il quadro appare alquanto confuso, anche e soprattutto a livello normativo dove ad esempio l'Allegato A del DPR 25 gennaio del 2000 n. 13 inserisce tra gli interventi di ingegneria naturalistica anche quelli ai fini faunistici, botanici, zoologici, ecc. Sia le SIF che l'ingegneria naturalistica si rivolgono tuttavia alla vegetazione per ottenere, in complementarietà con interventi di tipo strutturale, l'estinzione dei dissesti d'alveo o di versante. Esse pertanto richiedono al mondo scientifico di spendere maggiori risorse per comprendere e quantificare gli effetti che la vegetazione esercita nei confronti dei processi idrologici, idraulici e meccanici, sia d'alveo che di versante.

Un'introduzione tanto ampia da abbracciare argomenti e materie all'apparenza così distanti è giustificata dal voler nobilitare il lavoro di ricerca svolto. Solo partendo dal contesto tecnico, legislativo e filosofico nel quale si inserisce la ricerca se ne può comprenderne l'essenza e il vero valore. Quanto qui presentato è chiaramente un piccolo tassello che si inserisce in un più ampio quadro di ricerche finalizzate alla quantificazione del contributo della vegetazione nella prevenzione e mitigazione dei pericoli naturali, e nel caso specifico nella prevenzione delle frane superficiali. Gli sviluppi degli studi che in questo filone confluiscono consentiranno di determinare il contributo protettivo dei popolamenti forestali, e gli effetti che su di esso hanno gli interventi selvicolturali. Le ricadute pratiche sono facilmente intuibili: una maggior conoscenza dell'efficacia protettiva delle foreste e dei suoi cambiamenti a seguito dei tagli permetterà di tutelare e gestire meglio le foreste con funzioni di protezione. Si avranno così maggiori elementi per il rilascio delle autorizzazioni alla trasformazione di coltura delle aree assoggettate al vincolo idrologico. Qualcosa di simile avviene già presso la Provincia Autonoma di Trento dove l'ufficio “Vincolo Idrogeologico” utilizza, seppur a titolo puramente informativo, la piattaforma “FRAGILE”; questo strumento permette di associare ai singoli popolamenti un valore della funzione protettiva, determinato con riferimento ai processi idrologici e meccanici che agiscono sulla stabilità dei

versanti e sulla formazione delle piene. In un'ottica simile, i risultati presentati in questo lavoro già si prestano ad essere utilizzati in modelli di tipo geomeccanico a parametri spazialmente distribuiti (Wu e Sidle, 1995; Pack et al., 1997; Chiaradia e Bischetti, 2004; Istanbuluoglu et al., 2004), che permettono di ottenere il valore di sicurezza dei versanti di un territorio tenendo conto anche dell'azione di rinforzo del suolo operata dalle radici. Un approfondimento degli effetti dei tagli sul ruolo protettivo consentirà inoltre una revisione delle Prescrizioni di Massima e di Polizia Forestale, anch'esse legate al Vincolo idrogeologico, e un più accorto rilascio delle autorizzazioni al taglio.

Le Foreste di Protezione Diretta (FPD) potranno trarre sicuro beneficio dagli ulteriori studi che saranno condotti in questo campo. In futuro è auspicabile si possa associare alle FPD un valore analitico che ne esprima l'efficacia protettiva. Un traguardo ambizioso ma raggiungibile è inoltre rappresentato dal poter affiancare, agli ottimi riferimenti bibliografici di stampo selvicolturale, anche delle indicazioni tecniche utili a consentire, compatibilmente con le esigenze ecologiche degli ecosistemi forestali, dei tagli rispettosi dell'efficacia protettiva. Tutto ciò in vista anche del possibile inserimento delle cure minime per la continuità delle FPD all'interno di politiche per la gestione del rischio idrogeologico più economiche e sostenibili.

Le Sistemazioni idraulico-forestali e l'Ingegneria Naturalistica, dai frutti delle ricerche svolte in questo settore, si attendono sia delle indicazioni tecniche per il miglior impiego della vegetazione ai fini sistematori, sia una più profonda comprensione dei processi, che possa in ultimo sfociare in veri e propri schemi di calcolo. Ciò sarebbe particolarmente utile per poter mettere in campo gli interventi classici di sistemazione montana, che richiedono l'utilizzo della vegetazione, con maggior responsabilità e consapevolezza.

Se si pensa a quanto suggerito da Tornani et al. (1894) ci si accorge che, quando si parla di Sistemazioni idraulico-forestali, non è possibile relegare il bosco ad un ruolo subalterno, ed anzi ad esso occorre riservare un posto di prim'ordine se si vuole che un'organica sistemazione di un bacino abbia successo. Con questo spirito, nel 2007, l'allora Istituto di Idraulica Agraria dell'Università degli Studi di Milano, nella figura del Prof. Gian Battista Bischetti, ha proposto alla Regione Lombardia – D.G. Agricoltura il progetto di ricerca SISIFO, che ha trovato un positivo accoglimento presso le strutture regionali e che è stato pertanto finanziato con i fondi del programma delle ricerche del periodo 2007-2009. Tale progetto, il cui acronimo sta per SISistemazioni Idraulico-Forestali dei Bacini Montani, rappresenta il contesto operativo e finanziario nel quale è stato possibile, oltre ad approfondire specifiche tematiche legate alla pianificazione, progettazione ed esecuzione delle SIF, studiare e indagare i meccanismi di rinforzo dei terreni offerti dalle radici delle principali specie forestali della Lombardia.

Nella presente tesi vengono sintetizzati parte dei risultati del Progetto SISIFO, ed è pertanto ovvio che nel testo vi siano numerosi richiami al progetto e alle ricerche del gruppo del Prof. Bischetti.

Nell'ambito del lavoro ci si è concentrati sulla quantificazione del contributo delle foreste nella prevenzione delle frane superficiali, che sono molto frequenti nei territori prealpini e alpini della Lombardia. Questi fenomeni possono da soli rappresentare un grave pericolo per i beni ad essi più prossimi e, a scala di bacino, attraverso l'alimentazione solida dei torrenti, possono creare i presupposti per la formazione di fenomeni di colata detritica o di trasporto iperconcentrato. In prossimità degli impluvi, dove il deflusso ipodermico è maggiore e dove di conseguenza il rischio di franamento è più elevato, i dissesti superficiali possono inoltre facilmente evolvere in vere e proprie colate detritiche, determinando in questo caso l'innescare dei fenomeni stessi. Ecco perché risulta importante studiare queste particolari tipologie di frane che, proprio per la loro natura (superficialità, esigue estensioni, ecc.), si prestano ad essere controllate con un'accorta selvicoltura o attraverso dei puntuali interventi di sistemazione.

La tesi si inserisce in un ampio contesto scientifico che ricomprende tutte le ricerche svolte per la quantificazione dell'azione di prevenzione e mitigazione dei movimenti franosi svolta dalle foreste. Sebbene in termini di principio il contributo della vegetazione nella difesa del territorio sia noto ormai da tempo, la quantificazione degli effetti positivi ad essa attribuibili è una sfida piuttosto recente. La funzione protettiva forestale nei confronti dei franamenti superficiali si esplica

attraverso i processi sia di natura idrologica che di natura meccanica. Dal punto di vista idrologico, la copertura forestale agisce sulla stabilità dei versanti attraverso i processi di infiltrazione, intercettazione ed evapotraspirazione. Con riferimento all'infiltrazione, la presenza della vegetazione comporta un miglioramento delle caratteristiche strutturali dei terreni, che favoriscono l'ingresso e il movimento dell'acqua all'interno del suolo, a discapito della resistenza al taglio dei versanti e a favore di un aumento delle forze di taglio (De Ploey, 1981). In questo primo caso gli effetti sulla stabilità dei versanti sono ovviamente negativi mentre, al contrario, l'intercettazione e l'evapotraspirazione giocano a favore di un incremento del fattore di sicurezza del pendio. Il primo processo non consente alla totalità delle precipitazioni di giungere a terra e di conseguenza influenza la quantità di acqua che può infiltrarsi. Il secondo processo determina anch'esso una riduzione del contenuto idrico del suolo, con conseguenti effetti positivi sia in termini di resistenza al taglio (riduzione delle pressioni neutre) che di tensioni di taglio (riduzione del peso del terreno) (Bischetti 2003). L'assorbimento di acqua da parte delle radici, inoltre, crea un potenziale matriciale negativo che si aggiunge alla resistenza al taglio sotto forma di pseudocoazione (da alcuni kPa fino ad alcune decine di kPa; Gray, 1977).

Dal punto di vista meccanico molteplici sono gli effetti dettati dalla presenza della vegetazione. Di questi alcuni contribuiscono alla stabilità (rinforzo radicale del suolo, effetto contrafforte) mentre altri ne causano una riduzione (sovraccarico, effetto leva del vento, fessurazione). Tale rinforzo può essere ricondotto a due tipologie di meccanismi. Il primo riguarda le radici di grosse dimensioni che intercettano il piano di scorrimento e che possono agire come dei tiranti (Bischetti et al., 2009). La seconda tipologia di rinforzo è propria delle radici più sottili e flessibili che grazie all'attrito con il terreno riescono ad aumentare la resistenza del materiale composito "suolo-radici". In entrambi i casi il rinforzo operato dalle radici può manifestarsi attraverso la rottura, lo sfilamento oppure il semplice allungamento degli elementi radicali. Sebbene entrambe le forme di rinforzo si prestano ed essere quantificate con l'utilizzo di appositi modelli (Gray e Laiser, 1982; Morgan e Rickson, 1995; Greenwood, 2006), che possono essere impiegati proficuamente solo se opportunamente parametrizzati, le principali ricerche finora condotte si sono concentrate sulla seconda tipologia di rinforzo, che è comunemente espressa come una coazione radicale aggiuntiva (Burroughs e Thomas, 1977; Wu et al., 1979; Riestenberg e Sovonick-Dunford, 1983; Wu, 1984; Sidle et al., 1985; Sidle, 1992; Wu e Sidle, 1995; Abernethy e Rutherford, 2001; Bischetti, 2001; Schmidt et al., 2001; Bischetti et al., 2002).

Dopo i primi studi di Schiechl (1958) e Endo e Tsuruta (1969), diversi Autori hanno profuso molti sforzi nel tentativo di approfondire le conoscenze relative all'azione di rinforzo radicale del suolo (Schmidt et al. 2001; Roering et al. 2003; Sakalas e Sidle 2004; Bischetti et al. 2005; Norris 2005; Van Beek et al. 2005; Tosi 2007; De Baets et al. 2008; Normaniza et al. 2008; Norris et al. 2008a; Sun et al., 2008). Molto è stato fatto in Nord America, in Asia e Oceania (Nilaweera e Nutalaya, 1999; Schmidt et al., 2001; Roering et al., 2003; Normaniza et al., 2008) e, nonostante recentemente numerose ricerche siano state condotte anche in Europa (Bischetti et al., 2005; Norris, 2005; Van Beek et al., 2005; Tosi, 2007; De Baets et al., 2008), ancora molto deve essere compiuto al fine di poter quantificare il contributo stabilizzante delle specie forestali delle Prealpi e delle alpi italiane. Con il fine di colmare almeno in parte questo vuoto, nel presente lavoro sono state prese in considerazione le seguenti specie forestali: *Acer pseudoplatanus*, *Alnus incana*, *Castanea sativa*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Fraxinus ornus*, *Larix decidua*, *Ostrya carpinifolia*, *Picea abies* e *Robinia pseudoacacia*.

Le indagini hanno visto la raccolta di radici da sottoporre a prove di trazione e l'apertura di trincee, simili ai classici profili pedologici, con l'intento di caratterizzare le diverse specie sia sotto il profilo della resistenza a trazione sia con riferimento alla densità di radicazione, che è espressione del numero, dei diametri e della distribuzione delle radici nel suolo. Sulla base dei risultati così ottenuti è stata infine calcolata la coazione radicale. Prendendo in esame i valori di resistenza a trazione, di densità di radicazione e di coazione radicale sono stati inoltre condotti numerosi confronti al fine di

far emergere l'esistenza di differenze significative tra le diverse specie o tra i valori di queste grandezze appartenenti ad ambienti differenti.

2 Gli effetti della vegetazione sulla stabilità dei versanti

La vegetazione influenza la stabilità dei versanti attraverso dei processi sia idrologici che meccanici. Concentrando l'attenzione sui processi di tipo meccanico, si possono individuare cinque differenti meccanismi (Gray e Leiser, 1982):

1. Sovraccarico;
2. Fessurazione;
3. Effetto leva del vento;
4. Effetto contrafforte;
5. Rinforzo radicale del suolo.

Il **sovraccarico**, dovuto alla presenza della vegetazione, può avere azioni contrastanti nei confronti della stabilità dei versanti, a seconda della geometria e della pendenza dei pendii, e in relazione alla dimensione degli alberi e allo loro posizione lungo il versante (Gray and Meghan, 1981; Styczen e Morgan, 1995; cit. Docker, 2003). In genere, tuttavia, prevalgono gli effetti negativi, che sono particolarmente gravosi quando le chiome degli alberi trattengono ingenti precipitazioni liquide o nevose (Bischetti, 2003). Bishop e Stevens (1964) stimano che il sovraccarico non superi alcuni kPa, in accordo con Wu et al. (1979). Secondo Gray (1977), in boschi di *Pseudotsuga menziesii* di altezze superiori a 60 m, esso può invece raggiungere valori ragguardevoli, superiori a 70 kPa.

Il processo detto di **fessurazione**, invece, comporta delle conseguenze prevalentemente di stampo negativo. Le radici nella loro crescita possono infatti causare la formazione di fessurazioni e fratture, che riducono la resistenza del substrato. Ciò può avere degli effetti particolarmente negativi in presenza di un substrato di natura lapidea (Bischetti, 2003).

L'**effetto leva del vento** si esprime soprattutto in presenza di forti correnti d'aria che impattando sulla chioma trasferiscono, attraverso il tronco, notevoli tensioni alla zolla radicale. Nei casi più estremi, essi possono portare allo sradicamento dell'albero e alla conseguente formazione di punti preferenziali per l'insediarsi di successivi dissesti.

Per quanto riguarda l'**effetto contrafforte**, gli alberi, se tenacemente ancorati agli strati più profondi del suolo, possono configurarsi come dei piloni (Gray e Leiser, 1982, cit. Docker 2003; Bischetti 2003), in grado di sostenere la porzione di versante ad essi sovrastante.

Entrando nel dettaglio, se un albero presenta, al di sotto del colletto, un cilindro verticale costituito da una o più radici in grado di garantirne l'efficace ancoraggio, la forza che agisce al contatto tra suolo e apparato radicale, secondo la teoria sviluppata da Wang e Yen (1974, cit. Docker 2003), può essere calcolata con la seguente espressione:

$$P = \frac{K_0}{2} D_r \gamma z^2 + (K_0 \gamma z - p B z) \quad \text{Equazione 1}$$

Dove:

K_0 : coefficiente di pressione laterale del suolo;

D_r : diametro del cilindro suolo-radici;

γ : massa-volumica del suolo;

p : pressione laterale media del suolo;

z : profondità del piano di scivolamento;

B : distanza tra i "piloni" (Figura 1).

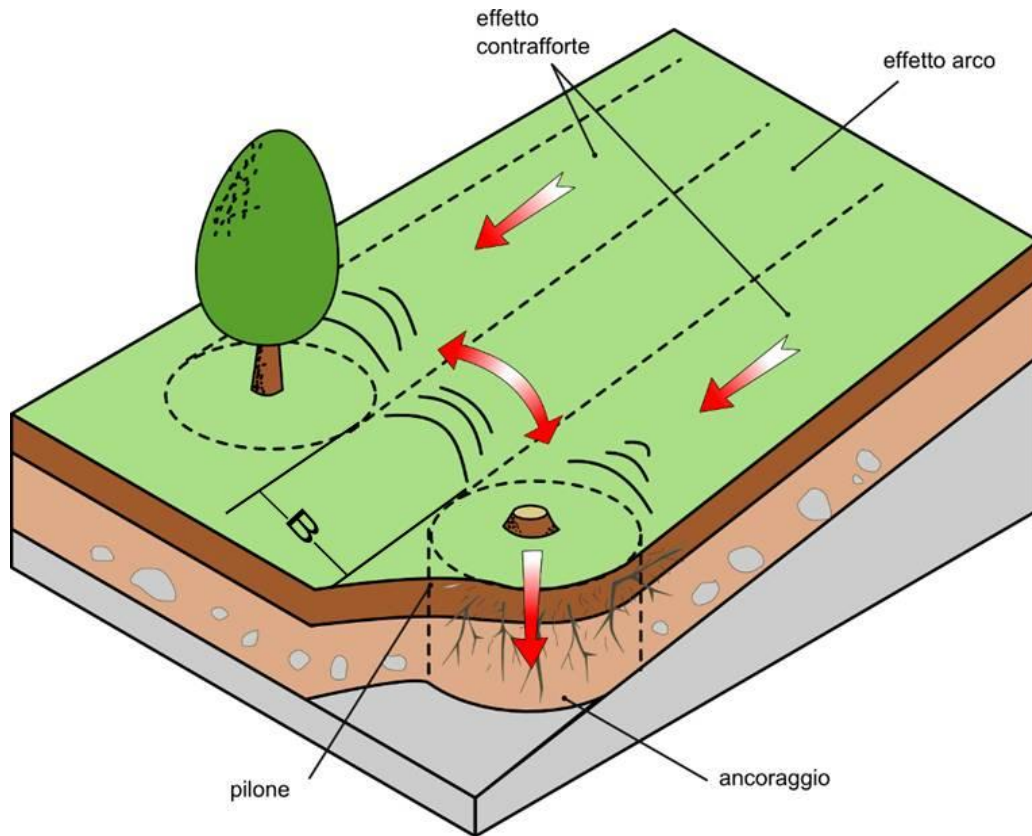


Figura 1. Schema dell'effetto contrafforte e dell'effetto arco (Bischetti et al., 2010)

Se i singoli alberi sono sufficientemente vicini anche la parte di pendio che non grava direttamente su di essi può beneficiare della loro azione stabilizzante, attraverso un effetto denominato “arco”. Questo fenomeno è fortemente influenzato dalla profondità del piano di scivolamento, dall'interdistanza dei “piloni” e dalle caratteristiche del terreno (Docker, 2003). La massima distanza tra gli apparati radicali che determina la presenza o l'assenza dell'effetto arco può essere calcolata con riferimento a quanto proposto da Wang & Yen (1974) cit. Docker 2003:

$$B_{crit} = \frac{zK_0(K_0 + 1)\tan\phi + \frac{2c}{\gamma}}{\cos\beta(\tan\beta - \tan\phi_1) - \frac{c_1}{\gamma z \cos\beta}} \quad \text{Equazione 2}$$

dove:

β : angolo d'inclinazione del versante;

c, ϕ : coesione e angolo di resistenza al taglio del terreno compreso tra il piano campagna il piano di scivolamento;

c_1, ϕ_1 : coesione e angolo di resistenza al taglio del terreno posto al di sotto del piano di scivolamento.

Benché non vi sia un corpo di letteratura ben definito sul tema dell'effetto arco, alcuni studi sono stati condotti da Riestenberg e Sovonick-Dunford (1983) cit. Docker (2003), da Thorne (1990) cit. Docker (2003) e da Gray (1977), quest'ultimo ha trovato che suo il contributo può raggiungere valori dell'ordine di alcuni kPa.

2.1 Rinforzo radicale del terreno

Come indicato nell'introduzione, il rinforzo meccanico apportato dagli apparati radicali presenti nel suolo può esprimersi attraverso due differenti vie. La prima coincide con l'effetto tirante che è proprio delle radici di maggiori dimensioni che raggiungono e oltrepassano il piano di scivolamento, e che talora possono insinuarsi nelle fratture delle rocce e così comportarsi come dei veri e propri tiranti. Le radici possono in questo caso sfilarsi o rompersi e il prevalere di uno dei due fenomeni dipende dalla tipologia del substrato (terre, rocce, ecc.) o dalla lunghezza e dalle caratteristiche morfologiche e meccaniche delle radici (Riestenberg, 1994 cit. Docker 2003; Gray e Sotir, 1996; Bischetti 2003). Il secondo meccanismo è riconducibile all'azione di rinforzo assicurata dagli elementi radicali più sottili e flessibili, che grazie all'attrito con il terreno, contribuiscono all'aumento della resistenza del materiale composito "suolo-radici". Tale meccanismo è meglio descritto nei paragrafi successivi.

In entrambi i casi, il rinforzo dipende dalle caratteristiche delle terre e del substrato roccioso. Secondo Tsukamoto e Kusakabe (1984), il massimo contributo meccanico si ha in presenza di un potente strato d'alterazione che può essere facilmente penetrato dalle radici (Figura 2 c). Un discreto rinforzo si manifesta dove la roccia è fratturata e ben disposta all'accoglimento degli elementi radicali (Figura 2 b), mentre livelli inferiori di rinforzo si hanno se la roccia è compatta (Figura 2 a) o se il suolo, pur essendo intensamente radicato, è molto profondo al punto tale che l'apparato radicale è troppo distante dal sottostante piano di scivolamento per poter efficacemente contribuire alla stabilità del versante (Figura 2 d).

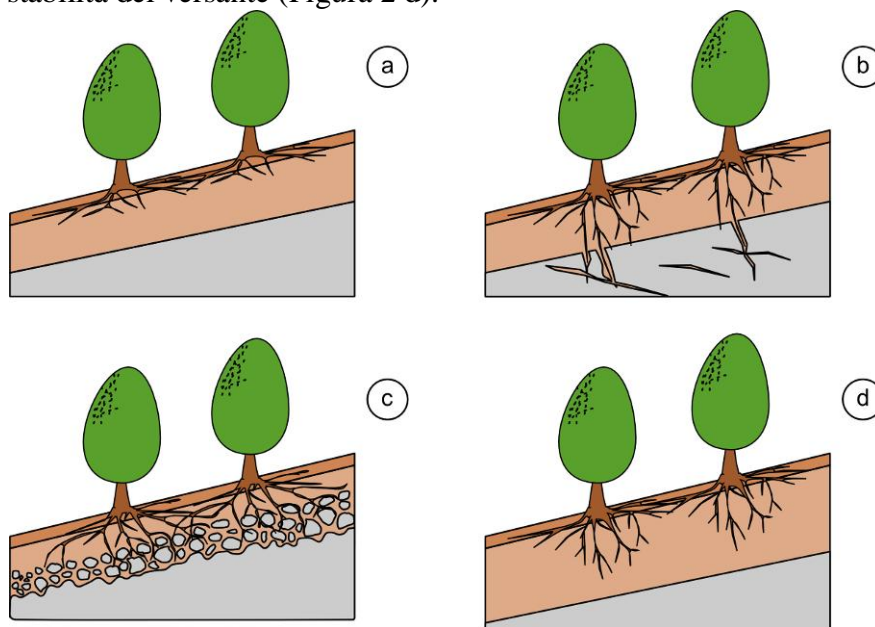


Figura 2. Tipologie di rinforzo radicale dei versanti (modificato da Tsukamoto e Kusakabe, 1984 in Bischetti et al. 2010).

2.1.1 Teoria del rinforzo delle terre

Il terreno è resistente alla compressione ma debole alla tensione, viceversa le radici resistono alla tensione ma non alla compressione. La combinazione delle radici e del suolo produce un materiale composito suolo-radici che è più resistente dei singoli elementi che lo costituiscono. In un materiale di questo tipo le radici si fanno carico di parte degli sforzi di taglio (shear stresses) presenti nel suolo e, secondariamente, consentono una benefica redistribuzione degli sforzi, prevenendo in questo modo l'insorgere di rotture di tipo progressivo (Docker 2003).

Importanti studi nel campo delle terre rinforzate sono stati condotti da Vidal (1969, cit. Docker, 2003). Egli ha mostrato che quando ad un elemento di terreno non confinato è applicato uno sforzo verticale, σ , esso si deforma lateralmente (Figura 3). Se all'elemento vengono aggiunti dei rinforzi sotto forma di fibre orizzontali allora il movimento laterale, indotto dalla tensione verticale, genera delle forze d'attrito tra il suolo e gli elementi di rinforzo. In questo modo, all'interno delle fibre, si sviluppano delle forze di resistenza a trazione che si traducono in sforzi di confinamento laterale del terreno. Tali sforzi sono simili a delle pressioni di confinamento applicate dall'esterno e sono proporzionali allo sforzo normale di confinamento applicato all'elemento, perlomeno fino al raggiungimento ad un livello di confinamento critico "critical confining stress" (Long *et al.*, 1972, cit. Docker, 2003). Da ciò si evince che l'azione di rinforzo si esprime in una anisotropa riduzione o soppressione degli sforzi normali deformativi. Questo meccanismo di soppressione degli sforzi conduce al concetto di coesione anisotropa.

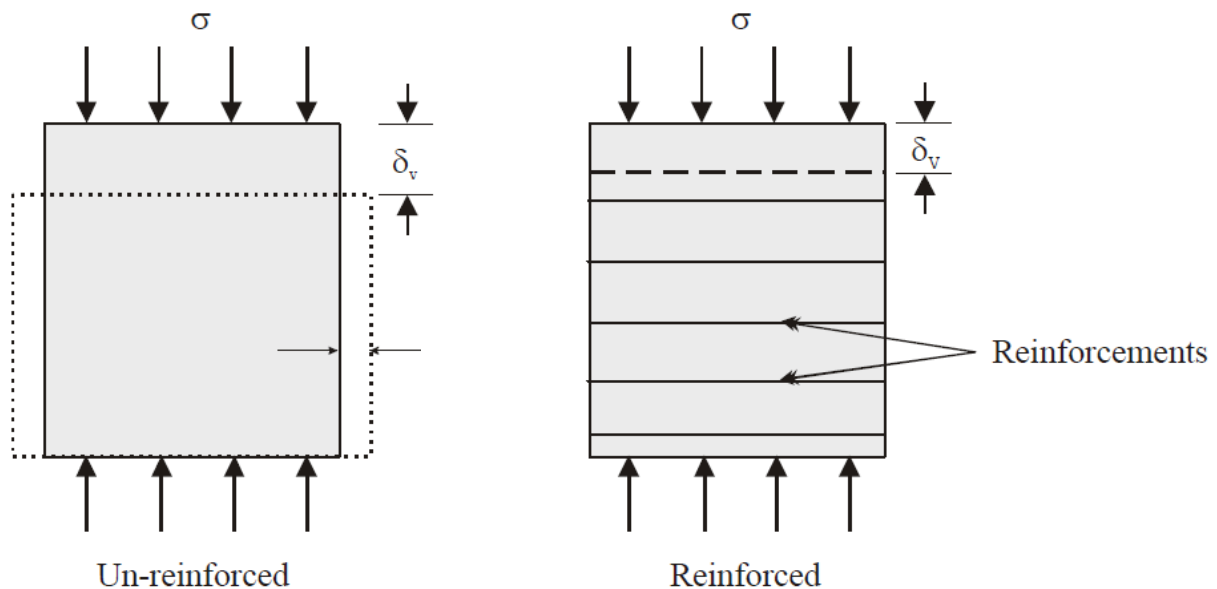


Figura 3. Azione degli elementi di rinforzo in un campione di terreno (Gray & Leiser, 1982 cit. Docker, 2003).

Long *et al.* (1972) cit. Docker 2003, studiando lo sforzo di confinamento critico e le modalità di rottura di campioni di sabbia rinforzati con fibre, hanno osservato che per valori superiori allo sforzo di confinamento critico, gli elementi tendono a rompersi piuttosto che a sfilarsi; viceversa, al di sotto del valore critico, prevalgono i processi di sfilamento su quelli di rottura. Essi mostrano inoltre, che sopra la soglia critica gli "sforzi di confinamento equivalenti" cessano di crescere. Gli stessi Autori hanno infine scoperto che i risultati degli involucri a rottura dei campioni di sabbia, siano essi rinforzati che privi di elementi di rinforzo, hanno lo stesso angolo di resistenza al taglio. Il meccanismo di rinforzo si propone pertanto come una resistenza aggiuntiva che si presta ad essere rappresentata come una coesione anisotropa. Schlosser & Long (1973, cit. Ingold, 1982 cit. Docker 2003) sostengono le osservazioni di Long *et al.* (1972, cit. Docker 2003) e propongono un'espressione per la coesione anisotropa:

$$c' = \frac{T\sqrt{K_p}}{2h} \quad \text{Equazione 3}$$

c' : coesione anisotropa;
 T : resistenza a trazione;
 K_p : coefficiente di spinta passiva;
 h : interdistanza tra elementi verticali.

Sotto il livello critico i legami terreno-elementi di rinforzo vengono meno e di conseguenza si verificano dei fenomeni di sfilamento. Se si assume, come è stato fatto per questi esperimenti, che l'attrito lungo il rinforzo è proporzionale allo sforzo di confinamento normale applicato allora si può ritenere si verifichi, fino al raggiungimento del valore critico, un aumento dell'angolo di attrito interno dei campioni di terreni rinforzati (Figura 4). Dove l'angolo di attrito interno può essere determinato nel seguente modo (Hausmann, 1976, cit. Docker 2003):

$$\sin \phi'_r = \frac{K_a - F - 1}{F - K_a - 1} \quad \text{Equazione 4}$$

ϕ'_r : angolo di attrito interno dei campioni di terreno rinforzati;
 K_a : coefficiente di spinta attiva delle terre;
 F : resistenza sviluppata dalle radici in corrispondenza del piano di taglio.

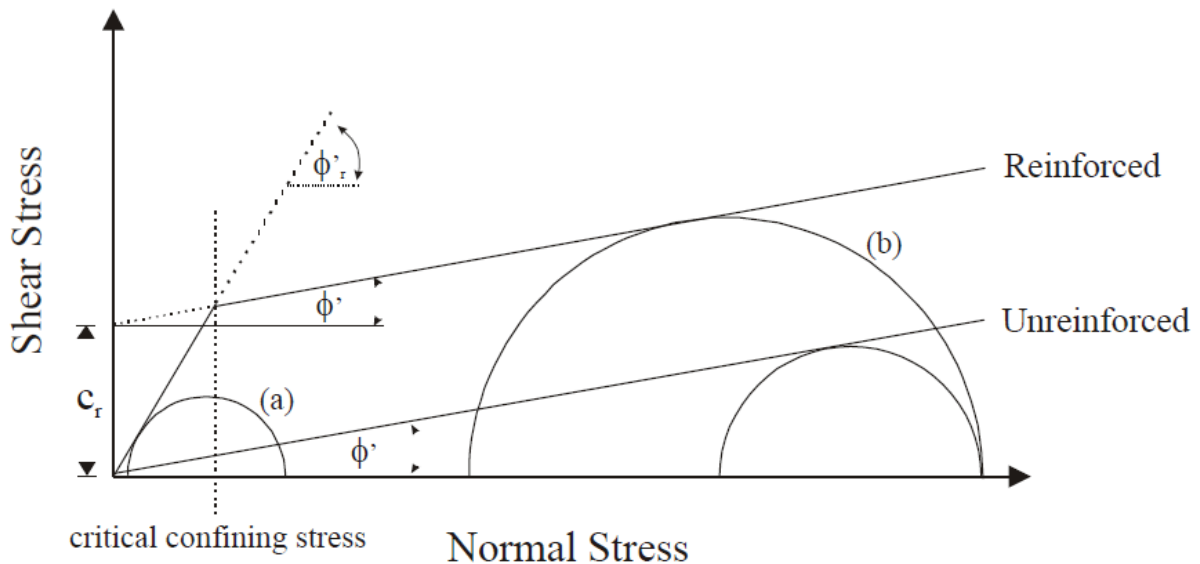


Figura 4. Cerchi di Mohr-Coulomb per terreni con e senza rinforzi (da Gray e Ohashi, 1983 cit. Docker 2003)

La teoria delle terre rinforzate si presta ad essere applicata ai terreni radicati. Gli studi che vengono condotti in questo campo generalmente partono dal presupposto che la presenza delle radici non influenza l'angolo di attrito interno dei terreni (Endo e Tsurata, 1969; O'Loughlin, 1974; Waldron, 1977; Gray e Megahan, 1981; Waldron e Dakessian, 1981; O'Loughlin et al., 1982; Riestenberg e Sovonick-Dunford, 1983; Abernethy e Rutherford, 2001 cit. Docker 2003, Zhang et al. 2010). Tale presupposto trova fondamento nel ritenere che gli sforzi di confinamento nel terreno sono superiori al "critical confining stress", e da ciò ne consegue che, per una data lunghezza delle radici, l'attrito suolo-elementi radicale, proporzionale allo sforzo normale, sia tale da prevenirne lo sfilamento. L'assunzione di un'invarianza dell'angolo di attrito interno può essere sostenuta solo se la zona di taglio è larga a sufficienza da consentire l'allungamento e la deformazione degli elementi radicali,

solo così si ha infatti la mobilitazione della loro resistenza a trazione. Se la zona di taglio è molto sottile (pochi millimetri) le radici tendono viceversa a rompersi secondo un processo di taglio diretto (Burroughs & Thomas, 1977 cit. Docker 2003).

Gli studi compiuti con riferimento alle terre rinforzate dimostrano come il rinforzo presente nei terreni radicati sia opportunamente riconducibile ad un aumento della coesione apparente del suolo, che varia in proporzione alla concentrazione delle radici (Docker, 2003).

2.1.2 Modelli teorici di rinforzo radicale del suolo

È noto che il rinforzo radicale dei terreni dipende dalla resistenza delle radici e dalla loro densità e distribuzione all'interno del suolo (Wu, 1976; Waldron, 1977; Ziemer, 1981).

La valutazione di questo rinforzo, in termini di coesione radicale, può essere ottenuta mediante delle prove di taglio, in situ (Docker e Hubble, 2008; Fan e Su, 2008; Comino e Druetta, 2009; Comino e Druetta, 2010) oppure in laboratorio (Pollen e Simon, 2005; Zhang et al., 2010). Un'altra strada, seguita da diversi autori (Wu, 1995; Bischetti et al., 2004; Schwarz et al., 2010a), prevede l'utilizzo di metodologie di "back analysis", che a ritroso, partendo da versanti già interessati da un franamento, consente di stimare la coesione radicale. Recenti studi, seguendo un approccio di tipo modellistico, hanno inoltre impiegato il metodo degli elementi finiti per rappresentare in modo dettagliato i meccanismi di rinforzo, espressi sempre in termini di coesione radicale, sia in sistemi tridimensionali (Wu, 2005; Kokutse et al., 2006 cit. Schwarz et al. 2010b) che bidimensionali (Van Beek et al., 2005; Danjon et al., 2008; Genet et al., 2008 cit. Schwarz et al., 2010b).

Una via più generale per la quantificazione del rinforzo radicale è rappresentata dal modello di Wu (1976) e Waldron (1977), d'ora in poi definito dalla sigla W&W. Il modello W&W, grazie all'analisi del comportamento delle radici durante i processi di taglio dei terreni, consente di stimare opportunamente la coesione radicale. Nonostante recentemente siano stati proposti nuovi e più complessi modelli (Ekanayake e Phillips, 1999; Frydman e Operstein, 2001; Pollen e Simon, 2005), lo schema W&W, data anche la sua semplicità, rimane un punto di riferimento per la stima della coesione radicale. Il modello W&W può essere facilmente incorporato in modello per la verifica della stabilità dei versanti, come termine aggiuntivo, nell'equazione della resistenza dei terreni di Mohr-Coulumb:

$$S_{sr} = c + \sigma \tan \phi + S_r \quad \text{Equazione 5}$$

S_{sr} : resistenza complessiva del terreno;

c : coesione;

Φ : angolo di resistenza al taglio;

σ : tensione efficace verticale;

S_r : rinforzo radicale.

Nello specifico, il modello di Wu (1976) e Waldron (1977) parte del presupposto che se una forza di taglio è applicata ad un terreno, gli elementi radicali, grazie anche all'azione vincolante delle forze d'attrito presenti all'interfaccia suolo-radici, si deformano secondo lo schema indicato in Figura 5.

Tale deformazione consente il manifestarsi della resistenza a trazione delle radici, che può essere scomposta in una componente tangenziale e in una componente normale al piano di taglio. La componente tangenziale si oppone direttamente al taglio mentre la componente verticale incrementa la forza normale:

$$F_T = T_r \sin \theta \quad \text{Equazione 6}$$

$$F_N = T_r \cos \theta \quad \text{Equazione 7}$$

dove θ è l'angolo di distorsione della radice dovuta al taglio e T_r è la resistenza a trazione mobilizzata dall'elemento.

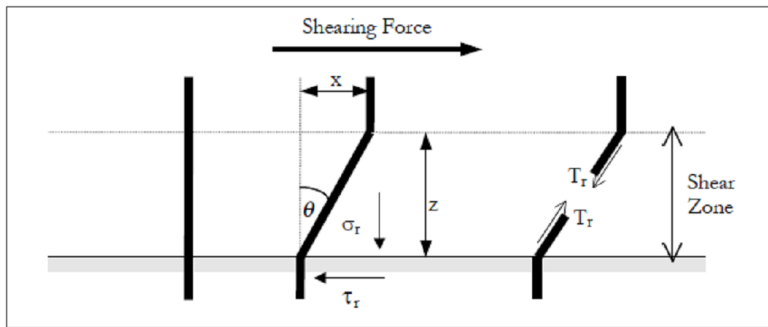


Figura 5. Schema del rinforzo radicale e di scomposizione della resistenza a trazione secondo il modello di Wu (1976) e Waldron (1977) (Docker, 2003).

Alla luce della possibile scomposizione della resistenza a trazione, la coesione radicale può quindi essere espressa come:

$$C_r = t_r (\cos \theta \tan \phi + \sin \theta) \quad \text{Equazione 8}$$

dove: ϕ angolo di resistenza al taglio e t_r resistenza alla trazione media mobilizzata per unità di area del suolo. Il valore di t_r viene determinato con l'equazione:

$$t_r = T_r (A_r / A) \quad \text{Equazione 9}$$

con T_r resistenza media della trazione mobilizzata per unità di area occupata dalle radici e A_r/A rapporto di area radicata (RAR), cioè la frazione di sezione trasversale di terreno (A) occupata dalle radici (A_r).

Qualora vi sia una conoscenza delle dimensioni delle radici allora si può riscrivere l'equazione 8 in una forma più generale, che tiene conto anche della variabilità diametrica degli elementi radicali:

$$c_r = \sum_{i=1}^N (T_r a_r)_i \quad \text{Equazione 10}$$

dove T_r e a_r sono rispettivamente la resistenza a trazione e l'area radicata della i -esima classe diametrica.

La semplicità del modello ne è al contempo sia un punto di forza che di debolezza. Se da un lato il suo largo impiego è legato proprio alla sua essenzialità, dall'altro il suo utilizzo presuppone l'adozione di drastiche semplificazioni, che non sempre trovano riscontro nelle pratica. Di queste le principali possono essere così riassunte:

- le radici sono assunte come elementi cilindrici;
- le radici sono linearmente elastiche;
- le radici si estendono attraverso la superficie di taglio in direzione perpendicolare ad essa;
- l'angolo di resistenza al taglio non viene influenzato dalla presenza degli elementi radicali;

Recentemente, per la stima della coesione radicale, molti Autori (Pollen e Simon, 2005; Simon et al., 2006; Pollen, 2007; Bischetti et al., 2009; Hales et al., 2009; Pollen-Bankhead e Simon, 2009, Spelta et al., 2009; Mickovski et al., 2010; Loades et al., 2010; Schwarz et al., 2010a; Schwarz et al., 2010b; Thomas e Pollen, 2010) hanno utilizzato dei modelli riconducibili al formalismo matematico dei Fiber Bundle Model (modelli “a fascio di fibre”).

Lo schema originario dei Fiber Bundle Model (FBM) è stato delineato da Daniels (1945) e successivamente questi modelli sono stati utilizzati per lo studio del comportamento di molti materiali compositi (Hemmer et al., 2007; Kun et al., 2007; Raischel et al., 2008).

Nella sua forma più semplice il formalismo dei FBM considera la presenza di un fascio di fibre parallele, caratterizzate da una propria resistenza. Quando al fascio viene applicato un carico esso viene suddiviso tra le fibre e, se la quota spettante ad un dato elemento eccede la sua resistenza, allora esso si rompe. A questo punto il carico viene ridistribuito tra le restanti fibre, che possono anch'esse incorrere in una rottura determinato in questo modo la prosecuzione del fenomeno di collasso. Il processo si arresta o con la distruzione completa del materiale o con il raggiungimento di una condizione di equilibrio. In quest'ultimo caso le fibre rimanenti riescono a sostenere il carico applicato (Bischetti et al., 2009).

I FBM possono essere suddivisi in base ai differenti elementi che guidano le dinamiche di carico e rottura.

Un primo importante aspetto riguarda il criterio utilizzato per ridistribuire il carico a seguito di una rottura. Una prima via è rappresentata da una ridistribuzione “democratica” tra tutte le fibre intatte (*Equal Load Sharing*, ELS, o *Global Load Sharing*, GLS); una seconda strada prevede una distribuzione localizzata del carico (*Local Load Sharing*, LLS), che interessa solo le fibre prossime agli elementi che via via si rompono (Bischetti et al., 2009).

Un secondo elemento che discrimina tra diverse tipologie di FBM riguarda la dipendenza dal tempo della resistenza delle fibre. I modelli *statici* assumono un'invarianza delle caratteristiche del materiale al trascorrere del tempo, mentre quelli *dinamici* prendono in considerazione il comportamento “a fatica” del materiale e il possibile indebolimento delle fibre con il trascorrere del tempo di applicazione del carico.

L'impiego dei Fiber Bundle Model (FBM) per la determinazione della coesione radicale presuppone di assumere le singole radici come elementi appartenenti ad un fascio di fibre.

La scarsa conoscenza degli effettivi meccanismi di rinforzo radicale dei terreni spesso portano, inevitabilmente, a delle doverose semplificazioni che conducono alla scelta di modelli GLS (Bischetti et al., 2009; Thomas e Pollen, 2010) di tipo statico (Bischetti et al., 2009).

Un altro importante aspetto che deve essere considerato per un corretto impiego dei FBM nella determinazione del rinforzo radicale riguarda le modalità di distribuzione del carico tra le radici. Secondo Thomas e Pollen (2010) esistono almeno tre metodi:

- il carico viene suddiviso equamente senza tener conto dei diametri delle radici e di conseguenza della loro resistenza, in accordo con lo schema originario di Daniels (1945);
- il carico viene ripartito in base al diametro delle radici (Pollen e Simon, 2005);
- il carico è distribuito sulla base dell'area delle radici (Hidalgo et al., 2001 cit. Thomas e Pollen, 2010).

Essi, attraverso delle simulazioni con il metodo Monte Carlo, hanno osservato che se il carico è applicato equamente le radici sottili tendono a rompersi prima di quelle più grosse. Viceversa se il carico è distribuito in base al diametro o all'area delle radici, cioè ricercando una equa ripartizione della tensione (stress), allora le radici più grosse precedono quelle sottili nel processo di rottura. Studi di campo e di laboratorio (ad es. Pollen e Simon, 2005) mostrano che prima si rompono gli elementi radicali sottili e solo successivamente si ha la rottura degli elementi di maggiore diametro. Ne consegue che nella stima della coesione radicale è opportuno privilegiare un'uniforme distribuzione del carico (Thomas e Pollen, 2010), poiché essa è più vicina alla realtà. Particolare

attenzione va posta nella scelta del metodo perché l'adozione di una modalità di ripartizione al posto di un'altra può portare a differenze nella valutazione del rinforzo dell'ordine del 60% (Thomas e Pollen, 2010).

Schwarz et al. (2010a) hanno perfezionato il modello proposto da Pollen e Simon (2005). Essi hanno scelto di applicare all'ipotetico fascio di fibre un allungamento al posto di una tensione, con l'accortezza di adottare un modulo di elasticità che dipende dal diametro. Tale approccio è stato poi implementato e migliorato nel Root Bundle Model messo a punto da Schwarz et al. (2010b), che addirittura introduce una relazione tra elasticità delle radici e loro allungamento.

2.1.3 Dimensioni delle radici e loro influenza sulle tipologie di rinforzo e sui meccanismi di sfilamento, allungamento e rottura.

Una classificazione delle radici molto utilizzata distingue tra radici sottili e radici di grosse dimensioni (Santantonio, 1990; Tobin et al., 2007 cit. Schwarz et al., 2010b). Le prime hanno diametri minori a 1-2 mm e, pur costituendo solo il 5% delle biomassa di un albero, garantiscono il 90% dell'approvvigionamento di acqua e minerali (Schwarz et al., 2010b).

Esse sono solitamente elementi di terzo ordine del sistema gerarchico di ramificazione dell'apparato radicale. In altre parole questi elementi radicali si diramano dalle radici di secondo ordine con l'intento di esplorare il suolo e al fine di garantire l'assorbimento di quanto necessario alla pianta. All'interno della classe ulteriori suddivisioni sono state proposte, soprattutto in relazione alle caratteristiche topologiche e di ramificazione (Majdi et al., 2005; Zobel, 2005; Wang et al., 2006; Borja et al., 2008 cit. Schwarz et al. 2010b). La distribuzione delle radici sottili dipende dalla crescita e dalla morte dei singoli elementi e dell'elevato turnover che le contraddistingue (Majdi et al., 2005; Borja et al., 2008 cit. Schwarz et al., 2010b). Tutti questi fenomeni sono fortemente influenzati dalle condizioni locali (Johnsen et al., 2005 cit. Schwarz et al. 2010b) e stagionali (Joslin e Wolfe, 1998; Joslin et al., 2000 cit. Hales et al., 2009). Pregitzer et al. (2002 cit. Schwarz et al., 2010b) suggeriscono addirittura che il loro ciclo di vita sia simile a quello degli altri elementi decidui di una pianta, come ad esempio le foglie. Alcuni Autori (Hales et al., 2009) suppongono l'esistenza di un legame tra andamento meteorologico stagionale e numero, dimensione e resistenza delle radici più sottili. Se ciò fosse vero, considerato che le radici sottili rappresentano il 95% dell'apparato radicale di albero, si può pensare che la coesione radicale possa subire dei profondi mutamenti anche in relazione ai fattori meteorologici.

Le radici di grosse dimensioni (diametro maggiore di 2 mm) rappresentano circa il 15-20% della biomassa di un albero e nel loro sviluppo sono condizionate dalla tipologia di apparato radicale (fittonante, cuoriforme o superficiale). Esse hanno prevalentemente un ruolo strutturale e possono essere di primo ordine, se si diramano dal tronco, o di secondo ordine se traggono origine da quelle primarie (Zobel, 2005 cit. Schwarz et al., 2010b). Date le loro dimensioni, rispetto a quelle sottili, sono meno influenzate dai fattori locali e stagionali e dalla competizione intraspecifica. In alcuni casi, queste radici, seppur provenienti da piante diverse, possono interagire e dar vita ad un strato continuo di suolo radicato (Faser et al., 2005 cit. Schwarz et al., 2010b).

Dopo questa panoramica sulle dimensioni delle radici e sul ruolo che rivestono all'interno del sistema "albero", è possibile entrare nel merito dei meccanismi di sfilamento, allungamento e rottura.

Il modello di Wu (1976) e Waldron (1977) assume che le radici siano saldamente ancorate al suolo, al punto da non poter incorrere in fenomeni di sfilamento. Da prove di taglio in laboratorio e in campo si è tuttavia osservato (Docker, 2003), come del resto accade anche per altri materiali compositi, che le radici possono comportarsi secondo tre differenti meccanismi (Coppin e Richards, 1990 cit. Pollen e Simon 2005; Gray e Barker, 2004; Preti, 2006; Mickovski et al., 2010; Bischetti et al., 2010):

- rottura: la radice contribuisce completamente al rinforzo; viene infatti mobilizzata l'intera forza a trazione il cui valore corrisponde alla resistenza a rottura.
- allungamento: la radice si deforma secondo una direzione principale; la resistenza a trazione mobilizzata è parziale e il suo valore è determinato dall'allungamento e dal modulo di Young, E.
- sfilamento: le radici, soprattutto se di lunghezza ridotta, vengono sfilate mobilizzando solo una piccola parte della resistenza a trazione.

La prevalenza di un meccanismo sugli altri è dettata da una serie di fattori, tra cui le variazioni delle proprietà della matrice (i.e. umidità) e la geometria degli elementi radicali (Beaudoin, 1990 cit. Pollen e Simon, 2005). Di questo avviso è anche Pollen (2007) che ha osservato come in suoli coesivi in condizioni asciutte le radici tendono a rompersi, mentre in condizioni di elevata umidità esse si sfilano.

Più in generale, per indurre uno sfilamento, è necessario che i legami radice-terreno vengano rotti (Ennos, 1990) e la forza richiesta per provocare tale rottura dipende dall'estensione della superficie radicale a contatto del suolo e dalle proprietà del terreno (Waldron e Dakessian, 1981):

$$F_p = SL2\pi r \quad \text{Equazione 11}$$

F_p : forza di sfilamento (N)
 S: resistenza al taglio del terreno (kPa)
 L: lunghezza della radice (m);
 r: raggio della radice (m).

Dove la lunghezza delle radici può essere stimata con l'espressione (Waldron e Dakessian, 1981):

$$L = Rr^g \quad \text{Equazione 12}$$

R e g sono costanti che possono assumere valori variabili ($0.5 < g < 1.0$; $200 < R < 1000$) in funzione di una serie di fattori, tra cui, ad esempio, la specie e le condizioni ambientali.

Da ciò si evince che quando l'attrito suolo-radici è superiore alla loro resistenza a trazione allora esse si rompono, viceversa esse si sfilano.

Alcuni autori (Pollen e Simon, 2005; Pollen, 2007), mettendo in relazione il comportamento delle radici (sfilamento – rottura) con il loro diametro, hanno osservato che gli elementi più piccoli tendono a sfilarsi mentre quelli più grossi tendono a rompersi.

La soglia che discrimina i due meccanismi, come detto in precedenza, dipende dalla specie e delle caratteristiche del suolo. Pollen (2007), Pollen-Bankhead e Simon (2009) e Schwarz et al. (2010a), per particolari condizioni e con riferimento ad alcune specie, hanno individuato tale soglia e hanno sviluppato degli appositi algoritmi in grado di tener conto di entrambi i processi nella determinazione del rinforzo radicale. Altri Autori (Reubens et al., 2007; Bischetti et al., 2009), focalizzandosi unicamente sul contributo offerto dal processo di rottura, hanno preso in considerazione solo le radici con diametro maggiore di 1 mm, sebbene non vi siano delle chiare evidenze in merito a questa soglia diametrica

Con riferimento al fenomeno di allungamento, le conoscenze relative all'elasticità e al modulo di Young sono molto preziose ai fini della quantificazione della resistenza a trazione delle radici, e del materiale composito nel suo complesso (Mickovski et al., 2007 cit. Schwarz et al., 2010b). Tuttavia, scarse sono le informazioni sull'argomento, di queste, le principali, sono riconducibili ai lavori di

Commandeur e Pyles (1991), Operstein e Frydman (2000), Tosi (2007), Fan e Su (2008) cit. Schwarz et al. 2010b. Alcuni Autori (Commandeur e Pyles, 1991, cit. Schwarz et al. 2010b) hanno inoltre messo in luce come la tortuosità delle radici possa influenzare il modulo di Young, determinandone una riduzione addirittura del 60% (Commandeur e Pyles, 1991 cit. Schwarz et al., 2010b). Sottoposte a trazione esse prima tendono a raddrizzarsi, senza che vi sia un trasferimento di sforzi ai tessuti, e, successivamente, una volta che la tortuosità dell'elemento viene meno, si allungano mettendo così in gioco la loro elasticità.

Si è visto che esiste una soglia diametrica minima che separa i meccanismi di sfilamento e rottura. Allo stesso modo esiste anche una soglia diametrica massima che discrimina tra i processi di rinforzo del suolo riconducibili al formalismo dei materiali compositi e quelli che ricadano sotto il nome di "effetto tirante". Coppin e Richards (1990 cit. Docker, 2003) mostrano come tale soglia può coincidere con un diametro di 20 mm. Per il calcolo del rinforzo radicale, gli stessi Autori escludono le radici aventi dimensioni maggiori della soglia indicata poiché ritengono che il loro contributo, seppur importante, non possa essere espresso dal modello di W&W.

Il limite indicato non ha tuttavia chiari e univoci riscontri negli studi di campo citati a suo sostegno (e.g. Burroughs e Thomas, 1977; O'Loughlin e Watson, 1979 cit. Docker, 2003). Inoltre ci sono molti esempi che testimoniano come anche radici con diametro minore di 20 mm possano agire come tiranti, crescendo e sviluppandosi all'interno delle discontinuità di un substrato compatto o roccioso (e.g. Swanston, 1970; Swanston e Dyrness, 1973; Riestenberg, 1994 cit. Docker 2003). Riguardo alla soglia indicata O'Loughlin e Watson (1979 cit. Docker (2003) suggeriscono un valore di 30 mm mentre altri Autori (Burroughs e Thomas (1977) cit. Docker 2003), Tosi 2007, Bischetti et al., 2009), per il calcolo della coesione radicale, propongono o utilizzano un valore di 10 mm.

2.1.4 *Tr-resistenza a trazione delle radici*

La resistenza a trazione delle radici dipende principalmente dalla specie e dal diametro (Bischetti et al., 2009). Molti autori (Burroughs e Thomas, 1977; Abe e Iwamoto, 1986; Gray e Sotir, 1996; Nilaweera e Nutalaya, 1999; Abernethy e Rutherford, 2001, Norris, 2005; Bischetti et al., 2005; Genet et al., 2005; Simon et al., 2006; Tosi, 2007; Docker e Hubble, 2008; Fan e Su, 2008; Genet et al., 2008; Bischetti et al., 2009; Mickovski e Van Beek, 2009; Genet et al., 2010; Hubble et al., 2010; Loades et al., 2010; Mickovski et al., 2010), con riferimento ad una singola specie, hanno espresso il legame tra resistenza a trazione e diametro nel seguente modo:

$$T_r = ad^{-b} \quad \text{Equazione 13}$$

Con:

T_r : resistenza a trazione (MPa);

d : diametro (mm);

a e b parametri specie dipendenti (Bischetti et al. 2005).

Tuttavia alcune ricerche (Hathaway e Penny, 1975; Zhou et al., 1998; Schmidt et al., 2001) hanno proposto altre forme di relazione tensione-diametro, e non mancano inoltre gli studi che evidenziano l'esistenza di differenze significative anche all'interno di una stessa specie (Hathaway e Penny, 1975; Genet et al., 2005 e 2006; De Baets et al., 2008; Abdi et al., 2009).

I valori di T_r sono affetti da una grande variabilità ovvero la deviazione standard è dello stesso ordine di grandezza dei valori medi (Bischetti et al., 2000), e ciò è dovuto all'influenza che i fattori genetici e ambientali hanno sullo sviluppo degli elementi radicali. Tra i fattori ambientali, il vento, l'esposizione, la pendenza, la morfologia dei versanti e la posizione delle radici rispetto al tronco (a monte o a valle) giocano un ruolo determinante sulla resistenza a trazione delle radici. Con riferimento a quest'ultimo punto pare che le radici che si trovano a monte dell'albero siano più

resistenti di quelli poste a valle, in quanto si ritiene che la gravità abbia un'importante influenza sulla loro crescita e sulla loro resistenza (Schiechtl, 1980; Bache e MacAskill, 1984; Gray e Barker, 2004 cit. Preti, 2006).

Parimenti l'età (Genet et al., 2005), il tasso di crescita, la tessitura, la struttura orizzontale e verticale dei popolamenti, le variazioni dell'umidità e dei nutrienti nel suolo possono anch'essi contribuire alle grande variabilità del fenomeno (Pollen e Simon, 2005). I risultati di studi condotti per comprendere gli effetti dell'età e della struttura dei popolamenti sulla stabilità dei versanti (Genet et al., 2010) mostrano che la resistenza a trazione è maggiore nei popolamenti maturi.

Un importante impulso a queste ricerche è stato dato da Genet et al. (2005). Essi hanno messo in relazione la resistenza a trazione con il contenuto in cellulosa e hanno scoperto che vi è un netto legame tra i due fattori. Gli stessi Autori hanno inoltre scoperto che la quantità di cellulosa in una radice è espressione delle caratteristiche locali dell'ambiente.

La spiegazione di come la cellulosa possa avere degli effetti sulla resistenza delle radici risiede nella forma e struttura delle fibre del polimero, presenti all'interno degli elementi radicali. Le radici di piante arboree sono perenni e contengono lo xilema che è il principale tessuto per il trasporto dell'acqua (Hales et al., 2009). All'interno dello xilema le pareti cellulari presentano delle microfibrille di cellulosa che sono le maggiori responsabili della resistenza a trazione. In funzione dell'età e dei fattori ambientali accanto alla cellulosa può comparire anche la lignina, che provoca un irrigidimento delle pareti cellulari e una conseguente perdita di resistenza (Hales et al., 2009). Le radici più grosse hanno una minore percentuale di cellulosa se paragonate alle radici più sottili perché esse sono prevalentemente riserve di carboidrati e tessuti di immagazzinamento di resine o di sostanze tossiche (Guo et al., 2004 cit. Hales et al. 2009). In accordo con un progressivo aumento di lignina con la crescita del diametro e con una conseguente diminuzione del rinforzo, alcuni Autori (Genet et al., 2005; Hales et al., 2009) hanno riscontrato che vi è un aumento della percentuale di cellulosa al decrescere del diametro.

Nel solco delle ricerche tracciato da Genet et al. (2005), Hales et al. (2009) hanno inoltre scoperto che le radici provenienti da zone di displuvio sono più resistenti di quelle cresciute nelle aree di compluvio. Più nel dettaglio essi hanno osservato che il contenuto medio di cellulosa nelle zone di compluvio è del 20% inferiore di quello delle radici provenienti dai displuvi, con picchi del 40% per le radici più sottili. Ciò suggerisce l'esistenza di un legame tra i fattori topografici e la resistenza a trazione. I dati di Hales et al. (2009) mostrano come il contenuto di cellulosa e il rinforzo aumentino con la riduzione dell'umidità del suolo, suggerendo così una relazione tra il contenuto idrico del suolo e l'architettura dei tessuti radicali.

La maggior quantità di cellulosa riscontrata in presenza dei displuvi rispetto ai compluvi può essere anche il risultato dell'azione delle forze gravitazionali o di stress meccanici (Hales et al., 2009). Le creste, le sommità dei versanti e più in generale tutti i displuvi presentano maggiori pendenze e sono bersagliati da forze eoliche di magnitudo più elevata rispetto alle zone di accumulo delle acque (Dupuy et al., 2005 cit. Hales et al. 2009), siano esse impluvi o compluvi. A supporto di quanto indicato, nelle specie legnose, i tessuti xilematici soggetti a sforzi gravitazionali o meccanici hanno infatti valori del rapporto lignina/cellulosa minori, rispetto ai tessuti non interessati da stress (Hales et al., 2009). Le osservazioni di Hales et al. (2009) rappresentano un importante contributo per una maggior comprensione dei meccanismi di resistenza a trazione degli elementi radicali.

Le radici sottili, inoltre, rispondono rapidamente, nell'anno o nel corso della stagione, ai cambiamenti ambientali e sono quindi molto sensibili alle variazioni del potenziale dell'acqua nel suolo (Joslin e Wolfe, 1998; Joslin et al., 2000 cit. Hales et al., 2009). Secondo Hales et al. (2009), esiste un legame tra posizione topografica, andamento meteorologico stagionale e coesione radicale. Ciò può trovare fondamento nella variazione, in relazione alle precipitazioni, del numero, delle dimensioni e della resistenza delle radici più sottili. Per specie forestali, anche Bache e MacAskill (1984 cit. Preti 2006) hanno trovato una dipendenza della resistenza a trazione dall'andamento stagionale.

2.1.5 Root Area Ratio (RAR) – distribuzione delle radici e densità di radicazione

Molti sforzi sono stati compiuti per analizzare l'architettura, la distribuzione e la densità delle radici (McMinn, 1963; Böhm, 1979; Keyes e Grier, 1981; Libundgut, 1981; Glinski e Lipiec, 1990; Watson e O'Loughlin, 1990; Sainju e Good, 1993; Paar, 1994; Kramer e Boyer, 1995; Jackson et al., 1996; Danjon et al., 1999 cit. Bischetti et al., 2005; Danjon et al., 2005; Dupuy et al., 2005; Fan e Cheng, 2010), tuttavia, ancora molto deve essere fatto ai fini di una comprensione e quantificazione del rinforzo radicale. Buona parte degli studi compiuti interessano infatti le radici più sottili (< 1–2 mm) e gli strati più superficiali del suolo (Bischetti et al. 2005), che hanno un ruolo marginale nella prevenzione delle frane superficiali

Con riferimento al formalismo dei modelli W&W e FBM, il rinforzo radicale dipende dalla distribuzione spaziale delle radici, ed in particolare dalla profondità e dalla massima distanza dal tronco che esse riescono a raggiungere. La loro distribuzione spaziale dipende tuttavia da numerosi fattori, quali ad esempio la specie, le caratteristiche dell'ambiente e dei popolamenti quali densità, età, stato fitosanitario, ecc. (Bischetti et al. 2005).

La densità di radici può essere espressa in termini di RAR (Root Area Ratio – rapporto tra l'area delle radici all'interno di una porzione di suolo e la superficie di quest'ultima). Essa si presta ad essere messa in relazione alla profondità o alla distanza dagli alberi.

La grande variabilità che affligge la RAR è dovuta sia a fattori genetici che ambientali. Con riferimento alla genetica un effetto macroscopico da essa indotto è rappresentato dalla tipologia di apparato radicale. Tre sono le forme più comuni (Phillips e Watson, 1994 cit. Marden et al., 2005; Kokutse et al., 2006 cit. Preti e Dani, 2009):

- *Sistema radicale di tipo fittonante.* L'apparato radicale fittonante presenta una distribuzione delle radici che decresce con la profondità secondo una funzione lineare. L'elemento portante dell'apparato è il fittone che nella sua discesa può essere accompagnato da radici minori ad esso parallele.
- *Sistema radicale di tipo cuoriforme.* Esso si presenta come un ammasso compatto di radici che si sviluppano in senso radiale in tutte le direzioni;
- *Sistema radicale di tipo superficiale.* Questa tipologia è caratterizzata dall'assoluta assenza del fittone e da numerosi radici che presentano uno sviluppo superficiale.

Alle forme di apparato radicale sopra descritte si possono associare due ulteriori tipologie di radici:

- Radici laterali. Si diramano dal fittone o da radici primarie e si sviluppano in senso radiale, solitamente in uno o più strati preferenziali;
- Radici verticali. Partano dalle radici superficiali e scendono in profondità secondo un andamento prevalentemente verticale.

Alcuni alberi (rovere, farnia, pino silvestre) sono dotati da un apparato radicale che, dapprima fittonante, si sviluppa poi lateralmente (Susmel, 1988). Altre specie (castagno, tiglio, olmo, larice, ontano nero) hanno un fittone più ridotto e radici laterali che crescono precocemente, in modo vigoroso, con angoli di penetrazione variabili (Susmel, 1988). Altre specie ancora (leccio, roverella, abete bianco, pino marittimo) hanno un robusto fittone, con radici che si allargano quasi orizzontalmente (Susmel, 1988). Di radici laterali poco profonde e di un fittone ridotto sono provviste le betulle e i carpini; di un apparato radicale laterale e superficiale molto ampio l'abete rosso e l'acero montano, mentre il pioppo tremolo e l'ontano bianco hanno un fittone che presto si atrofizza completamente, per lasciare il posto a radici striscianti (Susmel, 1988). Il faggio ha un apparato radicale cuoriforme.

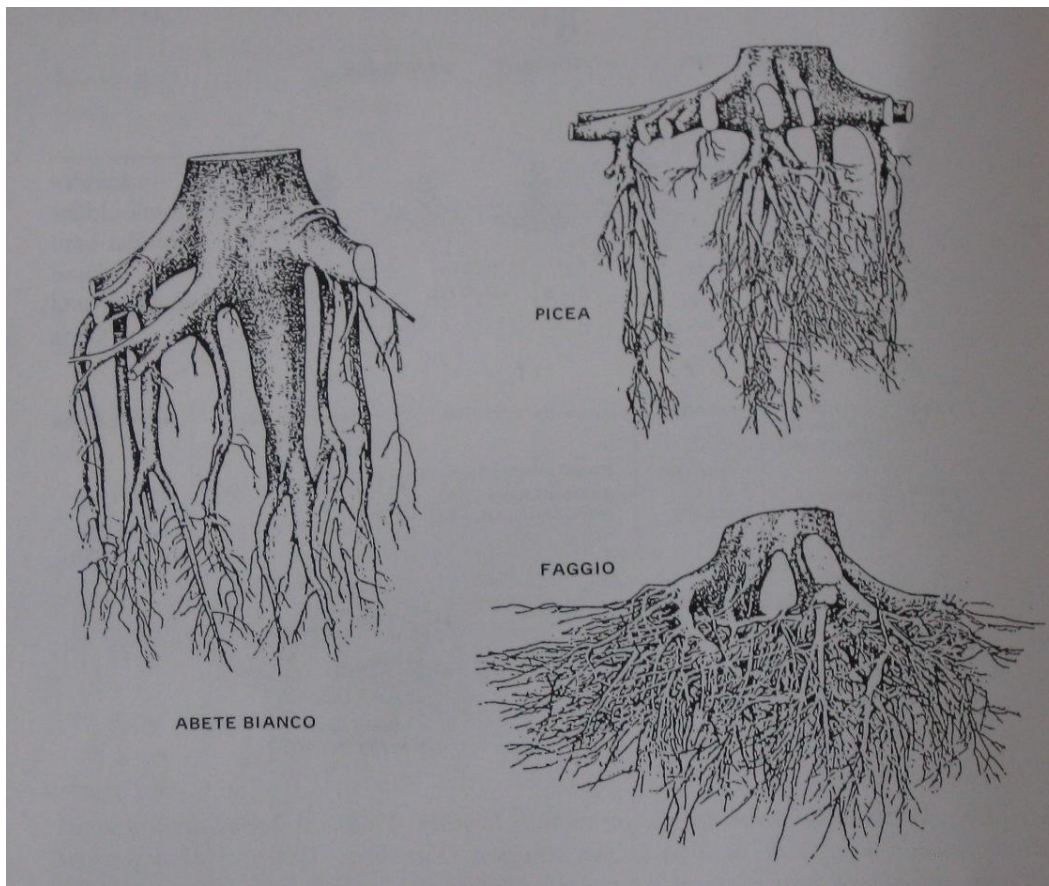


Figura 6. Apparati radicali: abete bianco (fittonante), abete rosso (superficiale) e cuoriforme (faggio) (Susmel, 1988)

Con riferimento ai fattori ambientali, la RAR dipende soprattutto dalle caratteristiche climatiche e pedologiche, dalla distanza dagli alberi, dalla loro densità e dalle variazioni spaziali delle altre proprietà della vegetazione (Douglas et al., 2010). Essa può inoltre essere fortemente influenzata dalla presenza di alcune radici di grosse dimensioni (Abernethy e Rutherford, 2001).

Se si osserva la distribuzione radiale delle radici all'intorno di un albero isolato, si può notare che la biomassa delle radici diminuisce all'aumentare della distanza dal tronco (Ammer e Wagner, 2005). Ciò non trova ovviamente riscontro in un popolamento forestale dove le sovrapposizioni e le anastomosi delle radici provenienti da alberi vicini possono dar vita ad uno strato radicale omogeneo, caratterizzato da un valore costante della densità radicale (Brisson e Reynolds, 1994; Casper et al., 2003 cit. Schwarz et al., 2010b). In contrasto con l'ipotesi di un'uniforme distribuzione delle radici sottili, diversi studi indicano l'esistenza di una variazione della densità radicale (Bedeneau e Auclair, 1989; Müller e Wagner, 2003; Yanai et al., 2006 cit. Schwarz et al., 2010b) e della biomassa radicale (Genet et al., 2007 cit. Schwarz et al., 2010b), specialmente per i popolamenti in cui la crescita è contrastata dalle condizioni climatiche e dove la copertura si presenta irregolare o lacunosa (Puhe, 2003 cit. Schwarz et al., 2010b)

La distribuzione della biomassa radicale e di conseguenza la RAR, all'intorno di un albero, è inoltre raramente simmetrica a causa dell'eterogeneità topografica, delle proprietà fisiche dei suoli, della distribuzione dei nutrienti e delle competizione intra e inter specifica (Coutts, 1989; Nicoll e Ray, 1996; Nicoll et al., 2006; Chiatante et al., 2003b cit. Schwarz et al., 2010a; Chiatante et al., 2003a). In una rassegna bibliografica, (Stokes et al., 2009 cit. Douglas et al., 2010) hanno messo in luce come la direzione preferenziale di accrescimento delle radici (verso monte o verso valle) sia influenzata da molti fattori, talora contrastanti. Altri autori (Ganatsas e Spanos, 2005; Norris, 2005) hanno osservato che le radici prediligono accrescersi, anche lungo i versanti, secondo le linee di livello o con una leggera propensione verso valle. Chiatante et al. (2003a), invece, suggeriscono che lungo i pendii più inclinati le piante preferiscono sviluppare l'apparato radicale secondo il gradiente

di pendenza, in modo da garantire la massima stabilità dell'albero; Abdi et al. (2009), al contrario, non hanno trovato differenze significative tra i valori di RAR misurati a monte e a valle di piante di carpino bianco.

Hales et al. (2009) suggeriscono che la distribuzione delle radici nel suolo varia in funzione della posizione topografica che, come più volte indicato, riflette la disponibilità di acqua e nutrienti. Nei compluvi l'orizzonte A è più ampio e maggiore è la disponibilità di acqua rispetto alle zone di displuvio. Da ciò ne consegue una più equa distribuzione delle radici lungo profilo (Davis et al., 2004 cit. Hales et al. 2009). Per quanto riguarda i displuvi, i nutrienti si concentrano in un sottile strato superficiale e scarsa è la quantità di acqua e di sali minerali nell'orizzonte B, e pertanto gli strati profondi contengono un minor numero di radici sottili (Hales et al. 2009).

In genere la RAR diminuisce con la profondità e con la distanza dagli alberi (Abernethy e Rutherford, 2001; Greenway, 1987; Nilaweera, 1994; Schmid e Kadza, 2001, 2002; Zhou et al., 1998 cit. Bischetti et al., 2005; Docker, 2003; Danjon et al. 2008).

Le variazioni delle RAR con la profondità si prestano ad essere descritte utilizzando delle equazioni lineari, di potenza, logaritmiche (Mattia et al., 2005), esponenziali (Preti e Giadrossich, 2009; Preti e Dani, 2009; Preti e Giadrossich, 2009; Mickovski e Van Beek, 2009) o attraverso la funzione gamma (Schmid e Kadza, 2001; Bischetti et al., 2005; Epis 2007; Docker e Hubbles 2009). Con riferimento alla sola area radicata (area dalle radici che attraversano un ipotetico piano) Docker e Hubbles (2009) hanno trovato che, per gli strati superficiali del suolo, può essere utilizzata una polinomiale di secondo ordine mentre per le maggiori profondità meglio si adatta un'esponenziale negativa.

Alcuni Autori (Docker, 2003; Docker e Hubbles, 2009), con riferimento ad alberi isolati, dopo aver accuratamente studiato gli apparati radicali di alcune specie australiane, hanno proposto un modello per la determinazione spaziale della RAR, perlomeno per le specie indagate. Innanzitutto essi stimano, sulla base dell'altezza dell'albero, la massima distanza radiale e la massima profondità che può essere raggiunta dalle radici. Successivamente discretizzano la profondità e per ciascuno strato di suolo (12.5 %, 37.5 %, 62.5 %, e 87.5 % della massima profondità) determinano l'area radicata (area dalle radici che attraversano un ipotetico piano) con una relazione area radicata-profondità. Poi per ciascuno strato, utilizzando un'equazione del tipo $Q_p = a e^{-xb}$ (dove Q_p quantità delle radici che attraversano un piano verticale ad una data distanza "b" e con a e x costanti), calcolano il valore di area radicata per diverse distanze dall'albero. A questo punto, dividendo l'area radicata così calcolata per l'area di suolo compresa tra l'albero e una data distanza da esso, giungono alla determinazione della RAR. L'applicazione di questa procedura consente di ottenere un modello bidimensionale della RAR specie-specifico, valido nel caso di piante molto distanti tra di loro.

Con riferimento alla distribuzione spaziale delle radici, Schwarz et al. (2010b) propongono "un modello di biforcazione statico di tipo frattale", simile a quelli utilizzati da Diggle (ROOTMAP, 1988 cit. Schwarz et al., 2010b), Lynch et al. (SimRoot, 1997 cit. Schwarz et al., 2010b), Ozier-Lafontaine et al. (FractRoot, 1999, cit. Schwarz et al. 2010b) e Pages et al. (Root Typ, 2004 cit. Schwarz et al. 2010b), per quantificare la frequenza di radici appartenenti a differenti classi diametriche in relazione a diverse posizioni e profondità all'interno di un popolamento forestale.

2.1.6 Influenza dell'angolo di resistenza al taglio del terreno, dell'inclinazione e della distorsione delle radici sulla coesione radicale

Waldron (1977) assume che tutte le radici siano perpendicolari al piano di taglio. In realtà ciò accade molto raramente e, anche quando ciò accade, con l'applicazione delle forze di taglio, si verificano delle deformazioni degli elementi radicali che portano alla formazione di angoli d'inclinazione tra le radici e il piano di scivolamento. L'assenza di perpendicolarità radici-piano di taglio, sia essa naturale oppure indotta, e l'angolo di attrito interno del materiale agiscono sul

rinforzo radicale al punto da richiedere una discussione degli effetti che essi possono avere sulla stima della coesione radicale.

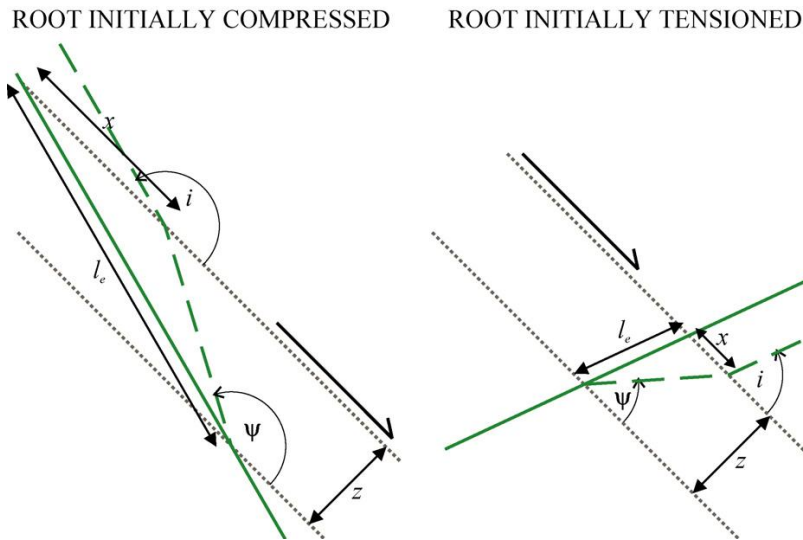


Figura 7. Schema del rinforzo radicale del suolo con particolare riferimento all'orientazione iniziale e alla deformazione degli elementi radicali a seguito dell'applicazione delle forze di taglio (Thomas e Pollen-Bankhead, 2010)

Con riferimento a quanto schematizzato in Figura 7, l'equazione $C_r = t_r (\cos \theta \tan \phi + \sin \theta)$ può essere riscritta nella seguente forma:

$$C_r = t_r (\cos(90 - \psi) \tan \phi + \sin(90 - \psi)) \quad \text{Equazione 14}$$

dove:

ϕ angolo di resistenza al taglio ($^\circ$);

t_r resistenza alla trazione media mobilizzata per unità di area del suolo (kPa);

ψ angolo della radice a rottura rispetto al piano di taglio ($^\circ$). ψ può essere determinato nel seguente modo:

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tan \theta + \frac{1}{\tan i}} \right) \quad \text{Equazione 15}$$

i angolo iniziale tra la radici e il piano di taglio ($^\circ$).

θ angolo di distorsione della radice ($^\circ$), calcolato come

$$\tan^{-1} \left(\frac{x}{z} \right) \quad \text{Equazione 16}$$

dove x è l'allungamento parallelo al piano di taglio della radici in condizioni di rottura (m) e z spessore della zona di taglio (m).

Il valore tra parentesi nella Equazione 14 può essere indicato come k' , cioè come un fattore correttivo da utilizzare nell'applicazione del modello. Per quanto riguarda l'angolo di inclinazione i

numerose analisi teoriche e di laboratorio (Gray e Ohashi, 1983; Maher e Gray, 1990; Waldron, 1977) hanno dimostrato che l'angolo d'inclinazione ha una scarsa influenza sui risultati. La condizione di perpendicolarità può essere infatti considerata come una condizione media (Bischetti et al., 2009). Con riferimento a θ e ϕ , considerando degli intervalli di variazione di θ e ϕ rispettivamente di 40° - 70° e 25° - 40° , Wu (1976) ha ottenuto dei risultati compresi tra 0,92 e 1,31, con una media di 1,2. A tal proposito Waldron (1977) propone un valore di 1,15.

Studi più recenti (Docker e Hubble, 2008) hanno messo in discussione quanto proposto da Wu (1976) e Waldron (1977). Le analisi condotte da Docker e Hubble (2008) per la vegetazione riparia della Nuova Zelanda conducono infatti a valori inferiori ad 1 (intorno a 0,75).

Una recente rassegna bibliografica sull'argomento è stata portata a termine da Thomas e Pollen-Bankhead (2010) ed è riassunta in Tabella 1.

Range of soil friction angles and shear distortion angles used in the literature to calculate R_f values $[\sin(90 - \psi) + \cos(90 - \psi) \tan \phi]$ in Eq. (2).

Source	Range of soil friction angles, ϕ (°)	Angle of shear distortion, θ (°)	R_f range (dimensionless)*
Wu (1976, cited by Gray and Megahan, 1981)	20.0–40.0	40.0–70.0	0.92–1.31 (1.20)
Waldron and Dakessian (1981)	30.0	0.0–90.0	0.58–1.16 (1.00)
Gray and Leiser (1982)	20.0–40.0	40.0–70.0	1.00–1.30 (1.15)
Riestenberg and Sovonick-Dunford (1983)	12.0	78.0–90.0	1.01–1.06
Greenway (1987)	>35.0	50.0–60.0	1.20
Abernethy and Rutherford (2001)	16.0	43.0–66.0	1.00
Simon and Collison (2002)	20.0–40.0	40.0–70.0	1.20
Reubens et al. (2007)	–	–	1.15
Danjon et al. (2008)	~40.0	40.0–50.0	1.20
Docker and Hubble (2008)	27.0–39.6	1.0–25.0	0.62–0.98 (0.75)

* Adopted value in parentheses.

Tabella 1(Thomas e Pollen, 2010).

Alla luce di queste considerazioni la Equazione 10 può essere riscritta nel seguente modo:

$$c_r = k' \sum_{i=1}^N (T_r a_r)_i \quad \text{Equazione 17}$$

dove T_r e a_r sono rispettivamente la resistenza a trazione e l'area radicata della i -esima classe diametrica e k' è un fattore che tiene conto dell'angolo di attrito interno del terreno, dell'inclinazione delle radici prima dell'applicazione delle forze di taglio e della deformazione che esse determinano sugli elementi radicali.

Thomas e Pollen-Bankhead (2010), data la mancanza di misure relative all'inclinazione delle radici e all'angolo di distorsione, hanno utilizzato una simulazione di tipo Monte Carlo per poter meglio indagare questi aspetti assai importanti. Adottando una inclinazione delle singole radici pari a 90° ($i = 90^\circ$) e con intervalli di θ e ϕ rispettivamente di $34,7^\circ$ - 44° e 48° - 72° , k' assume valori che variano tra 1,17-1,22 e 1,25-1,39. L'applicazione di una simulazione di questo tipo pare pertanto confermare quanto indicato da Wu (1,2). La bontà di questa stima tuttavia diminuisce se si prende in considerazione un'inclinazione variabile, compresa tra 0° e 180° . In questo caso k' è caratterizzato da intervalli di maggiore ampiezza 0,69-1,22 e 0,97- 1,39. Essi hanno inoltre osservato che k' può assumere anche valori negativi. Ciò accade se le radici risultano compresse e se la combinazione degli angoli di inclinazione e distorsione sono tali da soddisfare la seguente disequazione $i-\theta \geq 90^\circ$. La presenza di valori negativi di k' suggerisce che per certe inclinazioni la presenza delle radici può indebolire il terreno. Ciò è stato osservato anche da Gray e Ohashi (1983 cit. Thomas e Pollen-Bankhead, 2010) in test di taglio diretto condotti su campioni di sabbia (angolo di attrito interno 31° - 39°), rinforzati con fibre aventi angoli di inclinazione pari a 120° .

Sulla base di quanto esposto si possono ritenere validi i valori "tradizionali" di Waldron (1,15) e Wu (1,2), anche se cautelativamente possono essere utilizzati anche valori inferiori, attorno all'unità (Bischetti et al., 2009).

2.1.7 Sovrastima della coesione radicale - W&W model vs FBM

Esperimenti eseguiti in laboratorio e in campo mettono in evidenza come vi siano perlomeno due motivi per ritenere che il modello di Wu (1976) e Waldron (1977) conduca ad una sovrastima del rinforzo radicale. In primo luogo, il massimo contributo delle radici si esprime per spostamenti superiori a quelli caratteristici dei processi di taglio del suolo (Pollen et al., 2002, 2004 cit. Pollen e Simon, 2005). Il picco di resistenza offerto dai terreni si ha per spostamenti dell'ordine di alcuni millimetri, mentre il massimo rinforzo radicale si verifica per spostamenti compresi tra 1-5 cm (Zhou et al., 1998 cit. Schwarz et al., 2010a; Schwarz et al., 2010a). Questo accade perché le radici prima di incorrere nei processi di rottura o sfilamento, subiscono un raddrizzamento e un allungamento. Ciò lascia intendere che la resistenza radicale potrebbe essere mobilizzata solo per spostamenti maggiori rispetto a quelli che si osservano in occasione del collasso di un versante. Quest'ultimo potrebbe pertanto incorrere nel franamento prima che il contributo delle radici sia completamente mobilizzato (Pollen et al., 2004 cit. Pollen e Simon, 2005). Inoltre, con riferimento alla stabilità dei versanti, il collasso avviene in modo progressivo lungo il potenziale piano di scorrimento, e non simultaneamente per l'intera superficie di scivolamento (Docker and Hubble 2008, Hubble et al. 2010).

L'altro elemento che può causare una sovrastima della coesione radicale risiede nell'assumere che tutte le radici si rompono simultaneamente. In realtà esse si rompono progressivamente, in relazione alle loro dimensioni, alla loro tortuosità, al loro grado di ramificazione alle caratteristiche del terreno e ad innumerevoli altri fattori. L'esistenza di questo fenomeno è stata dimostrata attraverso degli esperimenti di trazione di radici ramificate (Riestenberg 1994; Norris 2005; Docker e Hubble 2008) e con delle prove di taglio diretto (Docker e Hubble 2008).

La conseguenza più rilevante è quindi una sovrastima del rinforzo, che è stata osservata da molti Autori (Waldron e Dakessian 1981; Operstein e Frydman 2000; Pollen e Simon 2005).

Per tener conto della progressiva rottura delle radici un fattore correttivo può essere aggiunto alla Equazione 17:

$$c_r = k' k'' \sum_{i=1}^N (T_r a_r)_i \quad \text{Equazione 18}$$

Dove k'' è un fattore correttivo che tiene conto della progressiva rottura delle radici.

Hammond et al. (1992) propongono, per la vegetazione forestale, un valore di k'' pari a 0,56, mentre Waldron e Dakessian (1981), Operstein e Frydman (2000), Pollen e Simon (2005), Pollen et al. (2004 cit. Pollen e Simon, 2005) e Docker e Hubble (2008) hanno osservato valori inferiori per piante erbacee e arboree. Greenwood et al. (2004) suggeriscono addirittura un valore cautelativo di 0,12 (1/(8÷10)).

I modelli FBM, pur determinando anch'essi una sovrastima del rinforzo dovuta allo sfasamento tra il massimo contributo offerto dalle radici e la massima resistenza del suolo, meglio si prestano a descrivere il comportamento di rottura non simultanea delle radici. Il loro sempre maggiore impiego (Pollen e Simon, 2005; Simon et al., 2006; Pollen, 2007; Bischetti et al., 2009; Hales et al., 2009; Pollen-Bankhead e Simon, 2009, Spelta et al., 2009; Mickovski et al., 2010; Loades et al., 2010; Schwarz et al., 2010a; Schwarz et al., 2010b; Thomas e Pollen, 2010) trova giustificazione proprio nella loro capacità di simulare efficacemente il processo di rottura di tipo progressivo.

L'applicazione dei FBM offre inoltre interessanti prospettive anche per la determinazione del fattore correttivo k'' . Mettendo a confronto i valori di coesione radicale determinati con il metodo FBM e W&W, Pollen e Simon (2005) hanno ottenuto, per alcune specie riparie americane, un fattore di riduzione k'' tra 0,60 e 0,82. In modo simile Bischetti et al. (2009) hanno trovato dei valori che ricadono nell'intervallo 0,32-1. Essi, in accordo con Pollen e Simon (2005), hanno anche osservato che esiste un legame tra i valori di k'' stimati con il metodo FBM e il numero di radici

considerate (Figura 8). Per densità radicali minori di 400 radici/m² esso si attesta attorno a valori di 0,5. Tali risultati sono simili a quanto originariamente indicato per le specie forestali da Hammond et al. (1992).

Preti (2006), infine, comparando i valori di coesione ottenuta con il metodo di Wu e Waldron e con diversi altri metodi (back-analysis, test di taglio in laboratorio e in situ e Fiber Bundle Model) ha trovato dei valori di k'' tra 0,34 e 0,5.

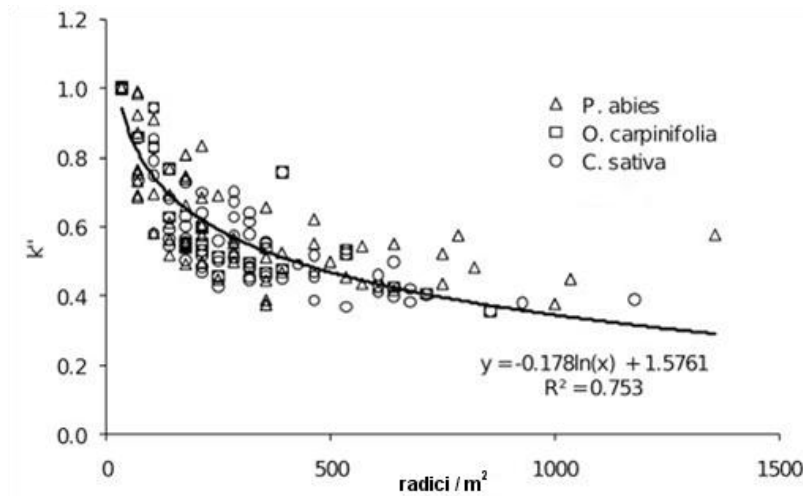


Figura 8. Valori di k'' in relazione alla densità radicale (Bischetti et al., 2009)

2.1.8 Coesione radicale basale e laterale

In contesti forestali, nel caso di frane di piccole dimensioni, la massa di terreno propensa al franamento, per poter iniziare il movimento, deve vincere la resistenza offerta sia dalle radici che intersecano il piano di scivolamento sia di quelle presenti lungo i margini laterali del corpo di frana (Riestenberg e Sovonick-Dunford, 1983; Terwillinger e Waldron 1991; Schmidt et al., 2001; Keim e Skaugset, 2003; Roering et al., 2003; Schwarz et al., 2010a; Schwarz et al. 2010b; Krogstad, 1995; Zhou et al., 1998; Sakals e Sidle, 2004; Reneau e Dietrich, 1987; Schmidt et al., 2001; Gray e Barker, 2004 cit. Schwarz et al., 2010b). In questo caso la coesione radicale complessiva $C_r(Z)$ è deve essere calcolata come somma delle due componenti:

$$C_r(Z)_{tot} = C_r(Z)_{lat} + C_r(Z)_{bas} \quad \text{Equazione 19}$$

$$C_r(Z)_{lat} = \sum_{j=1}^M \left[k' k'' \left(\sum_{i=1}^N (T_r a_r)_i \right)_j \frac{\Delta z_j}{Z} \right] \quad \text{Equazione 20}$$

$$C_r(Z)_{bas} = \left[k' k'' \sum_{i=1}^N (T_r a_r)_i \right]_Z \quad \text{Equazione 21}$$

dove Z è la profondità alla superficie di scivolamento, N è il numero classi di diametro i , M è il numero di classi di profondità j , Δz_j è l'ampiezza delle classi di profondità.

Il meccanismo con cui la resistenza a trazione è mobilizzata è diverso a seconda del piano di scivolamento che si considera: lungo la superficie laterale tutte le radici presenti tra il piano di

campagna e la profondità, Z , contribuiscono alla determinazione della coesione radicale, $C_r(Z)_{lat}$, sulla superficie basale, invece, la resistenza mobilizzata, $C_r(Z)_{bas}$, è solo quella delle radici presenti a tale profondità.

Il contributo del rinforzo radicale laterale contribuisce alla stabilità solo per frane di piccole dimensioni. A tal proposito Schwarz et al. (2010a) mostrano che le radici laterali hanno un ruolo determinate solo per frane con estensione minore a 1000–2000 m². Al di sopra di tale valore la loro azione perde di importanza se paragonata alle forze in gioco nel processo di franamento.

2.1.9 Coesione radicale – variazione e modelli spaziali del rinforzo radicale.

La stima della coesione radicale lungo un profilo riflette la distribuzione della RAR e tiene conto del legame tra resistenza a trazione e diametro delle radici (Bischetti et al. 2009). A parità di RAR, una maggior quantità di radici sottili permette di ottenere valori più elevati del rinforzo radicale e ciò trova spiegazione nella riduzione della resistenza a trazione (kPa) con il crescere del diametro.

In accordo con l'andamento della RAR, anche la coesione radicale è affetta da una grande variabilità, anche con riferimento ad una stessa specie in una data stazione (Bischetti et al. 2009).

In genere negli strati superficiali del suolo (10-40 cm) la coesione radicale può raggiungere alcune decine di kPa e valori importanti possono essere riscontrati anche per profondità superiori al metro (Bischetti et al. 2009).

In letteratura, con riferimento a prove di taglio diretto e all'applicazione della metodologia di back-analysis, vengono riportati dei valori che vanno da alcuni kPa ad un massimo di 20 kPa (Wu 1995; Norris et al., 2008a), valori quest'ultimi inferiori a quelli ottenuti con il metodo di W&W (Schmidt et al., 2001).

Quando si è di fronte a valori di coesione radicale bisogna essere molto cauti nel proporre dei confronti in quanto il metodo utilizzato può portare a stime molto diverse. Ad esempio in test di taglio diretto spesso si fa riferimento alla sola coesione basale mentre la metodologia di back-analysis tiene solitamente conto anche della coesione radicale laterale. Il metodo di Wu (1976) e Waldron (1977) impone, inoltre, una serie di drastiche semplificazioni e richiede la scelta di coefficienti correttivi che possono da soli determinare variazioni sostanziali del rinforzo. Lo stesso metodo si presta altresì al calcolo della coesione basale, laterale e totale, e spesso si può incorrere in grossolani errori se si operano dei paragoni tra i diversi valori di rinforzo. Anche i recenti metodi basati sui Fiber Bundle Model non sono esenti da assunzioni e semplificazioni che talora ne possono falsare i risultati. Di questo avviso sono anche Hales et al. (2009) che, sebbene abbiano ottenuto una coesione maggiore nelle zone di displuvio rispetto a quelle di compluvio sia con il modello di Wu (1976) e Waldron (1977) che con il metodo FBM, hanno trovato che l'andamento del rinforzo può essere fortemente influenzato dallo schema di calcolo adottato.

Ecco perché spesso si predilige mettere a confronto i valori di RAR o di resistenza a trazione piuttosto che la coesione: tali parametri meglio riflettono l'influenza della genetica e dell'ambiente e meno risentono delle semplificazioni e degli errori associati ai diversi metodi per la determinazione del rinforzo.

Per valutare il contributo delle radici alla stabilità dei versanti è necessario quindi conoscere la variazione spaziale del rinforzo radicale. Uno dei modelli più semplici ed efficaci è stato proposto da Abernety e Rutherford (2001). Con riferimento a piante isolate e alla coesione basale, gli Autori suggeriscono la seguente relazione:

$$C_r = e^{a-bCcz} \quad \text{Equazione 22}$$

a , b , c sono parametri del modello;

C è la distanza dal tronco (m);

z è la profondità (m).

Di particolare interesse per questa tesi sono le elaborazioni di Vergani et al. (2010). Gli Autori, partendo dagli stessi dati presentati in questo lavoro, hanno cercato di individuare i parametri della relazione proposta da Abernety e Rutherford (2001). I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 2. Purtroppo la bontà del modello è piuttosto scarsa e ciò è probabilmente dovuto all'utilizzo di valori provenienti da popolamenti forestali in un modello che è stato pensato per alberi isolati. Nel loro caso la distanza viene misurata dalla pianta "madre", che è rappresentata dall'albero di maggiori dimensioni più vicino allo scavo. Tuttavia, all'intorno dei profili numerosi sono gli altri esemplari che sicuramente hanno influenzato il valore della coesione radicale. Vergani et al. (2010) inoltre hanno provato a perfezionare il modello introducendo anche il diametro D a 1,30 m della pianta madre, in modo analogo a quanto fatto da Macinnis et al. (2010 cit. Vergani et al., 2010) per la biomassa radicale, e hanno ottenuto una relazione del tipo:

$$C_r = e^{a+bC_r z d L}$$

Equazione 23

I risultati di Tabella 3 sottolineano uno scarso miglioramento anche a seguito dell'aggiunta del diametro.

Specie (stazione)	A	B	C	R ²	p
Picea abies (PcBGFino)	2,32	0,07	1,19	0,34	< 0,001
Picea abies (PcBGMnPo)	2,16	-0,09	2,04	0,34	< 0,001
Fagus sylvatica (FgLCMort)	1,68	-0,87	1,94	0,32	< 0,001
Larix decidua (LxBGMnPo)	1,92	-0,05	2,32	0,59	< 0,001
Castanea sativa (CsLCCasa)	2,40	0,26	0,88	0,19	0,005
Castanea sativa (CsLCCran)	3,12	0,91	1,05	0,17	0,036
Fraxinus excelsior (FeBGOnet)	1,03	-0,31	0,35	0,08	0,340
Ostria carpinifolia (OsLCPast)	3,29	1,28	1,78	0,29	0,010

Tabella 2. Parametri della relazione coesione radicale – distanza dagli alberi proposta da Abernety e Rutherford (2001) (Vergani et al. (2010)).

Specie (stazione)	a	b	C	d	R ²	p
Picea abies (PcBGFino)	2,38	0,31	1,16	0,89	0,39	<0,001
Picea abies (PcBGMnPo)	2,12	-0,05	2,06	0,34	0,34	<0,001
Fagus sylvatica (FgLCMort)	1,72	-0,77	1,93	0,41	0,32	<0,001
Larix decidua (LxBGMnPo)	1,92	-0,05	2,32	NA	0,59	<0,001
Castanea sativa (CsLCCasa)	5,58	1,07	0,86	-9,32	0,20	0,010
Castanea sativa (CsLCCran)	3,09	0,80	1,05	-0,21	0,17	0,080
Fraxinus excelsior (FeBGOnet)	1,33	-0,40	0,29	-1,58	0,10	0,400
Ostria carpinifolia (OsLCPast)	-0,40	2,00	2,69	-0,19	0,33	0,010

Tabella 3. Parametri della relazione coesione radicale – distanza dagli alberi proposta da Abernety e Rutherford (2001) con l'aggiunta del diametro della pianta madre (Vergani et al. (2010)).

Vergani et al. (2010) sono giunti a risultati migliori mettendo in relazione il rinforzo alla profondità. Adottando un modello di tipo esponenziale, molto utilizzato per la RAR (Schmid e Kadza, 2001; Epis, 2007), secondo una relazione del tipo $c_{rm} = a e^{-bz}$ (dove a e b costanti e z profondità), hanno ottenuto i risultati in Tabella 4.

Specie (stazione)	a	b	R ²	P
Picea abies (PcBGFino)	2,75	1,98	0,62	< 0,001
Picea abies (PcBGMnPo)	2,81	3,96	0,79	< 0,001
Fagus sylvatica (FgLCMort)	3,52	3,05	0,59	0,003
Larix decidua (LxBGMnPo)	2,37	3,16	0,81	< 0,001
Castanea sativa (CsLCCasa)	2,88	2,52	0,64	< 0,001
Castanea sativa (CsLCCran)	3,39	0,96	0,33	0,1
Fraxinus excelsior (FeBGOnet)	1,62	1,37	0,53	0,004
Ostria carpinifolia (OsLCPast)	3,27	3,41	0,71	< 0,001

Tabella 4. Parametri delle relazioni Cr profondità (Vergani et al. (2010)).

Altri metodi impiegati per l'interpretazione della distribuzione dell'area radicata, considerano solo singoli alberi (Roering et al., 2003; Sakals and Sidle, 2004 cit. Hales et al., 2009) oppure assumono una distribuzione uniforme della coesione radicale per un intero territorio (Pack et al., 1998 cit. Hales et al., 2009). Roering et al. (2003 cit. Hales et al. 2009) hanno elaborato un metodo che consente, partendo dalla distribuzione spaziale degli alberi, di individuare le aree con scarsi valori di coesione. In modo simile, Sakals and Sidle (2004) cit. Hales et al. 2009, utilizzando una relazione di tipo empirico tra età degli alberi e distribuzione delle radici, individuano un raggio entro il quale si ha il 99% della densità delle radici e su tali basi determinano la coesione radicale in funzione anche delle forme di trattamento dei popolamenti.

In tempi recenti, Haeles et al. (2009) hanno proposto un modello spaziale della coesione radicale su basi morfologiche. Gli Autori dapprima creano una carta della "curvatura" secondo il metodo di Moore et al. (1991 cit. Haeles et al., 2009) e successivamente filtrano e riclassificano la carta in modo da ottenere una suddivisione del territorio in displuvi e compluvi. Ad essi infine associano in modo casuale, attraverso due distinte distribuzioni normali, una per i displuvi e una per i compluvi, dei valori di coesione radicale. Ottengono così un semplice modello spaziale bimodale del rinforzo radicale.

Schwarz et al. (2010b) hanno messo a punto un modello denominato root bundle model (RBM) che consente di determinare la coesione con riferimento ad un singolo albero o ad un intero popolamento forestale. Il RBM stima per una data distanza dagli alberi e per una data profondità la distribuzione delle radici con l'ausilio di un modello di biforcazione statico di tipo frattale e poi applica uno schema di calcolo del tipo FBM.

Ancora molto deve essere tuttavia compiuto per poter giungere ad una proficua modellazione del rinforzo radicale, ciò sia con riferimento ai modelli che con riferimento ai parametri.

3 MATERIALI E METODI

3.1 Specie considerate

Per la Lombardia, si è deciso di fare riferimento alle categorie forestali così definite dalla Carta dei tipi forestali della Regione Lombardia (Regione Lombardia, 2006) e dalla pubblicazione “I tipi forestali della Lombardia” (Del Favero, 2002).

In particolare, si sono considerate solo alcune categorie forestali valutate di maggior interesse per i seguenti motivi:

- estensione della categoria all'interno dei territori montani della Regione Lombardia;
- ruolo protettivo della categoria nei confronti delle frane superficiali.

Estensione

Con riferimento al territorio delle Comunità Montane della Lombardia ed alla Carta dei Tipi Forestali della Regione Lombardia (Regione Lombardia, 2006), è stato possibile ottenere l'estensione delle diverse categorie presenti nel territorio montano lombardo.

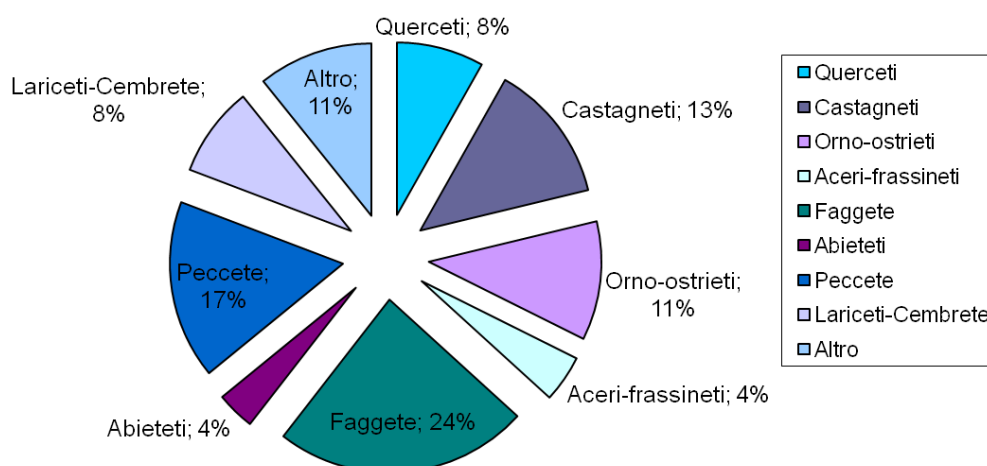


Figura 9. Estensione delle categorie forestali nella regione montana della Lombardia.

In Figura 9 e in Tabella 5 sono riportate le estensioni delle diverse categorie forestali, da cui si evince che la categoria forestale più diffusa è rappresentata dalle faggete con quasi il 24%, seguite dalle peccete con quasi il 17%, i castagneti con oltre il 13% e gli orno-ostrieti con l'11%. Estensioni inferiori al 10% sono proprie dei larici-cembrete (8%), dei querceti (8%), degli aceri-frassineti (4%), degli abieteti (4%); le altre categorie, che globalmente sommano l'11%, sono poco rappresentate (<2%).

Categorie forestali	Superfici (ha)	Percentuale (%)
Querco carpineti	1862	0.3%
Querceti	45861	8.2%
Castagneti	73509	13.1%
Orno-ostrieti	62661	11.1%
Aceri-frassineti	24765	4.4%
Betuleti-corileti	14067	2.5%
Faggete	133466	23.7%
Mughete	3476	0.6%
Pinete Pino silvestre	10373	1.8%
Piceo faggeti	8949	1.6%
Abieteti	20192	3.6%

Peccete	93904	16.7%
Lariceti-Cembrete	47510	8.4%
Alneti	4603	0.8%
Formazioni particolari	1716	0.3%
Formazioni antropogene	15093	2.7%
Non classificato	390	0.1%

Tabella 5. *Categorie forestali in Lombardia.*

Ruolo protettivo

Per la valutazione del ruolo protettivo sono state prima eseguite delle elaborazioni di tipo cartografico, e successivamente si è richiesto ai partner del progetto SISIFO di esprimere il proprio parere in merito all'azione protettrice delle diverse categorie.

I dati relativi alla distribuzione delle aree di dissesto in Lombardia sono stati ottenuti dalla database cartografico GeoIFFI (Regione Lombardia, 2006).

Tali informazioni sono state analizzate in funzione delle caratteristiche morfologiche del territorio montano e delle categorie forestali presenti. Le aree soggette a frane superficiali diffuse corrispondono a quei settori di versante interessati da fenomeni di varia tipologia che coinvolgono spessori solitamente limitati di terreni sciolti e di copertura. È proprio nei confronti di queste frane che la vegetazione, attraverso il rinforzo radicale, può contribuire in modo efficace alla stabilità.

I risultati delle interrogazioni possono essere così riassunti:

- circa l'1% del territorio delle comunità montane lombarde è interessato da frane superficiali;
- il 53% delle aree soggette a frane superficiali è attualmente coperto da popolamenti forestali;
- le categorie riscontrabili con maggiore frequenza in corrispondenza delle frane superficiali sono: faggete (29%), querceti (18%), orno-ostrieti (13%), peccete (10%), castagneti (9%), ecc.

In Tabella 6 e nel grafico di Figura 10 sono riportati i risultati delle elaborazioni.

Categorie forestali	Superfici (ha)	Percentuale (%)
Querceto carpineti	5	0.1%
Querceti	987	17.8%
Castagneti	493	8.9%
Orno-ostrieti	734	13.2%
Aceri-frassineti	228	4.1%
Betuleti-corileti	103	1.9%
Faggete	1626	29.3%
Mughete	38	0.7%
Pinete Pino silvestre	114	2.0%
Piceo faggeti	15	0.3%
Abieteti	141	2.5%
Peccete	582	10.5%
Lariceti-Cembrete	159	2.9%
Alneti	27	0.5%
Formazioni particolari	22	0.4%
Formazioni antropogene	273	4.9%
Non classificato	0	0.0%

Tabella 6. *Estensione delle superficie interessate da fenomeni franosi per diverse categorie forestali.*

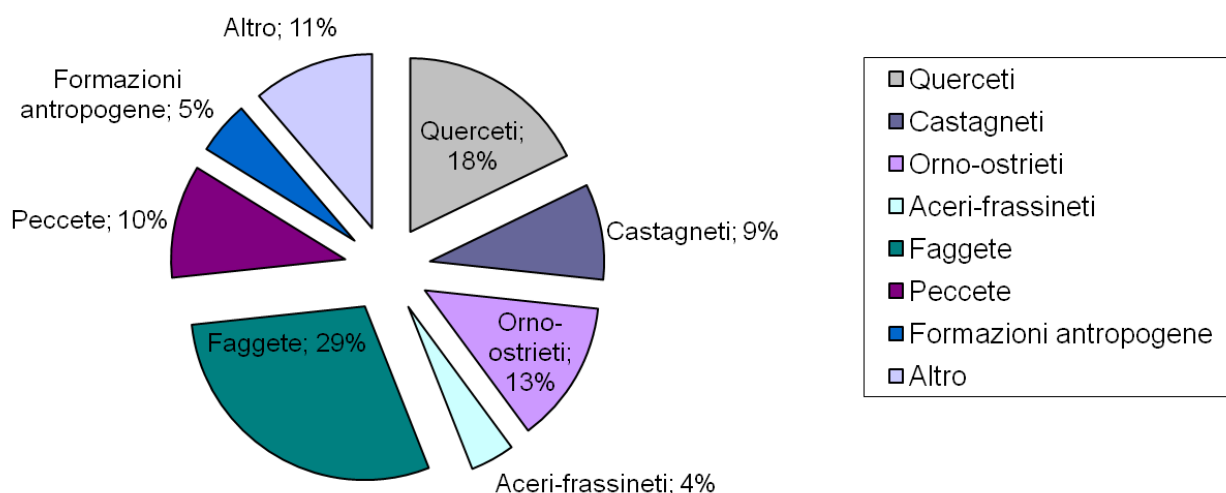


Figura 10. Distribuzione delle aree franose rispetto alle categorie forestali.

I risultati ottenuti sono stati oggetto di un confronto con i soggetti che hanno partecipato al progetto SISIFO che hanno inoltre valutato diversi aspetti gestionali delle aree forestali come ad esempio la capacità della specie di colonizzare aree nude, ad esempio dopo un evento franoso.

Le categorie sulle quali si è quindi ritenuto opportuno concentrare l'attenzione ed effettuare le indagini di campo sono:

- Aceri-frassineti
- Orno-ostrieti
- Castagneti
- Faggete
- Peccete
- Robinieti
- Lariceti
- Alneti di ontano bianco

Di seguito viene fornita una breve descrizione di ciascuna delle categorie forestali considerate.

Aceri-frassineti

Formazioni in cui prevalgono il frassino maggiore (*Fraxinus excelsior*), l'acero di monte (*Acer pseudoplatanus*) o più raramente il tiglio (*Tilia cordata*, *Tilia platyphyllos*). Si tratta per lo più di consorzi misti con almeno due delle tre specie principali anche se, su piccole estensioni, possono essere presenti soprassuoli puri di una delle tre specie (Del Favero, 2002).

Gli aceri-frassineti e gli aceri-tiglieti stanno assumendo una notevole rilevanza territoriale solo negli ultimi anni, essendo formazioni di invasione dei terreni agricoli (coltivi o prati, abbandonati gradualmente nell'ultimo cinquantennio) in grado di sfruttare pienamente la loro elevata capacità colonizzatrice. Con 24.765 ettari occupano il 4,4% della superficie forestale delle Comunità Montane della Regione Lombardia.

Lo sviluppo di questa categoria avviene, indipendentemente dalla natura del substrato, su pendii investiti da correnti umide, anche in ambienti di forra; è frequente il collegamento con piccoli corsi d'acqua o ruscelli che contribuiscono a mantenere elevata l'umidità.

Gli aceri-frassineti e gli aceri-tiglieti sono formazioni tipiche delle regioni esalpiche e di quella mesalpica, a quote variabili fra i 500 e i 1200 m, localizzati soprattutto nei medio-basso versanti e negli impluvi. In linea generale la distribuzione delle latifoglie nobili (frassino maggiore, acero di monte e tigli) è determinata dalla presenza di abbondanti precipitazioni (sopra i 1500 mm medi

annui) e da una buona e continua disponibilità idrica del suolo. In particolare i luoghi preferenziali in cui si localizzano gli aceri-frassineti e gli aceri-tiglieti sono (Del Favero, 2002):

- i pendii ripidi e le forre in esposizioni fresche, su terreni poveri di terra fine, ma ricchi in humus, derivanti da sfaldamenti di rupi o da accumuli di detriti calcarei;
- i depositi alluvionali, allo sbocco di valli laterali, in corrispondenza di profonde incisioni vallive, su suoli poveri di calcio, ma generalmente fertili;
- la base di ripidi pendii, su suoli colluviali caratterizzati da un consistente accumulo di nutrienti, e dove all'inizio della ripresa vegetativa vi è elevata umidità atmosferica e un forte apporto di precipitazioni;
- il margine di ruscelli, su versanti poco acclivi, non inondati, ma dilavati e spesso ringiovaniti da deboli smottamenti.

Da queste osservazioni si può ben capire l'importanza della categoria nella funzione di protezione dai dissesti che il bosco svolge nei confronti dei centri abitati e delle infrastrutture. In particolare questa categoria, che spesso si ritrova in prossimità degli impluvi o su terreni con un elevato contenuto idrico, gioca un ruolo cruciale nella prevenzione delle frane superficiali e delle colate detritiche. E' per questo che gli aceri-frassineti sono stati considerati nel gruppo delle categorie indagate durante lo studio, nonostante occupino un modesto 4,4% della superficie boscata delle Comunità Montane della Lombardia.

Orno-ostrieti

Formazioni nelle quali prevale il carpino nero (*Ostrya carpinifolia*) o dove il carpino nero è presente accompagnato per lo più dall'orniello (*Fraxinus ornus*). Sono formazioni presenti perlopiù su substrati carbonatici (Del Favero, 2002). Tale categoria occupa 62.661 ettari e cioè circa l'11,1% della superficie forestale delle Comunità Montane della Regione Lombardia.

Gli orno-ostrieti sono formazioni tipiche della regione esalpica centro-orientale esterna con leggere digressioni nella regione avanalpica; sono tipiche dei medio-basso versanti, a quote variabili dai 300 ai 1000 m, o di ambienti impervi di forra, rupe o falda detritica.

In base al luogo in cui si sviluppano si possono distinguere (Del Favero, 2002):

Orno-ostrieto primitivo di forra, in cui il carpino si mantiene grazie all'elevata umidità atmosferica e all'alternanza di zone sottoposte a continuo stillicidio con altre più aride, dove prevalgono entità delle pinete;

Orno-ostrieto primitivo di rupe, presente in ambienti rupestri, con limitate possibilità evolutive a causa della morfologia e della presenza ricorrente di incendi;

Orno-ostrieto di falda detritica, diffuso nelle frequenti vallate caratterizzate da estesi fenomeni alluvionali;

Orno-ostrieto tipico, là dove la morfologia diventa più favorevole e migliorano le caratteristiche del suolo, pur sempre in ambienti xerici e su suoli molto superficiali, a pH neutro e con la forte influenza esercitata dal substrato ricco di scheletro.

Noti i siti occupati dagli orno-ostrieti risulta importante conoscerne il contributo radicale alla stabilità dei versanti e la funzione protettiva contro la caduta massi poiché si possono trovare in posizioni strategiche per la sicurezza delle infrastrutture viarie e non solo. E' importante indagare il contributo radicale di questa categoria anche perché occupa il 13,2% delle aree boscate interessate da dissesto superficiale diffuso.

Castagneti

La categoria dei castagneti comprende le formazioni pure di castagno (*Castanea sativa*) o quelle in cui la specie è nettamente dominante. Categoria molto diffusa perché fino agli anni cinquanta fu favorita nel suo sviluppo dall'uomo, che dalla sua coltivazione traeva castagne, legname da costruzione, legname da paleria, legna da ardere e fogliame per la lettiera del bestiame

I castagneti sono diffusi su un'ampia superficie della Lombardia, ben 73.509 ettari pari a circa il 13,1% della superficie boscata delle Comunità Montane, su substrati prevalentemente a reazione

acida o subacida e in quasi tutte le regioni ad eccezione di quella della bassa pianura e di quella endalpica: si collocano soprattutto lungo i versanti e con maggior frequenza a quote variabili fra 300 e 800 m.

Valutata la diffusione e il fatto che i castagneti occupano l' 8,9% delle aree boscate interessate da dissesti superficiali diffusi, si è ritenuto opportuno indagare anche questa categoria..

Un ulteriore filone d'indagine potrebbe riguarda la stabilità delle ceppaie invecchiate che, appesantite dai polloni non ceduati, possono subire ribaltamenti che possono essere punto di innesco di dissesti. La tematica è stata in parte già affrontata nel progetto "Abbandono dei cedui e dissesto idrogeologico su substrati a debole coesione (PRO.CE.D.I.)" finanziato nell'ambito del Piano della ricerca 2004 del Programma della Ricerca della DG Agricoltura 2004-2006.

Faggete

Nella categoria delle faggete rientrano quelle formazioni in cui il faggio (*Fagus sylvatica*) è presente in purezza, come avviene nel suo optimum, o è mescolato con altre latifoglie (Del Favero, 2002).

Grazie alla notevole plasticità della specie ad adattarsi a diversi ambienti, le faggete sono relativamente diffuse nella Regione e si trovano sia nella regione esalpica che in quella mesalpica (anche se in misura minore), essendo presenti su diversi tipi di substrato (carbonatici o silicatici) anche se l'optimum si colloca nella regione esalpica centro orientale esterna su substrati carbonatici. In generale le faggete si collocano soprattutto lungo i versanti, in particolare nella fascia mediana, ad altitudini variabili fra 600 e 1500 m, anche se non mancano digressioni a quote sia inferiori che superiori (Del Favero, 2002).

Le faggete occupano 133.466 ettari pari al 23,7% della superficie boscata del territorio delle Comunità Montane della Lombardia, e una porzione rilevante (29,3%) delle aree forestate interessate da dissesto superficiale diffuso.

Peccete

Nella categoria delle peccete rientrano quelle formazioni a netta prevalenza di abete rosso (*Picea excelsa*).

L'abete rosso rappresenta la specie più importante della regione mesalpica, avendo l'optimum negli orizzonti altimontano e subalpino. Esso scende anche nell'orizzonte montano costituendo sia delle peccete, ma anche mescolandosi al faggio e/o all'abete bianco, rimanendo solo marginale alle formazioni con pino silvestre (Del Favero, 2002).

L'ampia diffusione dell'abete rosso evidenzia la sua plasticità. Verso le quote superiori esso non sembra limitato dalle temperature troppo rigide, che sono in genere ben sopportate e che comunque raramente compaiono con valori letali a sud delle Alpi. Il peccio si adatta anche a diversi tipi di suolo indipendentemente dalla natura del substrato (silicatici e carbonatici). Fattori limitanti sono invece le carenze idriche troppo spinte, il precario bilancio idrico durante il periodo invernale e la brevità della durata delle condizioni adatte al completamento della stagione vegetativa (Del Favero, 2002).

Le peccete occupano 93.904 ha pari al 16,7% della superficie boscata del territorio delle Comunità Montane della Lombardia, e il 10,5% delle aree forestate interessate da dissesto superficiale diffuso.

Robinieti

La robinia è la specie esotica più diffusa in Lombardia. Dopo una sua prima introduzione nei giardini del vecchio continente, ebbe una notevole diffusione a cavallo delle due guerre (per la riforestazione di ampie superfici denudate nel corso del primo conflitto) e in seguito anche per il contenimento dei fenomeni di dissesto ed erosione. La robinia è, infatti, specie pioniera, tollerante alle diverse tipologie di substrato, all'esposizione e alla quota prediligendo però altitudini tra 300 e 600 m, terreni sciolti e freschi e con un buon rifornimento idrico anche nel periodo estivo. I robinieti si distinguono in puri e misti (Del Favero, 2002).

L'estensione massima dei robinieti è di difficile determinazione dal momento che spesso sono formazioni frammiste ad altre specie e in continuo sviluppo. Complessivamente le formazioni antropogene raggiungono i 15092 ettari nei Comuni delle Comunità Montane lombarde. In tale superficie ricadono circa 273 ettari di dissesti superficiali ovvero il 4,3% del totale.

Lariceti

Escludendo dall'analisi le formazioni miste od a prevalente diffusione del cembro, che in Lombardia si limitano al distretto Bormiese Livignasco della regione endalpica per le particolari condizioni climatiche (Del Favero, 2002), i lariceti sono formazioni prevalentemente costituite da *Larix decidua* presenti lungo i versanti dai 1200 ai 2100 metri.

La capacità di diffusione del larice è amplificata dal verificarsi di condizioni di disturbo del terreno (dissesti, pascolamento, ribaltamenti) che facilitano la germinazione dell'abbondante seme. Per tale ragione lo si ritrova spesso in ambienti difficili ovvero ai margini degli alpeggi abbandonati dall'uomo, in aree rupestri o soggette a prolungato innevamento (Del Favero, 2002).

I lariceti raggiungono una estensione pari a 47.510 ettari (valore comprensivo delle cembrete peraltro poco diffuse in Lombardia) pari al 8,4% della superficie boscata che ricade nelle comunità montane. In tale superficie ricadono circa 159 ha di aree con dissesti pari al 2,9 % della superficie considerata.

Alneti di ontano bianco

Gli alneti sono formazioni di scarso interesse produttivo ma che rivestono una certa importanza dal punto di vista ambientale poiché popolano aree caratterizzate da condizioni sfavorevoli per diverse specie forestali, ferma restando una costante umidità del suolo accompagnata da un altrettanto efficace drenaggio. Per tale motivo gli alneti di *Alnus incana* spesso vanno a coprire i prati e i pascoli di bassa quota oppure nelle aree golenali o in antiche anse torrentizie. Gli alneti vanno considerati come fasi transitorie verso l'acero-frassineto e la pecceta azonale su alluvioni, quest'ultima nelle regioni endalpine dove l'abete rosso può penetrare nel popolamento di ontano bianco e prenderne il sopravvento (Del Favero, 2002).

La superficie ad alneto raggiunge quota 4.603 ha che è una minima percentuale (0,3%) della superficie boscata delle Comunità Montane in Lombardia. Su di questa ricadono circa 27 ha di dissesti pari al 0,5 % del totale. Nonostante l'esigua diffusione questa categoria ha un importante ruolo nella riduzione dell'alimentazione solida dei torrenti e nella stabilizzazione delle sponde dei corsi d'acqua montani.

3.2 Localizzazione dei rilievi

Complessivamente sono stati analizzati i campioni provenienti da 19 stazioni sparse per l'arco alpino e prealpino lombardo. Ciascuna stazione è individuata da una sigla di quattro lettere estratte dalle iniziali dei toponimi delle stazioni, come riportato in Tabella 7.

Provincia	Comune	Specifica	Abbreviazione
BG	Fino del Monte		Fino
BG	Castione della Presolana/Songavazzo	Monte Pora	MnPo
BG	Oneta		Onet
BG	Ponte Noss a		Pont
BS	Artogne		Arto
BS	Darfo - Boario Terme		Boar
BS	Corteno Golgi		Cort
BS	Gianico		Gian
BS	Incudine		Incu
BS	Malegno		Male

BS	Prestine		Pres
CO	Montemezzo/Sorico	Alpe Gigiai	AlGi
LC	Casargo		Casa
LC	Crandola		Cran
LC	Moggio		Mogg
LC	Morterone		Mort
LC	Pasturo		Past
SO	Piuro		Piur
SO	Villa di Chiavenna		ViCh

Tabella 7. Sigle identificative delle stazioni di rilievo.



Figura 11. Localizzazione delle stazioni di campionamento.

Per ogni stazione si è provveduto all'individuazione della categoria e della tipologia forestale, sulla base delle carte tematiche della pianificazione forestale (Piani di Indirizzo Forestale e Piani di Assestamento Forestale) e della Carta dei Tipi Forestali della Lombardia (Regione Lombardia, 2006), oppure attribuendo ai popolamenti l'opportuna classificazione sulla base dell'interpretazione diretta del popolamento.

Per ciascuna stazione si è inoltre provveduto all'elaborazione del modello altimetrico della Regione Lombardia con risoluzione 40 metri dal quale sono stati ottenuti i valori medi locali di quota, pendenza, esposizione e area drenata specifica³. Le elaborazioni sono state condotte su sub-aree quadrate di estensione 10 km. Gli algoritmi impiegati sono quelli contenuti nella libreria TauDEM (Tarboton, 2004). I risultati, mediati per le diverse sezioni di studio, sono riportati in Tabella 8.

Per ciascun profilo delle diverse stazioni sono state inoltre eseguite delle analisi granulometriche atte a caratterizzare la tipologia di suolo. La classificazione alla quale si è fatto riferimento nella presente tesi è quella proposta dall'*United States Department of Agriculture (USDA)*

Segue una breve descrizione delle stazioni interessate dalla ricerca.

³ L'area drenata specifica corrisponde al bacino sotteso da una determinata cella del DEM.

stazione	quota (m s.l.m.)	pendenza media	area contribuyente specifica (m)	esposizione	regione forestale
AiBGOnet	637	0%	98237	NORD	Esalpica C.O.E..
AiBSCort	1010	15%	66	SUD	Mesalpica
ApBGOnet	655	16%	43457	NORD-EST	Esalpica C.O.E.
ApBSPres	955	53%	566	NORD	Esalpica C.O.E. (confine Mesalpica)
CsBSBoar	593	60%	344	NORD-OVEST	Esalpica C.O.E.
CsLCCasa	968	78%	280	SUD-OVEST	Esalpica O.I.
CsLCCran	1017	74%	79	OVEST	Esalpica O.I.
CsSOViCh	777	43%	812	NORD	Mesalpica
FeBGOnet	655	14%	71476	NORD	Esalpica C.O.E.
FeBSPres	873	69%	363	NORD	Esalpica C.O.E. (confine Mesalpica)
FeLCPast	733	71%	161	EST	Esalpica C.O.E.
FgBGMnPo	1462	78%	49	OVEST	Esalpica C.O.E.
FgBSArto	1207	83%	1594	SUD-OVEST	Mesalpica (confine Esalpica C.O.E.)
FgBSGian	964	52%	284	NORD	Esalpica C.O.E.
FgCOAlGi	1344	44%	297	SUD-OVEST	Esalpica O.I.
FgLcMogg	953	88%	119	EST	Esalpica C.O.E.
FgLcMort	1237	57%	109	NORD	Esalpica C.O.E.
FoBSMale	811	79%	258	SUD-OVEST	Esalpica C.O.E.
LxBGMnPo	1463	42%	2816	NORD	Esalpica C.O.E.
LxCOAlGi	1582	54%	2638	SUD	Esalpica O.I.
OsBSMale	775	81%	301	SUD-EST	Esalpica C.O.E.
OsLCPast	755	76%	184	NORD	Esalpica C.O.E.
PcBGFino	961	52%	295	SUD-	Esalpica C.O.E.
PcBGMnPo	1484	51%	729	NORD-OVEST	Esalpica C.O.E.
PcBSIncu	1227	69%	90	SUD	Mesalpica
PcCOAlGi	1542	68%	697	SUD-OVEST	Esalpica EST C.O.E.
PcSOpiur	1097	70%	883	NORD	Mesalpica (confine Esalpica O.I.)
PcSOViCh	1082	35%	10634	NORD	Mesalpica
RpBGPont	464	34%	2815	OVEST	Esalpica C.O.E.

Tabella 8. Valori medi per specie e stazione dei parametri estrapolati dall'analisi morfologica del DEM e da altra cartografia..

Fino – specie: *Picea abies*

La stazione di Fino del Monte (Fino) ricade nell'omonimo Comune e nel territorio della Comunità Montana della Valle Seriana Superiore.

Il regime pluviometrico indica che le piogge sono ben distribuite nell'arco dell'anno, con un minimo invernale ed un massimo primaverile di poco superiore alle precipitazioni estive ed a quelle autunnali.

Il regime termico, con riferimento alla stazione di Clusone, è descritto da un valore medio annuo di 10,8 °C e da temperature medie del mese più freddo di circa 1,6 °C.

Il substrato geologico del territorio è costituito da formazioni appartenenti al Triassico localmente intercalato da detriti di falda e dolomia. I terreni sono prevalentemente rendzina brunificati, limo-argillosi piuttosto asciutti. (Pasini, 1994). Con riferimento alla classificazione *USDA* prevalgono i suoli franco-limosi, argilloso-limosi e franco-limosi-argillosi.

Il popolamento forestale è rappresentato da una fustaia di abete rosso di origine artificiale (circa 65 anni) ormai adulta con qualche soggetto del vecchio ciclo. Densità buona, a tratti interrotta da piccole radure. Buone condizioni vegetative, incrementi mediocri, stature medie e localmente sostenute, presenza di soggetti deperenti. Sottobosco a nocciolo, fitto dove la fustaia è più aperta, con partecipazione di frassino maggiore, rovere e castagno. Rinnovazione scarsa e stentata. Rado stangame di pino nero e silvestre da impianto nella parte bassa (Pasini, 1994)

Categoria Pecceta – tipologia: Pecceta secondaria montana o Pecceta su orno-ostrieto.

MnPo - specie: *Picea abies*, *Larix decidua* e *Fagus sylvatica*

La stazione di Monte Pora (MnPo) ricade nei Comuni di Songavazzo (BG) e Castione della Presolana (BG), nell'ambito territoriale della Comunità Montana Valle Seriana Superiore.

Il regime pluviometrico denota una piovosità elevata che si attesta attorno a valori di 1450-1500 mm/anno. La distribuzione delle piogge di tipo equinoziale con due picchi relativi ai periodi primaverili ed autunnali. Il regime termico, con riferimento alla stazione di Clusone, è descritto da un valore medio annuo di 10,8 °C e da temperature medie del mese più freddo di circa 1,6 °C. Fino ai 1500 m.s.l.m. si può quindi ritenere di essere di fronte ad un clima temperato, piovoso, con inverni abbastanza rigidi, senza una vera e propria stagione asciutta ma con estati fresche. Si ritiene inoltre che la zona, durante il periodo estivo, sia interessata da frequenti temporali data la vicinanza del massiccio della Presolana e del Monte Pora (Eterovich e Bernetti, 2007).

La stazione è caratterizzata da substrati calcarei-dolomitici e massici (Dolomia Principale, Dolomie Zonate, Calcarea di Zorzino, Formazione di San Giovanni Bianco). Queste formazioni di natura calcarea e dolomitica si presentano compatte e massicce. Terreni mediamente profondi e ben umificati, a tessitura limo argillosa, tendenzialmente freschi (Eterovich e Bernetti, 2007).

Fustaia di abete rosso e larice disetanea per gruppi. Aree a buona densità alternate a chiarie pesantemente pascolate. In prossimità delle aree di pascolo che contornano il comparto, il bosco si presenta rado, costituito perlopiù da esemplari ramosi e di grosse dimensioni. Nelle aree più dense tendenza al monoplano. Per il resto bosco di aspetto vario con gruppi maturi e radi, tratti adulti e giovani. Il piano dominato è costituito da faggio, acero di monte, salicone e altre latifoglie (Eterovich e Bernetti, 2007).

Categoria: Pecceta – tipologia: Pecceta altimontana dei substrati carbonatici (Eterovich e Bernetti, 2007).

Onet - specie: *Acer pseudoplatanus*, *Alnus incana*, *Fraxinus excelsior*

La stazione prende il nome dall'omonimo paese della provincia di Bergamo, appartenente alla Comunità Montana della Valle Seriana Superiore.

Le precipitazioni medie annue sono comprese tra il 1800 e i 1900 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000). Il regime termico, con riferimento alla stazione di Clusone, è descritto da un valore medio annuo di 10,8 °C e da temperature medie del mese più freddo di circa 1,6 °C.

La stazione è caratterizzata da substrati calcarei, mediamente o sottilmente stratificati affioranti in modo discontinuo. Suoli colluviali e alluvionali appartenenti alle seguenti classi *USDA*: franchi, franco-limosi, franco-sabbiosi. Il popolamento si sviluppa lungo il rio Nosedà e risale i versanti

circostanti che sono spesso ringiovaniti da deboli smottamenti. Strutture irregolari assai condizionate dalla morfologia e dai tagli irrazionali.

Categoria: Acero-frassineto – tipologia: Acero-frassineto tipico

Pont - specie: *Robinia pseudoacacia*

La stazione prende il nome dal Comune di Ponte Nossa appartenente alla Comunità Montana della Valle Seriana Superiore.

Le precipitazioni medie sono comprese tra il 1600 e i 1700 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000).

La stazione è caratterizzata da dolomie massicce o stratificate, in alcuni punti affioranti mentre in altri coperte da spessi depositi detritici. Terreni soprattutto sabbiosi delle classi franco-sabbiosi e franco-limosi. Struttura del popolamento monoplana e regolare.

Categoria: Formazione antropogena – tipologia: Robinieto misto.

Arto - specie: *Fagus sylvatica*

La stazione prende il nome dal Comune di Artogne della Provincia di Brescia, appartenente alla Comunità Montana della Val Camonica.

Le precipitazioni medie sono prossime ai 1400 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000).

Suoli moderatamente profondi, freschi e fertili, su coltre detritica morenica a conglomerati. Terre brune liscivate, localmente anche suoli bruni nella parte alta, con humus di tipo moder (Maffeis e Gregorini, 2005). Classi *USDA*: franco-sabbioso.

Faggeta montana dei substrati silicatici, a tratti nella sua veste più tipica, altrove più xerica su suolo acido oppure mista a picea. Perlopiù si tratta di un soprassuolo a ceduo invecchiato per l'abbandono del taglio ordinario, scoraggiato soprattutto dalle condizioni orografiche locali. Attualmente si assiste allo sviluppo di una faggeta in cui non è infrequente trovare soggetti di buon portamento e di discrete dimensioni. Densità da colma a scarsa, con presenza di soggetti aduggiati, talora secchi (Maffeis e Gregorini, 2005). Rinnovazione di faggio molto diffusa tuttavia con difficoltà di affermazione (Maffeis e Gregorini, 2005).

Categoria: Faggeta – tipologia: Faggeta montana dei substrati silicatici.

Boar - specie: *Castanea sativa*

La stazione prende il nome dal comune di Darfo Boario Terme della Comunità Montana della valle Camonica.

Le precipitazioni medie annue sono di circa 1350 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000).

La stazione è caratterizzata da rocce arenarie ed effusive affioranti in modo discontinuo. Le arenarie sono presenti sia in forma massiccia che stratificata ben cementata. Suoli silt loam o sandy loam.

Ceduo di castagno con densità colma, tessitura regolare, struttura monoplana.

Categoria: Castagneto – tipologia: Castagneto dei substrati silicatici dei suoli mesoxerici.

Cort- specie: *Alnus incana*

La stazione ricade nel Comune di Corteno Golgi in Provincia di Brescia, appartenente alla Comunità Montana della Val Camonica.

Le precipitazioni medie sono di circa 1000 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000).

La stazione insiste sul materiale alluvionale depositato dal rio Valle del Santo in prossimità della sua confluenza con il torrente Ogliolo. I suoli ricadono nella classe *USDA* loamy sand.

Categoria: Alneto – tipologia: Alneto di ontano bianco.

Gian - specie: *Fagus sylvatica*

La stazione prende il nome dal comune di Gianico della Comunità Montana della Val Camonica.

Le precipitazioni medie sono circa di 1400 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000)

Coltre detritica morenica a conglomerati con terreni della classe *USDA* franco-limosi e sabbioso-franchi.

Giovane faggeta montana governata a ceduo con struttura verticale monoplana e tessitura regolare colma. Auspicabile l'avviamento all'alto fusto.

Categoria: Faggeta – tipologia: Faggeta montana dei substrati silicatici.

Incu – specie: *Picea abies*

La stazione che ricade nel Comune di Incudine, in Provincia di Brescia.

Precipitazioni medie di circa 1000 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000).

La stazione è caratterizzata da gneiss affioranti anche in modo discontinuo. I depositi sono prevalentemente costituiti da falde detritiche. Suoli del tipo franco-sabbiosi.

Fustaia da giovane a matura, coetanea per ampi gruppi, localmente intercalata da chiarie e da un maggiore irregolarità della distribuzione e della struttura verticale. Rinnovazione pronta e presente lungo i margini.

Categoria: Pecceta – tipologia: Pecceta montana dei substrati silicatici dei suoli mesici.

Male – specie: *Ostrya carpinifolia e Fraxinus ornus*

La stazione si trova nel Comune di Malegno in Valle Camonica.

Precipitazioni medie di circa 1000 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000).

La stazione è caratterizzata da calcari mediamente o sottilmente stratificato affioranti in modo discontinuo. Suoli delle classi: franco, franco limosi-argillosi e franco-limosi.

Ceduo a prevalenza di carpino nero, roverella e orniello, con accrescimenti stentati perlopiù dovuti ai condizionamenti edafici e all'impenetrabilità dei suoli. Struttura monoplana, coerente con la forma di governo. Densità e tessitura regolari.

Categoria: Orno-ostrieto – tipologia: orno-ostrieto tipico.

Pres - *Acer pseudoplatanus e Fraxinus excelsior*

La stazione prende il nome dal Comune di Prestine che si trova in Valle Camonica.

Le precipitazioni medie sono circa di 1400 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000)

La stazione è caratterizzata da marne anche calcaree affioranti in modo discontinuo e da depositi morenici. Il suolo può essere classificato come franco-sabbiosi.

Consociazione delle due specie principali e di latre latifoglie sia nel piano dominante (tiglio) che in quello inferiore (nocciolo). Struttura monoplana con tessitura regolare colma.

Categoria: Acero-frassineto – tipologia: acero-frassineto tipico.

AlGi - specie: *Picea abies, Larix decidua e Fagus sylvatica*

La stazione prende il nome dall'alpe Gigiai che ricade nei Comuni di Montemezzo e Sorico, entrambi appartenenti alla Comunità Montana delle Valli del Lario e del Ceresio

Le precipitazioni medie annue superano i 1500 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000)

La stazione è caratterizzata da gneiss affioranti in modo sporadico e da depositi eluviali e morenici.

Categorie forestali: Peccete, Faggete, Lariceti.

Casa - specie: *Castanea sativa*

La stazione si trova nel Comune di Casargo che appartiene alla Comunità Montana della Valsassina –Valvarrone - Val d'Esino – Riviera.

Con riferimento alla stazione pluviometrica di Introbio e al periodo 1921-1950 si desume che le precipitazioni medie sono di 1635 mm/anno. L'andamento delle piovosità evidenzia due massimi, uno principale nel mese di maggio, ed uno secondario nel mese di agosto. Il regime è quindi di tipo subequinoziale primaverile con una elevata piovosità anche nella stagione estiva. I mesi meno piovosi sono quelli invernali, che spesso manifestano anche periodi di vera e propria siccità (Tonezzer e Castelli, 1991a).

La stazione è caratterizzata da gneiss affioranti in modo sporadico e da depositi eluviali superficiali. Ceduo misto a prevalenza di castagno con subordinata presenza di tiglio e rovere. Struttura monopiana con tessitura regolare colma.

Categoria: Castagneto – tipologia: castagneto dei substrati silicatici dei suoli mesici

Cran - specie: *Castanea sativa*

La stazione ricade nel Comune di Crandola in Valsassina

Con riferimento alla stazione pluviometrica di Introbio e al periodo 1921-1950 si desume che le precipitazioni medie sono di 1635 mm/anno. L'andamento delle piovosità evidenzia due massimi, uno principale nel mese di maggio, ed uno secondario nel mese di agosto. Il regime è quindi di tipo subequinoziale primaverile con una elevata piovosità anche nella stagione estiva. I mesi meno piovosi sono quelli invernali, che spesso manifestano anche periodi di vera e propria siccità (Tonezzer e Castelli, 1991a).

La stazione è caratterizzata da esposizione sud-ovest, con pendenza da poco a molto ripida. Il substrato geologico è costituito da conglomerati permici mentre i suoli sono bruni e freschi.

Il tipo forestale è ascrivibile al Castagneto dei Substrati silicatici dei suoli mesoxerici, anche se non nella sua forma più tipica per la compresenza, in percentuali pressoché simili, del faggio e della rovere. Si tratta di una situazione intermedia, dinamica, con mescolanze tra specie mesofile (faggio) e quelle più tipiche dei suoli xerici (rovere) (Castelli, 2008).

Il soprassuolo è caratterizzato da una formazione potenzialmente di notevole importanza produttiva, in gran parte costituita da fusti gamici e solo in parte da fusti nati da ceppaie (generalmente 2-3 polloni). Il governo e la struttura appaiono ormai caratterizzati dall'età del popolamento che, per l'avanzato invecchiamento (oltre 40 anni) può essere ormai definito come ceduo composto avviato alla naturale trasformazione a fustaia (Castelli, 2008).

Lo sviluppo e il portamento risultano generalmente soddisfacenti, migliori per la rovere e, in minor misura, per il faggio. Il castagno presenta spesso danni pregressi da cancro, ma non mancano piante nate da seme con fusti di discreto aspetto (Castelli, 2008).

La densità è mediamente uniforme con grado di copertura a tratti piuttosto alto, tanto che la copertura viva stenta a insediarsi e la copertura morta diventa invece abbondante. La matricinatura è presente mentre il sottobosco è scarso e costituito da felci, rovi, vinca minor, elleboro, oxalis, majanthenum, graminacee e poligala (Castelli, 2008).

Categoria: Castagneto – tipologia: castagneto dei substrati silicatici dei suoli mesoxerici.

Mogg - specie: *Fagus sylvatica*

La stazione prende il nome dal Comune di Moggio, della Comunità Montana della Valsassina - Valvarrone- Val d'Esino – Riviera.

Le precipitazioni medie annue sono di circa 1600 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000). L'andamento delle piovosità evidenzia due massimi, uno principale nel mese di maggio, ed uno secondario nel mese di agosto. Il regime è quindi di tipo subequinoziale primaverile con una elevata piovosità anche nella stagione estiva. I mesi meno piovosi sono quelli invernali, che spesso manifestano anche periodi di vera e propria siccità (Tonezzer e Castelli, 1991b).

La stazione è caratterizzata da calcari e calcari marnosi. Suoli bruni ben humificati (Tonezzer e Castelli, 1991b) delle categorie *USDA* franco-argillosi e franco-limosi.

Soprassuolo di discreto sviluppo con elementi di buon portamento. Composizione a prevalenza di faggio e con partecipazione di acero e frassino (Tonezzer e Castelli, 1991b). Il popolamento, dato l'avanzato invecchiamento (oltre 40 anni), può essere ormai definito come ceduo composto avviato alla naturale trasformazione a fustaia.

Categoria: Faggeta – tipologia: Faggeta submontana dei substrati carbonatici tipica.

Mort - specie: *Fagus sylvatica*

La stazione prende il nome dal Comune di Morterone, in Provincia di Lecco.

Le precipitazioni medie annue sono di circa 1600 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000). L'andamento delle piovosità evidenzia due massimi, uno principale nel mese di maggio, ed uno secondario nel mese di agosto. Il regime è quindi di tipo subequinoziale primaverile con una elevata piovosità anche nella stagione estiva. I mesi meno piovosi sono quelli invernali, che spesso manifestano anche periodi di vera e propria siccità (Tonezzer e Castelli, 1991b).

La stazione è caratterizzata localmente da marne e calcari marnosi. Suoli ascrivibili alle terre brune e profonde (Tonezzer e Castelli, 1991b). Popolamento a elevata densità, buon portamento e sviluppo, con piante ben conformate rispetto alla media della zona. Composizione a prevalenza di faggio con buoni elementi di acero e frassino maggiore. Ceduo in progressiva conversione a fustaia (Tonezzer e Castelli, 1991b).

Categoria: Faggeta – tipologia: Faggeta montana dei substrati carbonatici tipica.

Past – specie: *Ostrya carpinifolia* e *Fraxinus excelsior*

La stazione prende il nome dal comune di Pasturo, appartenente alla Comunità Montana della Valsassina -Valvarrone- Val d'Esino – Riviera.

Le precipitazioni medie annue sono di circa 1600 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000). L'andamento delle piovosità evidenzia due massimi, uno principale nel mese di maggio, ed uno secondario nel mese di agosto. Il regime è quindi di tipo subequinoziale primaverile con una elevata piovosità anche nella stagione estiva. I mesi meno piovosi sono quelli invernali, che spesso manifestano anche periodi di vera e propria siccità (Tonezzer e Castelli, 1991b). La stazione è caratterizzata localmente da calcari massicci o stratificati in grossi banchi e da detriti. Ceduo a prevalenza di carpino con partecipazione di frassino maggiore e ornello. Formazione forestale nelle serie evolutiva delle faggete submontane dei substrati carbonatici.

Categoria: Orno-ostrieto – tipologia: Orno-ostrieto tipico o Orno-ostrieto primitivo di falda detritico.

Piur – specie: *Picea abies*

La stazione prende il nome dal comune di Piuro, in provincia di Sondrio, nella Comunità Montana della Valchiavenna.

Le precipitazioni medie annue sono di circa 1300 mm/anno (Ceriani e Carelli, 2000). La prossimità del lago di Como conferisce al regime pluviometrico e a quello termico un timbro di oceanicità. Il substrato roccioso è rappresentato da serpentino della Valmalenco. Suoli prevalentemente costituiti da depositi morenici del quaternario, da mediamente profondi a profondi (Pizzotti Cassallia, 1997)., ascrivibili alla classe USDA sabbioso-fanchi e franco-sabbiosi.

Soprasuolo riconducibile ad una fustaia mista piuttosto rada costituita da lingue di pecceta montana con abete rosso prevalente con poco larice e abete bianco. Abete rosso in fase di perticaia o giovane fustaia, di buon portamento. Poca rinnovazione di conifere interessata da danni da morso. Strato arbustivo a nocciolo, sorbo degli uccellatori e maggiociondolo (Pizzotti Cassallia, 1997).

Categoria: Pecceta – tipologia: Pecceta montana dei substrati silicatici dei suoli mesici.

ViCh 1 – specie: *Picea abies*

La stazione prende il nome dal comune di Villa Chiavenna, che ricade nel territorio della Comunità Montana della Valchiavenna.

Le precipitazioni medie annue sono comprese tra 1300 e 1400 mm/anno con un massimo nel periodo estivo (Calvo, 1995). La temperatura media annuale riferita alla stazione meteorologica di Chiavenna si attesta attorno ai 13 °C (Calvo, 1995). La roccia madre è costituita da gneiss scistosi e granitoidi (Calvo, 1995) sui quali occasionalmente poggiano dei depositi del quaternario. Suoli bruni acidi (Calvo, 1995) delle classi USDA sabbioso-franchi.

Fustaia adulta a prevalenza di abete rosso. Struttura paracoetanea di densità variabile da media a rada. Rinnovazione sia diffusa sia localizzata in gruppi (Calvo, 1995). In corrispondenza dei profili

4 e 5 si assiste ad uno sviluppo più modesto del popolamento dovuto alla scarsa fertilità pedologica e alla presenza di fenomeni erosivi e di dissesto.

Categoria: Pecceta – tipologia: Pecceta montana dei substrati silicatici dei suoli mesici.

ViCh 2 – specie: *Castanea sativa*

La stazione prende il nome dal comune di Villa Chiavenna, che ricade nel territorio della Comunità Montana della Valchiavenna.

Le precipitazioni medie annue sono comprese tra 1300 e 1400 mm/anno con un massimo nel periodo estivo (Calvo, 1995). La temperatura media annuale riferita alla stazione meteorologica di Chiavenna si attesta attorno ai 13 °C (Calvo, 1995). La roccia madre è costituita da gneiss scistosi e granitoidi (Calvo, 1995) sui quali occasionalmente poggiano dei depositi del quaternario. Suoli bruni acidi (Calvo, 1995) delle classi USDA franco-sabbiosi e sabbioso-franchi.

Ceduo di castagno invecchiato, soggetto a tagli sporadici e irregolari. Assenza di una gestione unitaria dovuta al prevalere di un esasperato frazionamento della proprietà privata e all'alternarsi nell'intera area di case di monte e maggenghi, che lasciano supporre come tali aree fossero adibite, oltre che alla coltivazione del castagno, anche al pascolo.

Categoria: Castagneto – tipologia: Castagneto dei substrati silicatici dei suoli mesici.

3.3 Specie analizzate

Con riferimento alle categorie prescelte segue una breve descrizione delle caratteristiche delle specie oggetto di analisi.

***Acer pseudoplatanus* L.**

Albero di seconda grandezza (fino a 30 metri), deciduo, con portamento a cupola, fitto fogliame e rami inferiori tendenti verso il basso. Secondo Susmel (1988) l'apparato radicale è prevalentemente di tipo superficiale mentre, secondo altri Autori (Hecker 1992 cit. Giulietti 2009; Bernetti, 1995; IPLA 2002) esso è costituito da un fittone e da forti radici laterali oblique.

I dati analizzati provengono da due stazioni: Oneta – BG (Onet) e Prestine – BS (Pres). Le popolazioni sono sovente miste con altre specie arbustive (sorbo e nocciolo) e un ricco strato erbaceo. Complessivamente sono stati analizzati 4 profili suddivisi equamente tra le due stazioni.

***Alnus incana* (L.) Moench**

Albero di terza grandezza (alto fino a 15-20 metri), dalla chioma ampia, pressoché conica, a crescita rapida e fusto con sezione più o meno costolata (IPLA, 2002).

Radici robuste, adatte a penetrare nei banchi ciottolosi e fra i massi dei torrenti (IPLA, 2002). L'ontano bianco è provvisto di un fittone che presto si atrofizza, per lasciare il posto a radici striscianti (Susmel, 1988), spesso estese e superficiali (Gellini e Grossoni, 1997).

I dati analizzati provengono da due stazioni: Oneta – BG (Onet) e Corteno Golgi – BS (Cort). In entrambe le stazioni, le popolazioni a ontano bianco sono miste ad altre specie arbustive (sorbo e nocciolo) e un ricco strato erbaceo. Complessivamente sono stati analizzati 6 profili così suddivisi: Onet (1) e Cort (5).

***Castanea sativa* Miller**

Albero di prima grandezza (fino a 30 m, talora 40), deciduo, molto longevo (anche parecchie centinaia di anni), dall'ampia e folta chioma e dal portamento espanso (IPLA, 2002). Radici robuste, ramificate ma non troppo profonde (IPLA, 2000a), con fittone ridotto (Susmel 1988).

I dati analizzati provengono da quattro stazioni: Boario – BS (Boar), Casargo – LC (Casa), Crandola – LC (Cran), Villa Chiavenna – SO (ViCh). Nella stazione Casa, i profili sono stati scavati in un ceduo di ca-stagno con presenza anche di tiglio e rovere. Nella stazione Cran, i rilievi sono stati eseguiti in un ceduo di castagno con presenza di betulla e rovere. Complessivamente sono stati analizzati 20 profili così suddivisi: Boar (5), Casa (5), Cran (5) e ViCh (5).

***Fraxinus excelsior* L.**

Albero di seconda grandezza alto fino a 30 metri, deciduo, con chioma a forma di cupola, fusto dritto e slanciato (IPLA, 2002). Ha un rapido accrescimento ma la longevità non è troppo elevata. In senescenza è soggetto a schianti (IPLA, 2002). L'apparato radicale è molto sviluppato (Dufлот, 1995 cit. Pelleri, 2009). Esso si estende in profondità tramite il fittone e numerose radici secondarie (Gellini e Grossoni, 1997). Con il progredire dell'età le radici laterali prendono il sopravvento e conferiscono alla pianta un miglior ancoraggio al terreno ed una maggior resistenza alle sollecitazioni (Gravano, 2003 cit. Pelleri 2009). Questa conformazione dell'apparato radicale consente al frassino maggiore di soddisfare il suo elevato fabbisogno idrico durante l'intero periodo vegetativo. Infatti la porzione superficiale delle radici è specializzata nell'assorbimento dei nutrienti, mentre quella profonda è in grado di pescare, come una pompa, direttamente dalla falda (Dufлот 1995 cit. Pelleri, 2009).

I dati analizzati provengono da tre stazioni: Oneta – BG (Onet), Pasturo – LC (Past), Prestine – BS (Pres). La specie non si presenta mai in purezza ma accompagnata da nocciolo, ontano bianco ed erbacee. Complessivamente sono stati analizzati 8 profili così suddivisi: Onet (4), Past (1) e Pres (3).

***Fraxinus ornus* L.**

Albero di terza grandezza alto fino a 15 metri, deciduo, non molto longevo, con chioma regolare e arrotondata (IPLA, 2002). L'apparato radicale, fittonante e profondo, è provvisto di numerose radici laterali (Gellini e Grossoni, 1997) che possono conferire stabilità all'albero anche su suoli sabbiosi (IPLA, 2002).

I dati analizzati provengono da un'unica stazione: Malegno – BS (Male) dove sono stati analizzati 3 profili.

***Fagus sylvatica* L.**

Albero di prima grandezza (alto fino a 30 metri), relativamente longevo, con folta chioma ampiamente arrotondata negli esemplari isolati. I rami basali sono paralleli al terreno, quelli centrali e superiori sono assurgenti (IPLA, 2002). Apparato radicale fascicolato assai esteso anche in profondità (IPLA, 2002), di tipo cuoriforme. Inizialmente esso si presenta fittonante poi si espande lateralmente (Gellini e Grossoni, 1997). Le radici sono solitamente ben ramificate e con numerose radici secondarie, che scendono in profondità (Gellini e Grossoni, 1997). Normalmente l'apparato radicale difficilmente si espande, in senso radiale, oltre ai limiti della proiezione a terra della chioma (Gellini e Grossoni, 1997).

I dati analizzati provengono da sei stazioni: Artogne – BS (Arto), Moggio – LC (Mogg), Monte Pora – BG (MnPo), Gianico – BS (Gian), Morterone – LC (Mort) e Alpe Gigiai – CO (AlGi). Complessivamente sono stati analizzati 24 profili così suddivisi: AlGi (3), Arto (5), Gian (5), MnPo (1), Mogg (5) e Mort (5).

***Larix decidua* Miller**

Albero di primaria grandezza, raggiunge e supera i 35 metri di altezza. Specie dotata di grande longevità (500-1000 anni) ed è l'unica conifera indigena caducifoglia. La chioma allungata e piramidale è rada e con l'età diventa ogivale o irregolare nel piano subalpino, dove costituisce il limite superiore del bosco e degli alberi. L'apparato radicale presenta un robusto fittone dal quale si diramano radici fascicolate e oblique (Gellini e Grossoni, 1996; Susmel, 1988), molto robuste e in grado di penetrare nel terreno e nelle tasche di terra tra i massi (IPLA, 2002).

I dati analizzati provengono dalle stazioni di: Alpe Gigiai – CO (AlGi) e Monte Pora – BG (MnPo). Complessivamente sono stati analizzati 5 profili così suddivisi: AlGi (3) e MnPo (2).

***Ostrya carpinifolia* Scop.**

Albero di terza grandezza (fino a 15 m), deciduo, con fusto dritto e chioma subconica molto folta (IPLA, 2002). Radici abbastanza superficiali (Bernetti, 1995) ma robuste e ben ramificate (IPLA, 2002, Gellini e Grossoni, 1997).

I dati relativi al carpino nero fanno riferimento alle stazioni di: Malegno – BS (Male) e Pasturo – LC (Past). Nel complesso sono stati analizzati 8 profili equamente suddivisi tra le due stazioni.

***Picea abies* (L.) Karsten**

Albero di prima grandezza, sempreverde, è abbastanza longevo (300-400 anni). La chioma, piramidale e slanciata, con l'aumentare della quota, da espansa con rami secondari sub orizzontali diventa colonnare con rami corti inclinati ad angolo acuto con il fusto. Le Radici sono prevalentemente ramificate e superficiali (IPLA, 2002; Susmel, 1988). Gellini e Grossoni (1996) descrivono l'apparato radicale come superficiale e formato da grosse radici che difficilmente scendono al di sotto del mezzo metro di profondità; esso ha quindi un andamento marcatamente orizzontale (tabulare) e può svilupparsi anche in terreni profondi pochi centimetri.

I dati analizzati provengono da sei stazioni: Monte Pora – BG (MnPo), Fino del Monte – BG (Fino), Incudine – BS (Incu), Piuro – SO (Piur), Villa Chiavenna – SO (ViCh) e Alpe Gigiai – CO (AlGi). Complessivamente sono stati analizzati 33 profili così suddivisi: Fino (5), MnPo (10), Incu (5), Piur (5), ViCh (5) e AlGi (3).

Robinia pseudoacacia

Albero a fusto generalmente suddiviso, a ramificazione irregolare, con chioma ampia, leggera e arrotondata. Può raggiungere i 60 cm di diametro e i 30 metri di altezza, tuttavia, in bosco, generalmente raggiunge dimensioni minori ed è contraddistinta da un portamento più slanciato e da una chioma più rada (IPLA, 2000b).

L'apparato radicale, dopo una prima fase di sviluppo in profondità, si arricchisce di lunghe radici superficiali che prendono il sopravvento sul fittone e si estendono notevolmente in tutte le direzioni, anche in direzione verticale (fino a 6-7 metri) (Gellini e Grossoni, 1997); queste hanno una spiccata facoltà pollonifera che assicura una rapida propagazione della specie.

Le radici ospitano, all'interno di caratteristici noduli, colonie di batteri simbiotici del genere *Rizhobium*, capaci di fissare l'azoto atmosferico (IPLA, 2000b).

I dati analizzati provengono dalla stazione di Ponte Nossa – BG (Pont) dove sono stati realizzati 5 profili.

3.4 Metodologie di campionamento, di misurazione e di stima delle grandezze

La procedura per la determinazione del rinforzo radicale del terreno prevede l'acquisizione dei dati relativi alla resistenza a trazione delle radici e alla densità di radicazione.

Con riferimento alla resistenza a trazione, per ciascuna specie in ciascuna stazione sono state raccolte almeno 30 radici.

Per quanto riguarda la densità di radicazione si è provveduto all'apertura di apposite trincee con il fine di poter scattare delle fotografie al profilo di suolo radicato. Con l'obiettivo di ridurre gli sforzi necessari alla realizzazione degli scavi e con lo scopo di poter raggiungere profondità maggiori si sono privilegiate le scarpate presenti lungo le strade forestali. In particolare ci si è concentrati sulle piste di recente apertura, che presumibilmente presentano una distribuzione delle radici nel suolo più vicina a quanto si verifica in pieno bosco.

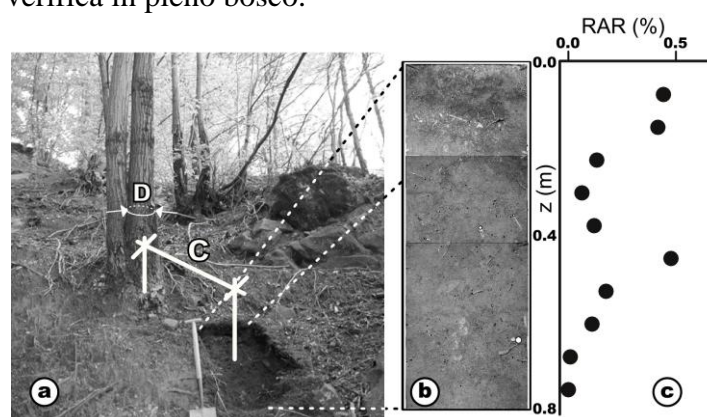


Figura 12. Esempio di profilo Radicale (Vergani et al. 2010)

3.4.1 Misura della resistenza a trazione

La resistenza a trazione delle radici è stata determinata attraverso delle prove di trazione in laboratorio, in accordo con i numerosi studi condotti in passato (Bischetti et al., 2005; Bischetti et al., 2009; Genet et al. 2005; Tosi 2007).

Come indicato in precedenza, per ciascuna specie e per ciascuna stazione, in corrispondenza dei diversi profili e a diverse profondità, sono state prelevate le radici, in numero di almeno trenta per stazione.

Nella raccolta delle radici si è posta particolare attenzione a non danneggiarle e a non sottoporle a stress. La scelta delle radici da sottoporre a trazione è stata condotta secondo i seguenti criteri:

- buono stato di conservazione degli elementi radicali;
- diametri il più possibile vari, solitamente compresi nell'intervallo 0,1 mm – 10 mm.
- lunghezza di almeno 10 cm.

Per la determinazione dei valori di resistenza a trazione delle radici, ci si avvalsi dell'ausilio di un'apparecchiatura (Figura 13) utilizzata già per altri lavori simili (Bischetti et al., 2003; Bischetti et al., 2005; Bischetti et al., 2009). Lo strumento è costituito da un sistema di ammorsamento di cui un'estremità è fissa mentre l'altra si muove su un carrello. Un motore elettrico con riduttore, quando azionato, conferisce il movimento ad una cella di carico (F.S.=500 N, precisione 0.1% F.S.) solidale ad un carrello, che, collegata ad un sistema di acquisizione dati, permette la misura delle resistenze sviluppate.

Azionando il motore, questo fa girare una vite senza fine che allontana il carrello ad una velocità di 10 mm/minuto. Se una radice è fissata alle estremità del sistema di ammortamento, con l'allontanamento del carrello essa viene "stirata" e messa in trazione fino al raggiungimento del punto di rottura.

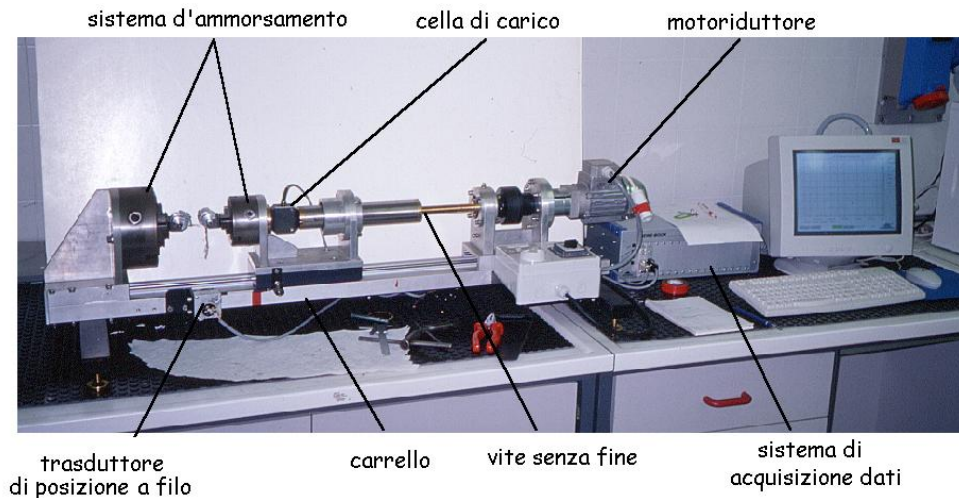


Figura 13. Strumento per i test di resistenza a trazione.

Con questo sistema è possibile conoscere la resistenza massima mobilizzata dalla radice al momento della rottura, ma anche la resistenza sviluppata in ogni istante dall'inizio alla fine della prova di trazione.

In pratica, la procedura utilizzata per le prove di trazione è la seguente:

- scelta di una radice, tra quelle prelevate in campo, di lunghezza di almeno 10 cm, sufficiente per essere fissata saldamente ai morsetti del sistema di ammortamento dell'apparecchiatura.
- misura del diametro della radice in almeno tre punti, con l'ausilio di un calibro elettronico.
- ammortamento della radice alla macchina;
- avviamento del sistema di sollecitazione e del sistema di acquisizione dati;
- misura della resistenza massima F_{max} esercitata dalla radice e del diametro al punto di rottura;
- divisione dello sforzo massimo F_{max} per l'area della radice, così da ottenere la resistenza a trazione per unità di area (T_r).

La prova di trazione di ogni singola radice viene interamente registrata e riportata in un foglio di calcolo. Una volta terminate le prove di trazione, viene creato un grafico con le coppie di valori diametro medio-resistenza a trazione massima. Come suggerito da alcuni Autori (Gray e Sotir, 1996; Bischetti et al. 2005, Bischetti et al., 2009) la migliore funzione interpolante che descrivere l'andamento sforzo-diametro è del tipo:

$$T_r = ad^{-b} \quad \text{Equazione 24}$$

Anche in questo lavoro, per ciascuna specie e per ciascuna stazione, è stata ricercata una relazione di tipo potenziale, che meglio descrive la proporzionalità inversa tra T_r e d .

Misure di questo tipo possono essere influenzate da numerosi errori che possono presentarsi fin dalla fase di raccolta del materiale. In campo, le radici, durante la fase di prelievo, possono essere danneggiate meccanicamente o pretensionate e ciò può comportare delle rilevanti variazioni nei valori di resistenza a trazione. Un altro errore che può essere commesso durante la raccolta delle

radici consiste nell'attribuzione dell'elemento radicale ad un individuo, magari di specie differente, piuttosto che ad un altro. Ciò può avvenire con maggiore probabilità in corrispondenza di popolamenti misti e dove, in vicinanza dello scavo, coesistono esemplari di diverse specie. Dal momento del prelievo fino ai test in laboratorio si ritiene vi siano una serie di processi che vedono le radici protagoniste. Inizialmente si ha una graduale essiccazione degli elementi e successivamente si presume sopraggiungano anche dei processi di degradazione e decomposizione. Per questo motivo le radici vengono o sottoposte immediatamente a trazione, al massimo entro due giorni dal prelievo, oppure vengono conservate in una soluzione alcolica al 15 %, come suggerito da Meyer e Gottsche (1971). Secondo le prove condotte da Bischetti et al. (2003b) non vi sono evidenze tali da far supporre che la conservazione in alcool, anche se protratta per molti mesi, possa influenzare le proprietà di resistenza delle radici.

Le misure condotte in laboratorio, sia del diametro che delle forze, sono sicuramente afflitte da errori sia sistematici che casuali. I primi possono essere ricondotti ad una errata taratura degli strumenti o ad uno loro funzionamento difettoso. La seconda tipologia si ritrova sia a carico delle misure dei diametri (schiacciamento delle radici, insufficiente chiusura dei puntali, mancanza di perpendicolarità del calibro rispetto alle radici, disattenzione dell'operatore nella lettura e nella trascrizione delle misure, ecc.) che delle forze (disturbi di natura elettrica ed elettromagnetica, attriti e resistenze del carrello e della parte meccanica dell'apparecchiatura, disfunzioni e difficoltà nell'acquisizione dei dati che si manifestano sia a livello di trasmissione degli impulsi elettrici che nell'acquisizione da parte del computer, ecc.). In questo lavoro si è cercato di analizzare gli errori di tipo casuale che affliggono le misure dei diametri e delle forze, e come questi si propagano nel calcolo della resistenza a trazione T_r .

Con riferimento alla metodologia di analisi delle incertezze descritta da Taylor (2000), per radici di diametro compreso tra 0,5 – 7 mm (l'intervallo diametrico maggiormente considerato nelle prove) si è ottenuto un valore dell'errore relativo percentuale $\varepsilon_{r\%}$ di circa il 15%. Per diametri inferiori a 0,5 mm, le forze misurate sono prossime all'errore dello strumento (0,1 % del fondoscala) e ciò determina un aumento vertiginoso degli errori.

3.4.2 Misura dell'area radicata

L'area radicata, così come definita nel paragrafo 2.1.5, è il rapporto tra la somma delle sezioni delle radici che attraversano una superficie di riferimento. Va precisato come spesso si menziona l'area radicata quale elemento imprescindibile per la determinazione del rinforzo radicale. Nella formulazione teorica dei modelli di Wu (1976) e Waldron (1977) si fa infatti riferimento all'area radicata delle diverse classi diametriche per il calcolo della coesione radicale. Tuttavia, le metodologie utilizzate nel presente lavoro permettono di evitare un'aggregazione per classi di diametro delle radici e ciò consente di calcolare il rinforzo radicale in relazione alla dimensione e alla posizione degli elementi presenti alle diverse profondità. Ne consegue che in questa tesi, come in alcuni recenti lavori (Bischetti et al. 2005; Bischetti et al. 2009), la RAR rappresenta semplicemente un indice sintetico del numero, delle dimensioni e delle posizioni delle radici nel suolo. Come più volte accennato, la RAR varia in funzione di molti parametri: il grado di sviluppo, la disponibilità di nutrienti e di acqua, la granulometria del suolo in cui le radici si accrescono, la densità di piante presenti, le caratteristiche stazionali (pendenza, esposizione, altitudine, umidità, luminosità, vicinanza ad altre colture o insediamenti o strade).

Ad oggi, i metodi di valutazione dell'area radicata possono essere sinteticamente suddivisi nel seguente modo:

Metodi basati sullo studio dei profili radicati

A questo gruppo appartengono i metodi a trincea che consistono nello scavo di una trincea, con il fine di rendere visibili le radici presenti nel suolo. Lo scavo può essere attuato con dei normali strumenti di lavoro, badili e picconi (Weaver, 1926 cit. Vullo 2003), con aria (Van Breda, 1937 cit.

Vullo 2003) o con acqua (Stoeckeler e Kluender, 1938 cit. Vullo 2003); l'operazione di scavo può originare sia una parete verticale che orizzontale (Kozlowski, 1971 cit. Vullo 2003). Le radici possono essere poi fotografate (Glatzel, 1964 cit. Vullo 2003), estratte e analizzate, contate, rilevate con un disegno (Weaver, 1926 cit. Vullo 2003), divise per classi dimensionali. Ciascun tipo di conteggio è la base per la stima successiva dell'area radicata. Un sistema simile è il metodo a parete lunga (Weaver, 1926 cit. Vullo 2003); con questo metodo si creano delle pareti di vari metri che permettono di valutare gli apparati radicali di un filare intero di piante, e non di una singola pianta come invece avviene con i piccoli scavi. Un'evoluzione di questi sistemi è il metodo con parete di vetro (Kozlowski, 1971; Fordham, 1972 cit. Vullo 2003): dopo aver creato una trincea con una parete verticale che fronteggia l'apparato radicale di una pianta, si inserisce un vetro all'interfaccia suolo radicato-profilo. Si ha così la possibilità di valutare l'accrescimento progressivo delle radici.

Metodi basati sul prelievo di campioni e successivo studio in laboratorio

Il metodo con monolite consiste nel taglio e asportazione dell'intero parallelepipedo di suolo che contiene l'apparato radicale della pianta studiata e l'analisi di questo in laboratorio. I sistemi di prelievo sono molteplici (Bilan, 1960 cit. Vullo 2003; Karizumi, 1968 cit. Vullo 2003). In laboratorio si provvede poi ad eliminare il suolo (con acqua, aria compressa o cicli di congelamento) e a valutare il volume e l'area delle radici. Il metodo con il carotatore si serve di questo attrezzo per estrarre una porzione di terreno, cercando di non alterarlo durante le operazioni (Bischetti et al., 2002c). In laboratorio viene successivamente analizzata la "carota" di suolo.

Metodi indiretti

Le metodologie prevedono l'utilizzo di sistemi di misura che permettono di stimare, indirettamente, l'area radicata. Alcuni studi (Neilson, 1964) si basano sull'iniezione di traccianti radioattivi o di C_{14} nelle piante per poi fare delle radiografie al suolo ed evidenziare così le radici. I risultati non sono sempre attendibili a causa delle modalità con cui avviene la traslocazione dei traccianti. Un altro tipo di metodo indiretto è l'asportazione dell'apparato radicale e la sua sostituzione con materiali inerti come la perlite (Safford, 1976); dal peso di perlite immessa si ricava il volume della stessa e quindi delle radici asportate; dal volume si può infine giungere ai valori di area radicata.

La tecnica utilizzata nel presente lavoro è basata sullo studio dei profili radicali con metodo a trincea (Abernethy e Rutherford, 2000; Schmid e Kazda, 2001; Simon e Collison, 2002; Bischetti et al., 2005; Sun et al., 2008. Abdi et al., 2009, Bischetti et al. 2009). La procedura di stima dell'area radicata può essere riassunta nel seguente modo:

- apertura di trincee di larghezza minima 30 cm e di profondità variabile in funzione dello spessore del suolo e della difficoltà dello scavo;
- acquisizione di fotografie dei profili attraverso l'impiego di fotocamera digitale e cavalletto fotografico (Figura 14). La maglia di riferimento delle fotografie ha dimensioni 28 cm x 21 cm;
- rettifica delle fotografie;
- analisi al computer dei profili con l'applicativo Dr. Roots, creato dal dott. Enrico Antonio Chiaradia per il software GIS Mapwindow. L'applicativo consente la georeferenziazione delle fotografie e l'individuazione semiautomatica degli elementi radicali (Figura 15). Con l'ausilio di questo strumento è possibile, una volta individuate le radici, contraddistinguerle con elementi di tipo circolare, ai quali sono associati dei parametri geometrici (posizione nello spazio e area delle radici). Sulla base di tali dati si ottiene infine il diametro delle radici e la profondità alla quale si trovano rispetto al piano di campagna.
- calcolo dell'area radicata. L'area radicata è ottenuta dividendo, per ogni classe di profondità (ampiezza dieci centimetri), l'area occupata dalle radici per l'area totale di suolo esaminato.

La RAR è determinata sia con riferimento a tutte le radici presenti nel suolo (area radicata totale) che con riferimento alle radici comprese nell'intervallo 1-10 mm. I valori di RAR così calcolati fanno riferimento al profilo verticale. Tuttavia, in accordo con Bischetti et al. 2005 e Bischetti et al. 2010, per le diverse classi di profondità, è possibile assumere un'isotropa distribuzione delle radici nel suolo e i valori misurati lungo la verticale si ritengono sostanzialmente simili a quelli riscontrabili lungo gli altri ipotetici piani che possono essere individuati nel terreno.



Figura 14. Cavalletto per il rilievo delle immagini sul profilo.

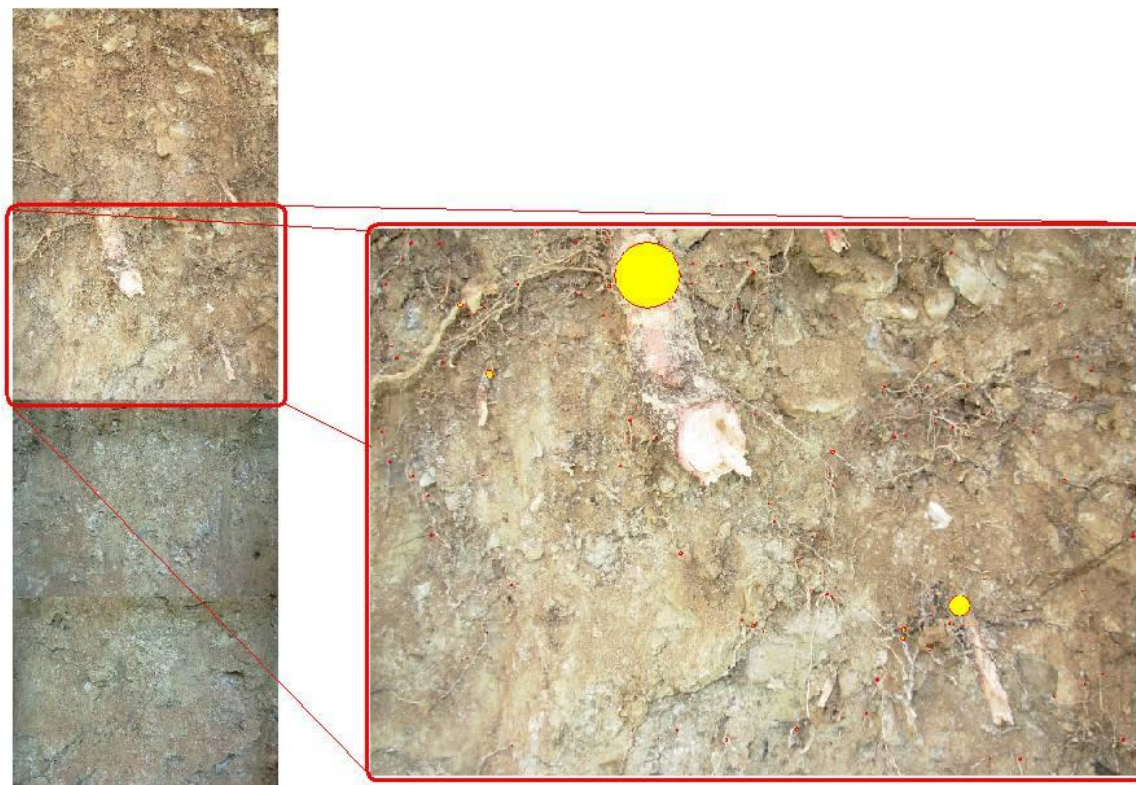


Figura 15. Esempio di profilo georeferenziato e rettificato. Gli elementi circolari di colore giallo sono il risultato della digitalizzazione delle immagini.

Anche per la raccolta e analisi delle immagini, le incertezze che possono affliggere la procedura d'analisi ed elaborazione delle immagini possono essere così distinte:

- Errori sistematici: a questo gruppo appartengono gli errori legati alla risoluzione della macchina fotografica.
- Errori casuali: la creazione di profili è un metodo di campionamento distruttivo che implica necessariamente degli errori di tipo casuale.

Quest'ultima categoria è dovuta alla distruzione delle radici durante lo scavo, all'impossibilità di creare delle sezioni effettivamente verticali (ad es. per la presenza di massi che ostacolano le operazioni di scavo), ecc.

Per quanto riguarda le fotografie si possono manifestare errori accidentali durante lo scatto della fotografia: scarsa perpendicolarità rispetto al profilo, distanza eccessiva o insufficiente dallo stesso, movimenti dell'operatore all'atto dello scatto. Nella fase di elaborazione delle fotografie ci possono essere errori casuali durante la rettificazione delle foto: durante queste operazioni, infatti, le immagini possono subire delle deformazioni che modificano la geometria e le dimensioni degli elementi. L'assunzione delle radici quali elementi di natura circolare comporta anch'essa una sovrastima o al contrario una sottostima delle misure dei diametri. Anche questo tipo di errore è casuale. Bisogna infine aggiungere gli errori che si verificano durante l'identificazione delle radici, alcune di esse possono sfuggire all'attenzione dell'operatore, altre possono essere confuse con altri elementi organici (aghi, rametti, microfauna ecc.) ed inorganici (piccoli sassi bianchi).

3.4.3 Calcolo della coesione radicale

Come precedentemente descritto, la stima del contributo alla coesione totale del suolo apportato dalle radici necessita sia della conoscenza della resistenza a trazione che dei diametri e della distribuzione spaziale delle radici. I valori di resistenza meccanica degli elementi radicali, T_r , sono stati ottenuti mediante prove di trazione in laboratorio, eseguite secondo il metodo sopraindicato.

La distribuzione e la dimensione delle radici provengono dalle analisi condotte con il metodo della trincea, secondo le modalità precedentemente descritte e riportate sinteticamente anche in Bischetti et al. (2009).

I valori di coesione radicale (C_r) sono stati infine calcolati con l'applicazione sia del modello di Wu e Waldron (W&W) che con l'utilizzo del formalismo dei Fiber Bundle Models (FBM).

Per il calcolo del C_r si sono prese in considerazione solo le radici con diametri appartenenti all'intervallo 1 mm e 10 mm. Il diametro di 1 mm è stato scelto quale presumibile soglia discriminante tra i fenomeni di sfilamento e allungamento e quelli di rottura, in accordo con Reubens et al. (2007) e Bischetti et al. (2009). Nel presente lavoro si fa pertanto riferimento solamente al presumibile contributo delle radici che incorrono in un completa rottura, nonostante non vi siano chiare evidenze in relazione alla soglia prescelta. Al valore di diametro 10 mm si fa invece coincidere il passaggio da un rinforzo tipo "materiali-compositi" ad un rinforzo "effetto tirante". La soglia di 10 mm è stata proposta o utilizzata anche da altri autori (Burroughs e Thomas (1977) (cit. Docker 2003), Tosi 2007, Bischetti et al. 2009), sebbene valori diversi sono presenti in letteratura (Coppin e Richards, 1990 cit. Docker 2003; O'Loughlin & Watson (1979) cit. Docker 2003).

Per l'utilizzo del modello di W&W sono stati adottati dei valori di k' e k'' pari ad 1, ciò in accordo con Bischetti et al. 2009. Alla luce degli studi di Docker e Hubble (2008) e Thomas e Pollen-Bankhead (2010), si ritiene opportuno scegliere un valore più cautelativo di k' rispetto a quanto originariamente proposto da Wu (1976) e Waldron (1977). Un valore unitario di k'' è giustificato dal voler ottenere dei dati scevri dall'applicazione di un coefficiente correttivo, che può essere invece stimato confrontando i valori del rinforzo ottenuti con i due differenti metodi (W&W e FBM).

Per l'applicazione del formalismo dei FBM è stato adottato un modello GLS di tipo statico in analogia con Bischetti et al. (2009). L'ipotetico carico viene quindi suddiviso equamente senza tener conto dei diametri delle radici, in accordo con lo schema originario di Daniels (1945) e con i risultati degli studi di Thomas e Pollen (2010).

Lo schema di calcolo impiegato per la stima del C_r con i due diversi metodi è stato implementato in un apposito foglio elettronico e prevede i seguenti passaggi:

- 1) Per ciascun profilo le radici vengono ordinate secondo la profondità, dalle più superficiali alle più profonde;
- 2) A ciascuna radice, in relazione al diametro, viene associato un valore di resistenza a trazione sulla base dei modelli T_r-d specie e stazione specifici;
- 3) Per ciascuna classe di profondità (ampiezza 10 cm) viene determinata la coesione radicale con i due diversi metodi. Con riferimento al metodo di Wu (1976) e Waldron (1977) la resistenza a trazione T_r (MPa) delle singole radici viene moltiplicata per la loro area (mm^2). I valori di forza così ottenuti vengono prima sommati e poi divisi per l'area di suolo indagato (280 mm x 100 mm). Si ottiene in questo modo la coesione radicale con il metodo W&W espressa in kPa.

Il metodo FBM prevede, invece, l'applicazione progressiva di un carico all'insieme di radici presenti in certo strato di suolo. Innanzitutto, il carico applicato viene ripartito equamente tra le radici intatte. Poi il carico ripartito viene messo a confronto con la resistenza di ciascuna radice, determinata come prodotto tra la resistenza a trazione T_r (MPa) e l'area della radice (mm^2). Se il carico ripartito supera la resistenza di una radice, solitamente la più sottile, allora essa si rompe e il carico applicato viene ridistribuito tra le restanti radici ($N-1$). Il nuovo carico ripartito, maggiore del precedente, viene confrontato nuovamente con la resistenza delle radici integre e il meccanismo procede in questo modo fino a quando il fascio di radice è in grado, nel suo complesso, di sopportare il carico applicato. A questo punto viene determinato un incremento del carico al fine di innescare delle ulteriori rotture. Il processo si arresta quando l'intero fascio di fibre è stato distrutto. La coesione radicale (kPa) in questo caso coincide con il rapporto tra il massimo carico raggiunto (N) e l'area di suolo indagato (mm^2).

Con riferimento ad entrambi i modelli, l'incertezza che si accompagna ai valori di rinforzo radicale si ritiene possa essere molto elevata. Ciò in ragione della propagazione degli errori commessi nelle fasi di misura e alle innumerevoli assunzioni che spesso non trovano riscontro nella pratica.

3.5 Metodi statistici

Al fine di poter indagare con profitto le grandezze oggetto d'analisi sono stati utilizzati degli strumenti di tipo statistico.

Per descrivere l'andamento di T_r in funzione del diametro è stata utilizzata una regressione potenziale, mentre per l'andamento della RAR in funzione della profondità è stata applicata una regressione di tipo esponenziale. La bontà di entrambi i modelli di regressione è stata verificata tramite il calcolo dei coefficienti di determinazione (R^2) per verificarne la capacità predittiva, e tramite il test di Fisher per la verifica della significatività, considerando i valori soglia $\alpha=0,05$ e $\alpha=0,01$. Per l'applicazione del test di Fisher si è proceduto alla linearizzazione delle regressioni, utilizzando le trasformate logaritmiche di diametro e resistenza alla trazione nel primo caso, dell'area radicata nel secondo caso.

I confronti tra i valori di T_r appartenenti a specie o a stazioni diverse sono stati eseguiti con l'analisi della covarianza (ANCOVA), considerando il diametro come covariata in accordo con Genet et al. (2005) e Bischetti et al. (2009). Prima di procedere con l'applicazione dell'ANCOVA è stata condotta una trasformazione logaritmica dei valori di T_r e di diametro (come già sopra accennato) in

modo da ottenere una relazione di tipo lineare al posto di una di tipo potenziale. La verifica della normalità dei dati è stata eseguita con il test di Kolmogorov-Smirnov mentre l'omogeneità delle varianze (omoschedasticità) è stata verificata con il test di Levene, entrambi adatti per piccoli campioni. I confronti con ANCOVA sono stati infine preceduti dalla verifica della condizione di parallelismo delle serie con il test F, condizione quest'ultima fondamentale per l'applicazione dell'analisi della covarianza.

Con riferimento ai modelli RAR-profondità sono stati utilizzati gli stessi metodi impiegati per le relazioni $T_r - d$, con la trasformazione logaritmica dei valori di area radicata al fine di ottenere relazioni di tipo lineare.

Nei casi in cui le regressioni tra variabile dipendente ed esplicativa risultano non significative, i dati sono stati messi a confronto con l'analisi della varianza (ANOVA). Anche in questo caso la normalità e l'omoschedasticità dei dati sono state verificate con i test di Kolmogorov Smirnov e Levene.

Le analisi sono state eseguite con il software *R* (versione 2.9.1. del 26/06/2009).

Risultati

3.6 Resistenza a trazione

Le principali statistiche descrittive (numerosità, media, deviazione standard) delle prove di trazione sono riportate in Tabella 9.

ID	n.	diametro (mm)				Forza (N)				Resistenza a trazione (MPa)			
		media	max	min	dev.st.	media	max	min	dev.st.	media	max	min	dev.st.
PcBGFino	49	2.09	6.02	0.34	1.60	46.68	249.12	1.03	61.56	11.76	46.21	3.16	9.24
PcBGMnPo	50	1.52	5.92	0.15	1.30	40.21	360.60	1.07	65.75	22.47	114.75	6.35	22.72
PcBSIncu	59	2.43	6.36	0.58	1.50	51.36	347.73	2.09	66.15	7.99	15.78	1.36	3.12
PcCOAlGi	41	1.60	4.34	0.12	1.15	63.97	325.40	0.00	82.24	43.33	265.26	0.00	55.21
PcSOPiur	48	1.95	6.55	0.20	1.48	39.77	236.15	1.52	53.76	13.28	73.60	2.84	12.44
PcCOViCh	44	1.97	6.55	0.20	1.52	39.36	236.15	2.04	52.61	13.67	73.60	2.84	12.66
FgBSArto	48	1.85	5.37	0.22	1.53	70.08	387.54	1.76	99.83	20.84	79.53	3.38	14.39
FgBSGian	48	1.81	6.13	0.26	1.48	65.60	554.14	1.63	95.21	20.03	47.00	7.01	7.54
FgCOAlGi	36	1.56	4.59	0.14	1.28	104.79	469.53	0.00	122.70	96.17	730.97	0.00	162.35
FgLCMogg	47	1.13	5.04	0.17	1.29	39.50	332.16	1.57	72.90	30.77	93.76	7.01	18.92
FgLCMort	48	1.62	4.86	0.22	1.30	66.71	297.56	1.44	84.47	26.15	73.40	9.58	12.02
CsBSBoar	41	2.02	6.55	0.26	1.55	28.83	124.61	1.38	28.77	11.15	38.97	2.01	7.28
CsLCCasa	47	0.99	3.82	0.18	0.87	18.08	118.70	1.70	25.72	28.74	109.22	4.82	26.03
CsLCCran	40	1.63	5.92	0.04	1.36	46.91	397.30	0.10	77.82	19.82	94.23	6.18	18.38
CsSOViCh	44	1.87	4.53	0.15	1.39	47.05	235.43	1.63	62.75	20.27	157.11	2.83	26.38
FeBGOnet	53	1.32	5.46	0.16	1.23	21.34	124.22	1.77	30.39	18.89	105.37	3.89	16.70
FeBSPres	44	2.13	6.32	0.22	1.59	64.92	380.63	1.80	86.73	18.34	94.55	4.85	17.74
FeLCPast	47	1.56	6.59	0.21	1.65	40.44	290.39	2.00	65.44	20.84	61.71	4.66	11.97
ApBGOnet	48	1.65	5.30	0.18	1.36	40.28	200.80	1.81	53.75	16.74	70.99	3.68	10.84
ApBSPres	49	2.10	6.58	0.32	1.64	90.81	671.25	3.30	122.07	23.49	42.98	7.13	9.03
OsBSMale	43	2.20	6.29	0.27	1.72	63.64	256.86	1.39	78.32	14.58	36.20	1.80	7.09
OsLCPast	42	1.96	6.11	0.24	1.56	66.60	325.53	1.67	77.01	24.43	96.10	6.73	17.80
LxBGMnPo	32	1.66	5.85	0.17	1.29	18.76	74.77	2.83	15.72	43.29	505.05	1.03	120.35
LxCOAlGi	43	1.68	5.47	0.14	1.49	91.51	916.22	0.00	166.76	62.73	427.96	0.00	94.21
FoBSMale	46	1.93	6.00	0.21	1.65	54.34	367.25	1.89	83.43	17.99	73.20	3.59	13.59
AiBSCort	49	2.29	6.71	0.15	1.80	65.45	429.05	0.85	90.84	20.30	253.55	2.94	37.09
RpBGPont	45	1.73	4.84	0.28	1.22	45.48	269.77	2.20	60.81	17.05	50.39	2.89	9.99

Tabella 9. Statistiche delle serie di trazione.

I valori medi di resistenza alla trazione sono compresi tra i quasi 68 MPa del faggio in località Alpe Gigiai e gli 8 MPa dell'abete rosso in località Incudine. Tali valori sono coerenti con i range di valori riportati in letteratura per diverse specie (Abernethy e Rutherford, 2001; Bischetti et al., 2005; Genet et al., 2005; Genet et al., 2008; Bischetti et al., 2009).

Come si è soliti fare in statistica per l'analisi dei dati, ai valori di T_r è stata applicata una funzione di trasformazione di tipo logaritmico. Ciò permette di ottenere campioni i cui valori sono distribuiti con andamento "normale" e a cui è possibile applicare i metodi di regressione e confronto propri delle tecniche statistiche tradizionali.

La regressione lineare tra i logaritmi di T_r e i logaritmi dei diametri delle radici porta alla determinazione di parametri a e b della nota relazione diametro-resistenza alla trazione ($T_r = a d^{-b}$) e agli indici di linearità e di capacità predittiva della stessa (significatività e coefficiente di determinazione), per ciascuna specie in ciascuna stazione di campionamento. I valori dei coefficienti sperimentali sono riportati in Tabella 10.

ID	ID specie	ID stazione	ID SISIFO	a	b	R ²	p
1	Fg	Mort	FgLCMort	24.81	0.26	0.32	< 0,001
2	Fg	Mogg	FgLCMogg	22.61	0.37	0.42	< 0,001
3	Fg	Arto	FgBSArto	18.66	0.31	0.23	< 0,001
4	Fg	Gian	FgBSGian	19.72	0.21	0.25	< 0,001
5	Fg	AlGi	FgCOAlGi	56.16	0.64	0.56	< 0,001
6	Pc	AlGi	PcCOAlGi	30.86	0.6	0.45	< 0,001
7	Pc	Fino	PcBGFino	10.83	0.28	0.16	0.004
8	Pc	MnPo	PcBGMnPo	17.44	0.52	0.49	< 0,001
9	Pc	Incu	PcBSIncu	7.54	0.04	0	0.628
10	Pc	Piur	PcSOPiur	11.92	0.48	0.34	< 0,001
11	Pc	ViCh	PcSOViCh	12.69	0.53	0.48	< 0,001
12	Cs	Boar	CsBSBoar	11.47	0.58	0.7	< 0,001
13	Cs	Casa	CsLCCasa	16.9	0.66	0.57	< 0,001
14	Cs	Cran	CsLCCran	16.36	0.38	0.41	< 0,001
15	Cs	ViCh	CsSOViCh	15.59	0.55	0.46	< 0,001
16	Os	Past	OsLCPast	23.27	0.48	0.58	< 0,001
17	Os	Male	OsBSMale	14.77	0.33	0.28	< 0,001
18	Fe	Onet	FeBGOnet	13.56	0.63	0.68	< 0,001
19	Fe	Past	FeLCPast	17.88	0.46	0.69	< 0,001
20	Fe	Pres	FeBSPres	16.88	0.43	0.4	< 0,001
21	Ap	Onet	ApBGOnet	15.46	0.39	0.42	< 0,001
22	Ap	Pres	ApBSPres	25.17	0.37	0.57	< 0,001
23	Lx	MnPo	LxBGMnPo	15.61	1.35	0.81	< 0,001
24	Lx	AlGi	LxCOAlGi	33.44	0.56	0.45	< 0,001
25	Fo	Male	FoBSMale	16.44	0.47	0.48	< 0,001
26	Ai	Cort	AiBSCort	15.92	0.52	0.45	< 0,001
27	Rp	Pont	RpBGPont	16.05	0.36	0.22	0.001

Tabella 10. Parametri di regressione per la relazione di potenza del tipo $Tr = a d^{-b}$.

Il modello di regressione adottato risulta sempre significativo ($p < 0,01$) ad eccezione dell'abete rosso nella stazione di Incudine ($p = 0,6$). In questo caso non si è provveduto a mettere immediatamente le radici in soluzione alcolica e ciò si ritiene possa aver influenzato la resistenza delle radici più sottili ($< 1\text{mm}$), che mostrano infatti dei valori di T_r estremamente bassi. Per tale ragione si è preferito escludere la serie in questione dai confronti con gli altri risultati. La curva interpolante è stata tuttavia mantenuta per il calcolo della coesione radicale, dal momento che vengono considerate solo le radici comprese tra 1 e 10 mm e di conseguenza, la bontà della relazione interpolante ha un peso minore.

Le serie di resistenza alla trazione-diametro, per le diverse specie e stazioni, sono tra loro confrontabili applicando l'ANCOVA; lo strumento permette di ricercare differenze significative (in senso statistico) tra le diverse serie di resistenza a trazione che differiscono per specie e località di appartenenza.

Le ipotesi di normalità e omoschedasticità necessarie all'applicazione dell'ANCOVA sono state verificate rispettivamente con il test di Kolmogorov-Smirnov e il test di Levene, entrambi adatti per piccoli campioni (Soliani, 2005).

Tutte le serie di resistenza alla trazione risultano avere una distribuzione normale, qualora si considerino le trasformate logaritmiche dei valori di T_r .

Confronto dei valori di T_r di una stessa specie in stazioni diverse

Confrontando tutte le serie delle diverse specie risulta che le varianze non sono omogenee ($F_{9,1201} = 4,7$; $p < 0,001$): non è quindi possibile procedere con l'analisi ANCOVA.

Confrontando invece conifere da un lato e latifoglie dall'altro, le varianze risultano confrontabili, e le rette di regressione risultano non parallele tra loro ($F_{1,1207} = 11,4$; $p < 0,001$), e pertanto l'ANCOVA non è applicabile.

Sono state poi prese in considerazione le serie delle specie campionate in stazioni diverse (è il caso di abete rosso, faggio, castagno, carpino nero, frassino maggiore, acero montano, larice), per verificare se pur all'interno della stessa specie ci siano differenze nella relazione resistenza a trazione – diametro.

Abete rosso

Per quanto riguarda l'abete rosso sono state prese in esame le 5 stazioni con l'esclusione di Incudine, come già indicato.

L'ipotesi di parallelismo necessaria all'applicazione dell'ANCOVA è soddisfatta ($F_{4,220} = 1,7$; $p = 0,14$); le 5 rette di regressione possono quindi essere considerate come aventi la stessa pendenza.

Le intercette risultano nel complesso significativamente diverse tra le 5 serie ($F_{4,224} = 22,9$; $p < 0,001$).

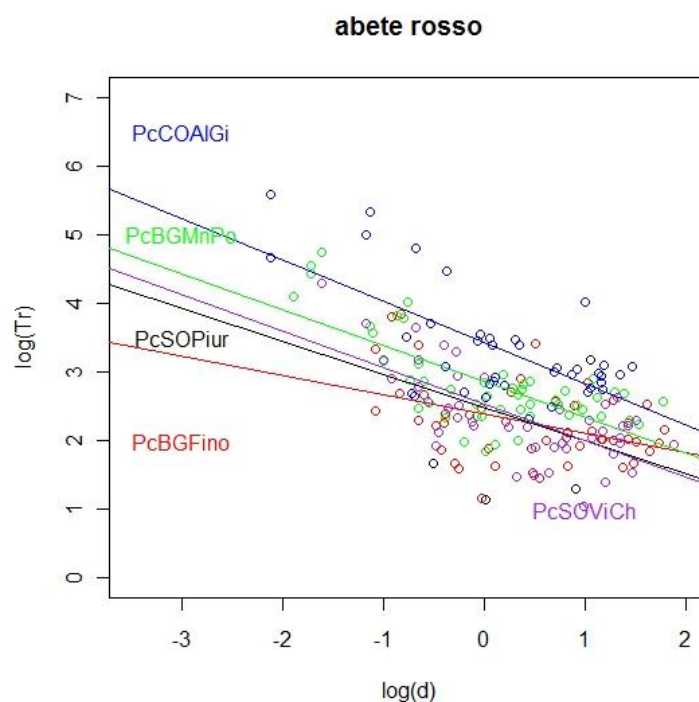


Figura 16. Serie dati di resistenza a trazione per le diverse stazioni dell'abete rosso.

Dal confronto a coppie tra le stazioni non risultano significativamente differenti tra loro le serie delle coppie Fino – Piuro ($F_{1,94} = 0,03$; $p = 0,8$), Fino – Villa di Chiavenna ($F_{1,90} = 0,03$; $p = 0,5$) e Villa di Chiavenna – Piuro ($F_{1,89} = 0,16$; $p = 0,7$). Anche considerando contemporaneamente il fascio delle tre rette il parallelismo e la somiglianza delle intercette sono verificati ($F_{2,135} = 2,12$; $p = 0,12$ e $F_{2,137} = 0,16$; $p = 0,85$).

Al contrario ci sono differenze significative tra queste stazioni e Monte Pora e tra queste stazioni e Alpe Gigiai, così come tra Monte Pora e Alpe Gigiai. I risultati dei confronti sono riportati in Tabella 11.

	PcBGFino	PcBGMnPo	PcBSIncu	PcCOAlGi	PcSOPiur	PcSOViCh
PcBGFino	-	SD	-	SD	SND	SND
PcBGMnPo	SD	-	-	SD	SD	SD
PcBSIncu	-	-	E	-	-	-
PcCOAlGi	SD	SD	-	-	SD	SD
PcSOPiur	SND	SD	-	SD	-	SND
PcSOViCh	SND	SD	-	SD	SND	-

Tabella 11. Sintesi dei risultati dei confronti T_r per l'abete rosso (SD: statisticamente diversi, NSD: non statisticamente diversi; E: stazione esclusa dai confronti)

Faggio

Per quanto riguarda il faggio, la stazione di Monte Pora è stata esclusa poiché sprovvista di dati relativi alla resistenza a trazione delle radici.

Considerando le restanti cinque stazioni non è soddisfatta l'ipotesi di parallelismo necessaria all'applicazione dell'ANCOVA ($F_{4,214} = 3,9$; $p = 0,004$). Escludendo Alpe Gigiai e considerando le rimanenti quattro stazioni, l'ipotesi di parallelismo è verificata, si possono quindi considerare le rette di regressione come aventi lo stesso coefficiente. Le intercette risultano nel complesso significativamente diverse tra le quattro serie ($F_{3,186} = 4,8$; $p = 0,002$), sebbene non in modo notevole (Figura 17), con valori medi di T_r decrescenti nell'ordine Morterone, Moggio, Gianico, Artogne.

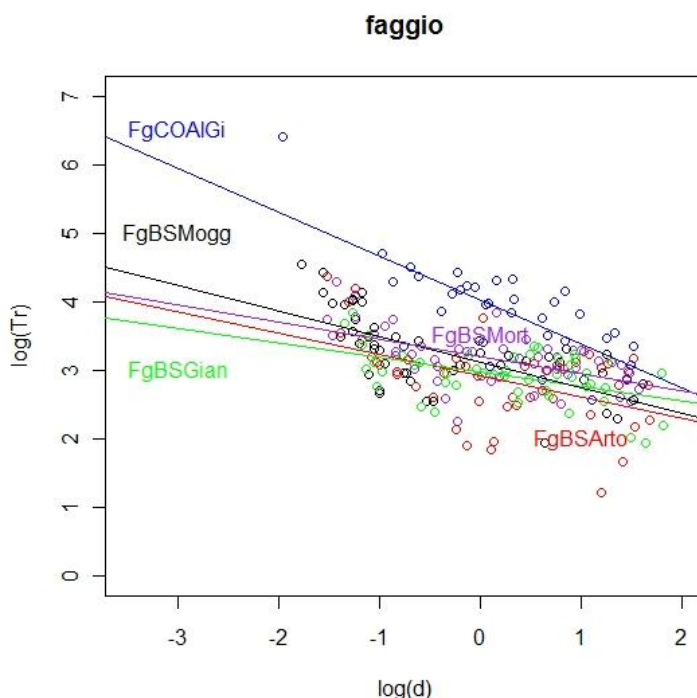


Figura 17. Serie dati di resistenza a trazione per le diverse stazioni a faggio.

Confrontando le serie a coppie ed escludendo la coppia Gianico - Moggio per la quale le varianze non sono omogenee (test di Levene, $F_{1,93} = 11,94$; $p < 0,001$) risultano statisticamente differenti fra loro solamente le serie di resistenza alla trazione - diametro relative alle coppie di stazioni Morterone - Gianico (ANCOVA, $F_{1,93} = 10,5$; $p = 0,001$) e Morterone - Artogne (ANCOVA, $F_{1,93} = 10,9$; $p = 0,001$). Sono per conseguenza statisticamente simili le coppie Artogne-Moggio, Artogne-Gianico e Moggio-Morterone. I risultati sono riassunti in Tabella 12.

	FgBGMnPo	FgBSArto	FgBSGian	FgCOAGi	FgLCMogg	FgLCMort
FgBGMnPo	E	-	-	-	-	-
FgBSArto	-	-	SND	-	SND	SD
FgBSGian	-	SND	-	-	VNO	SD
FgCOAGi	-	-	-	E	-	-
FgLCMogg	-	SND	VNO	-	-	SND
FgLCMort	-	SD	SD	-	SND	-

Tabella 12. Sintesi dei risultati dei confronti Tr per il faggio (SD: statisticamente diversi, NSD: non statisticamente diversi; E: stazione esclusa dai confronti, VNO: varianze non omogenee).

Castagno

Considerando le quattro stazioni del castagno, l'ipotesi di parallelismo necessaria all'applicazione dell'ANCOVA è soddisfatta ($F_{3,164} = 2,1$; $p = 0,1$), e le intercette risultano significativamente differenti tra loro ($F_{3,167} = 6,7$; $p < 0,001$) con valori decrescenti nell'ordine in Casargo, Crandola, Villa di Chiavenna e Boario (Figura 18).

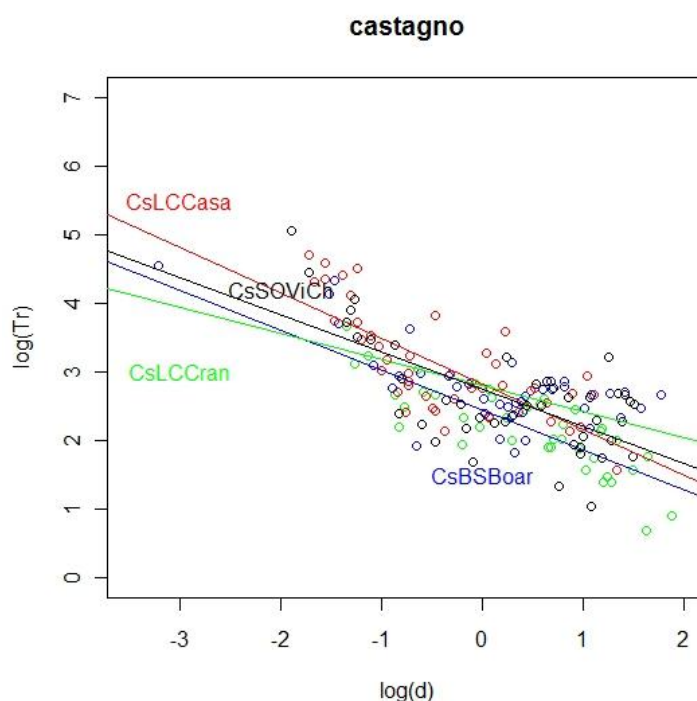


Figura 18. Serie dati di resistenza a trazione per le diverse stazioni a castagno.

Considerando le serie delle diverse stazioni a coppie, risultano statisticamente differenti tra loro le serie di Boario – Villa di Chiavenna (ANCOVA, $F_{1,82} = 8,89$; $p = 0,003$); e quelle di Boario – Crandola (ANCOVA, $F_{1,78} = 18,21$; $p < 0,001$). Le serie delle stazioni Casargo – Boario non sono confrontabili tramite ANCOVA in quanto le varianze non risultano omogenee (Test di Levene, $F_{1,86} = 8,82$; $p = 0,003$); le serie di Casargo e Crandola risultano parallele solo per un livello di significatività (ANCOVA, $F_{1,83} = 5,93$; $p = 0,02$); qualora si considerassero le rette parallele, le intercette risultano non differenti (ANCOVA, $F_{1,84} = 0,43$; $p = 0,51$). Le serie Villa di Chiavenna – Casargo e Villa di Chiavenna – Crandola risultano parallele e non differenti.

	CsBSBoar	CsLCCasa	CsLCCran	CsSOViCh
CsBSBoar	-	VNO	SD	SD
CsLCCasa	VNO	-	SND	SND
CsLCCran	SD	SND	-	SND
CsSOViCh	SD	SND	SND	-

Tabella 13 Sintesi dei risultati dei confronti T_r per il castagno (SD: statisticamente diversi, NSD: non statisticamente diversi; E: stazione esclusa dai confronti, VNO: varianze non omogenee)

Carpino nero

Nel caso del carpino nero, le stazioni di campionamento sono solo due: Pasturo e Malegno. L'ipotesi di parallelismo necessaria all'applicazione dell'ANCOVA è soddisfatta ($F_{1,81} = 2,18$; $p = 0,14$), le intercette risultano significativamente diverse (ANCOVA, $F_{1,81} = 16,7$; $p < 0,001$), con valori di T_r maggiori a Pasturo (Figura 19).

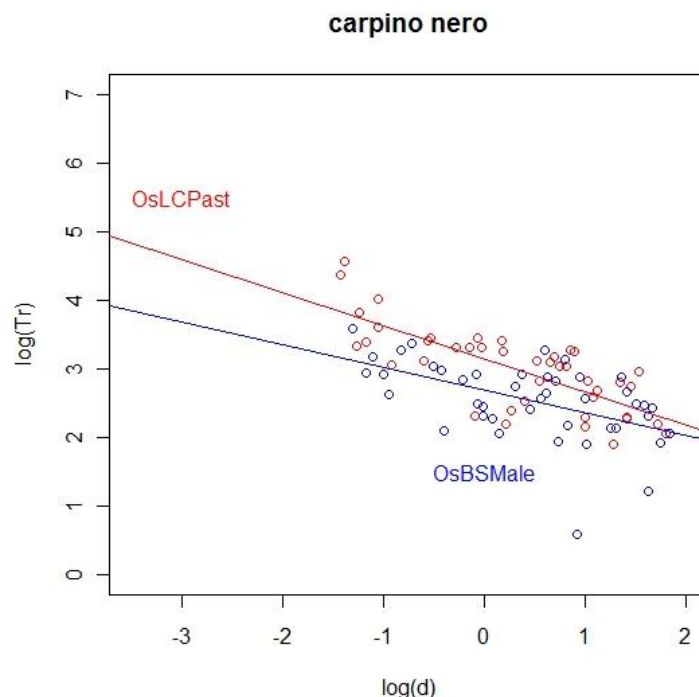


Figura 19. Serie dati di resistenza a trazione per le diverse stazioni a carpino nero.

Frassino maggiore

Per quanto riguarda il frassino maggiore, considerando le 3 stazioni, l'ipotesi di parallelismo per l'applicazione dell'ANCOVA è soddisfatta di strettissima misura ($F_{2,138} = 2,9$; $p = 0,06$) e le intercette risultano significativamente differenti ($F_{2,140} = 6,1$; $p = 0,003$) come evidenziato dal grafico di Figura 20.

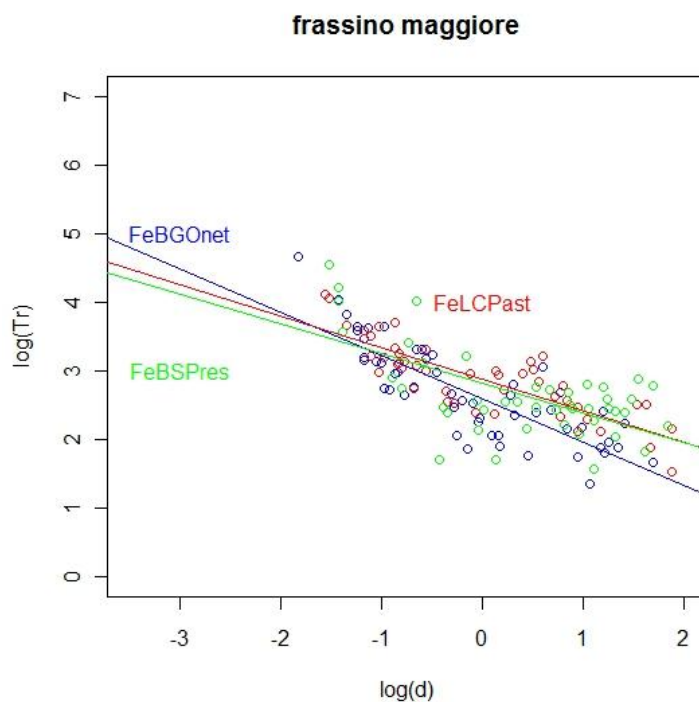


Figura 20. Serie dati di resistenza a trazione per le diverse stazioni a frassino maggiore.

Confrontando le coppie di stazioni, risultano statisticamente differenti le serie Oneta – Prestine per $\alpha = 0,05$ (ANCOVA, $F_{1,94} = 6,72$; $p = 0,01$) e le serie Oneta – Pasturo (ANCOVA, $F_{1,97} = 13,2$; $p < 0,001$). Le serie Pasturo - Prestine risultano invece parallele (ANCOVA, $F_{1,87} = 0,11$; $p = 0,74$) e non differenti tra loro (ANCOVA, $F_{1,88} = 0,34$; $p = 0,56$).

	FeBGOnet	FeBSPres	FeLCPast
FeBGOnet	-	SD	SD
FeBSPres	SD	-	SND
FeLCPast	SD	SND	-

Tabella 14. Sintesi dei risultati dei confronti T_r per il frassino maggiore (SD: statisticamente diversi, NSD: non statisticamente diversi);

Acero di monte

Confrontando le serie delle due stazioni dell'acero montano, l'ipotesi di parallelismo per l'applicazione dell'ANCOVA è pienamente soddisfatta ($F_{1,93} = 0,03$; $p = 0,86$). Le intercette risultano differenti ($F_{1,94} = 48,73$; $p < 0,001$). Come nel caso del frassino maggiore, i valori di T_r risultano più elevati a Prestine rispetto a Oneta (Figura 21).

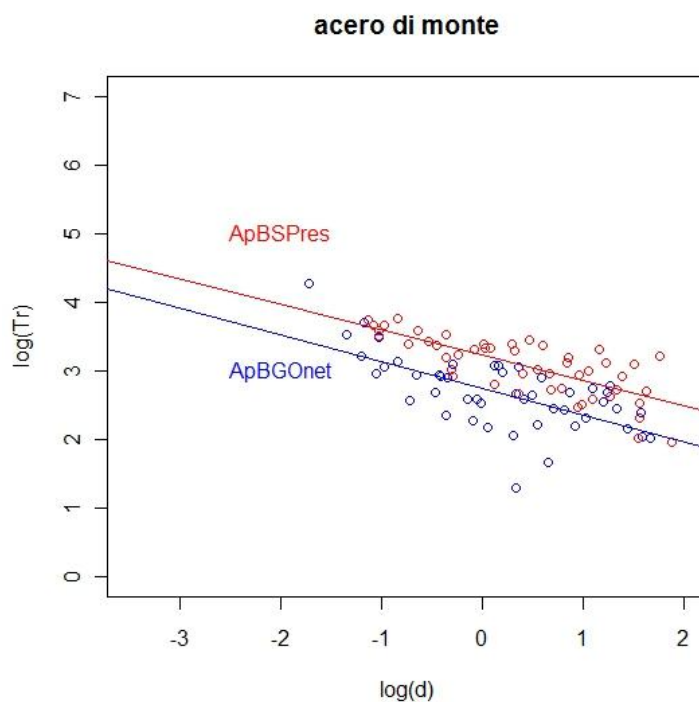


Figura 21. Serie dati di resistenza a trazione per le diverse stazioni ad acero di monte.

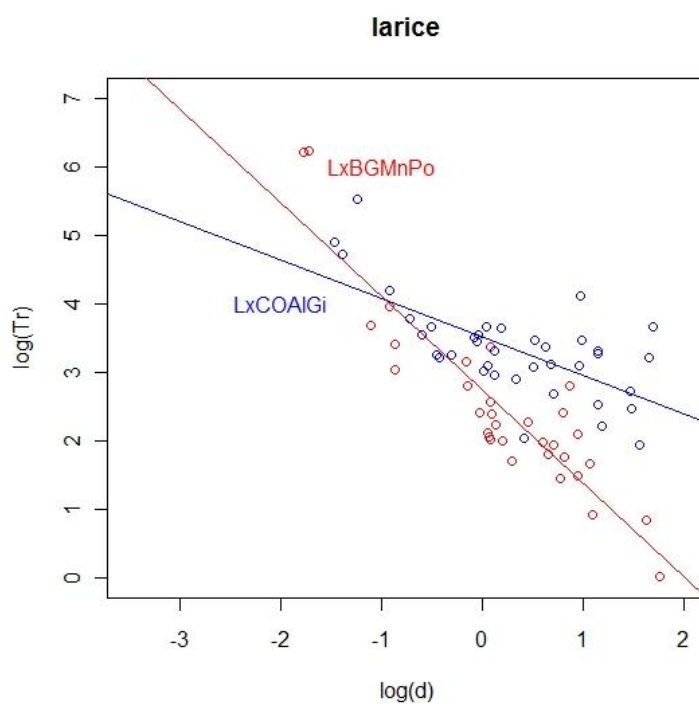


Figura 22. Serie dati di resistenza a trazione per le diverse stazioni a larice.

Larice

Nel caso del larice, considerando le stazioni di Monte Pora e Alpe Gigiai, non è soddisfatto il requisito di parallelismo (Figura 22) necessario all'applicazione dell'ANCOVA ($F_{1,66} = 27$; $p < 0,001$); i campioni raccolti in Alpe Gigiai mostrano valori di resistenza a trazione generalmente maggiori.

Confronti T_r tra specie diverse in una stessa stazione

E' stato fatto un ulteriore confronto tra specie diverse campionate nella stessa stazione, per verificare se condizioni ambientali simili possano determinare analogie nella relazione resistenza a trazione-diametro.

Alpe Gigiai

Nella stazione di Alpe Gigiai si hanno a disposizione le curve di trazione delle specie abete rosso, larice e faggio. Con riferimento al grafico di Figura 23, l'ipotesi di parallelismo necessaria all'applicazione dell'ANCOVA è verificata tra queste specie nella medesima stazione ($F_{2,104} = 0,13$; $p = 0,8$); le intercette risultano tuttavia statisticamente differenti tra loro (ANCOVA, $F_{2,106} = 12$; $p < 0,001$)

Confrontando le specie a coppie, risultano significativamente differenti abete rosso e faggio (ANCOVA, $F_{1,69} = 21$; $p < 0,001$) e larice e faggio (ANCOVA, $F_{1,68} = 17$; $p < 0,001$); risultano invece non significativamente differenti le serie delle due conifere, abete rosso e larice (ANCOVA, $F_{1,74} = 0,47$; $p = 0,5$), come è evidente anche dal grafico.

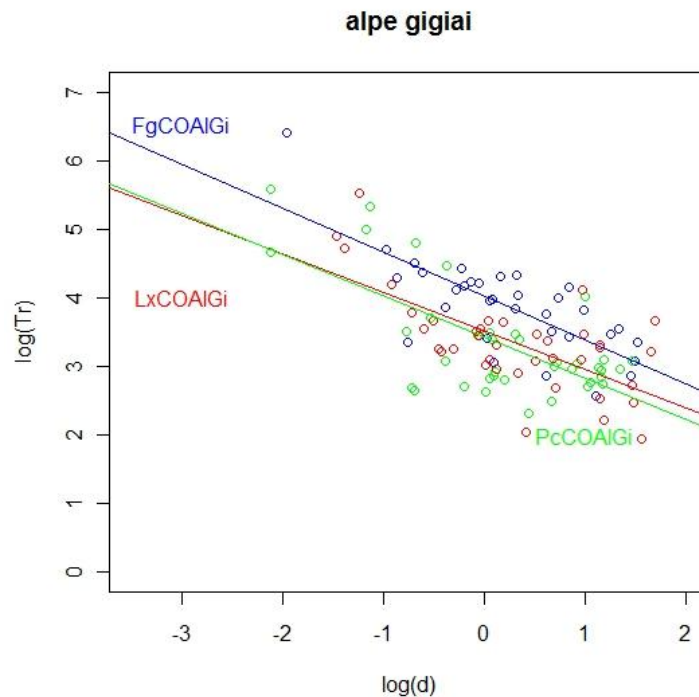


Figura 23. Confronto delle curve di trazione ottenute dai campioni prelevati in Alpe Gigiai.

	Fagus sylvatica Alpe Gigiai	Picea abies Alpe Gigiai	Larix decidua Alpe Gigiai
Fagus sylvatica Alpe Gigiai	-	SD	SD
Picea abies Alpe Gigiai	SD	-	SND
Larix decidua Alpe Gigiai	SD	SND	-

Tabella 15. Sintesi dei risultati dei confronti T_r per la stazione Alpe Gigiai (SD: statisticamente diversi, NSD: non statisticamente diversi);

Malegno

Nella stazione di Malegno si hanno a disposizione le curve delle specie frassino orniello e carpino nero. L'ipotesi di parallelismo per l'applicazione dell'ANCOVA è verificata ($F_{1,85} = 1,5$; $p = 0,2$); le intercette risultano non significativamente differenti tra loro (ANCOVA, $F_{1,86} = 0,3$; $p = 0,6$). Di fatto le due serie si sovrappongono anche graficamente (Figura 24).

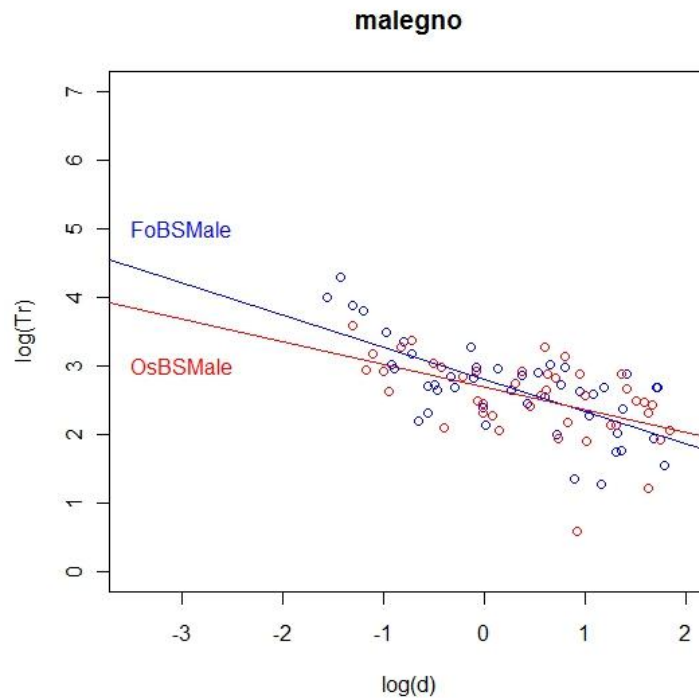


Figura 24. Confronto delle curve di trazione ottenute dai campioni prelevati in Malegno.

Monte Pora

Nella stazione Monte Pora si hanno a disposizione le curve delle specie abete rosso e larice. L'ipotesi di parallelismo per l'applicazione dell'ANCOVA non è tuttavia verificata ($F_{1,78} = 38$; $p < 0,001$) come evidente anche dall'andamento dei grafici di Figura 25. Tuttavia, se si considerano i valori medi e la varianza di entrambe le specie, le due serie risultano statisticamente simili (ANOVA, $F_{1,80} = 1,43$; $p = 0,24$).

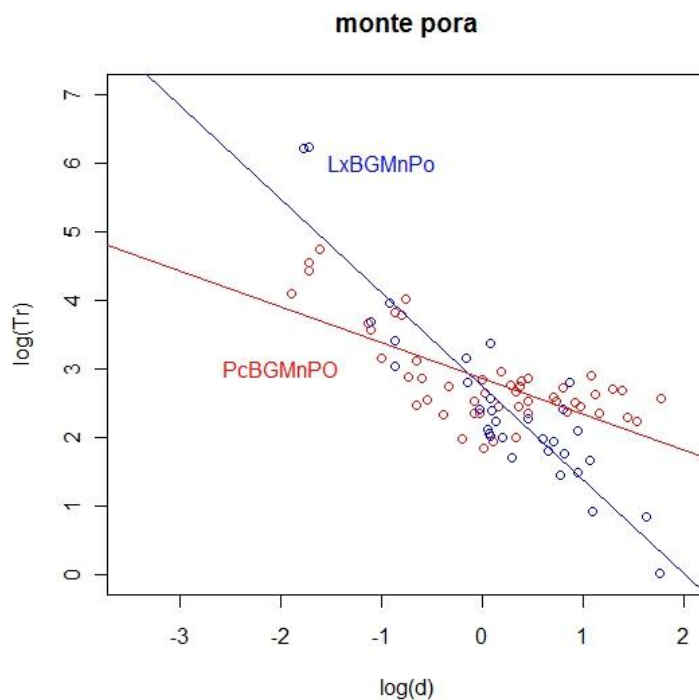


Figura 25. Confronto delle curve di trazione ottenute dai campioni prelevati in Monte Pora.

Oneta

Nella stazione Oneta si hanno a disposizione le curve delle specie acero montano e frassino maggiore. L'ipotesi di parallelismo per l'applicazione dell'ANCOVA non è verificata ($F_{1,97} = 7$; $p = 0,007$) anche se apparentemente le differenze tra le serie di dati sono minime (Figura 26). Dall'ANOVA risultano non esserci differenze significative tra le medie delle due serie ($F_{1,99} = 0,58$; $p = 0,45$).

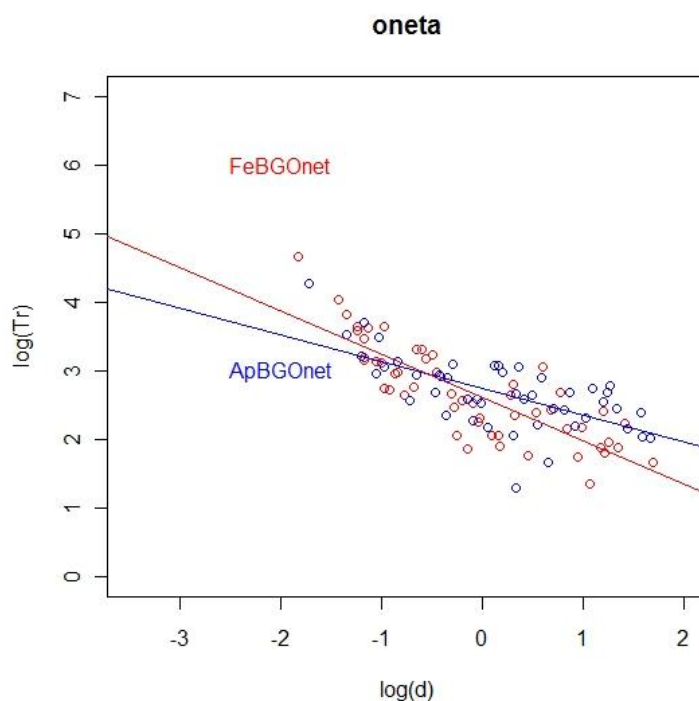


Figura 26. Confronto delle curve di trazione ottenute dai campioni prelevati in Oneta.

Pasturo

Nella stazione Pasturo si hanno a disposizione le curve delle specie frassino maggiore e carpino nero (Figura 27). L'ipotesi di parallelismo per l'applicazione dell'ANCOVA è verificata ($F_{1,85} = 0,07$; $p = 0,78$); le intercette risultano significativamente differenti tra loro (ANCOVA, $F_{1,86} = 12$; $p < 0,001$).

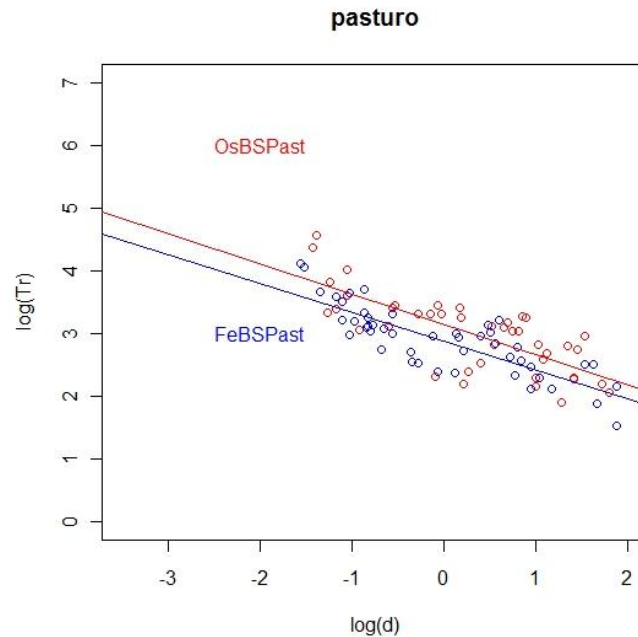


Figura 27. Confronto delle curve di trazione ottenute dai campioni prelevati in Pasturo.

Prestine

Nella stazione Prestine si hanno a disposizione le curve delle specie frassino maggiore e acero montano (Figura 28). L'ipotesi di parallelismo per l'applicazione dell'ANCOVA è verificata ($F_{1,89} = 0,4$; $p = 0,52$); le intercette risultano significativamente differenti tra loro (ANCOVA, $F_{1,90} = 26$, $p < 0,001$).

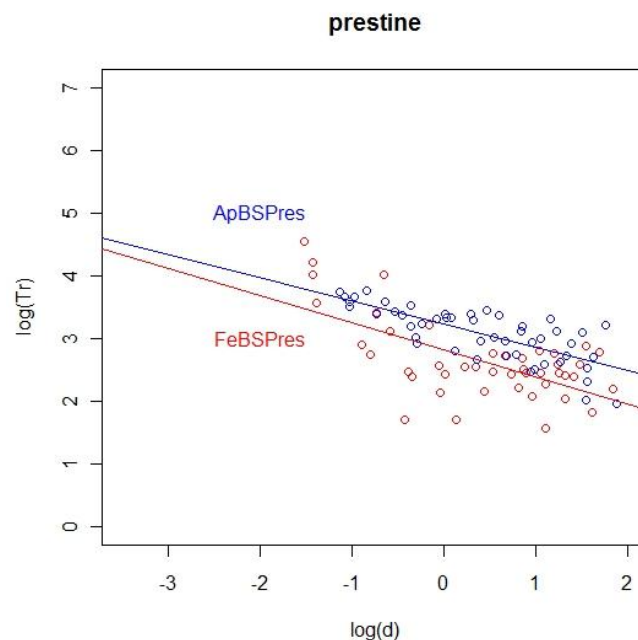


Figura 28. Confronto delle curve di trazione ottenute dai campioni prelevati in Prestine.

Confronto di T_r tra specie

Un ulteriore sforzo è stato compiuto al fine di verificare l'esistenza di differenze significative tra le diverse specie. Malgrado l'elevata variabilità che caratterizza il fenomeno, i valori di resistenza a trazione appartenenti ad una stessa specie sono stati accorpati al fine di ottenere dei campioni specie-specifici. Operando in questo modo è stato possibile ottenere dei campioni di numerosità elevata che hanno permesso di confrontare le radici sia con riferimento ai diametri maggiori di 1 mm sia per diverse classi diametriche (1-2 mm, 2-5 mm, > 5 mm). La creazione di un'unica serie campionaria propria di ciascuna specie ha portato inoltre alla formazione di campioni che incorporano al proprio interno tutta la variabilità indagata, sia di origine genetica che ambientale. Di conseguenza i confronti statistici tra le diverse serie campionarie hanno permesso, perlomeno in linea teorica, di individuare dei trend del fenomeno, che, essendo i confronti basati sull'appartenenza dei dati ad una determinata specie, dovrebbero essere espressione delle differenze genetiche tra specie.

La maggior numerosità derivata dall'accorpamento dei dati, ha permesso di analizzare la resistenza a trazione escludendo le radici di diametro inferiore a un millimetro. Adottando una soglia diametrica di tale valore si elimina di fatto molta della variabilità presente nei dati raccolti e si esclude una porzione rilevante degli errori che interessano le procedure di misurazione e campionamento. Le misure relative alle radici di diametro minore di 1 mm sono infatti interessate da elevati errori metodologici e strumentali, sia di tipo sistematico che casuale. A ciò si aggiunga che sono proprio le radici più sottili le più sensibili ai fattori ambientali e alle loro variazioni temporali, talvolta con risposte addirittura stagionali (Joslin e Wolfe, 1998; Joslin et al., 2000 cit. Hales et al. 2009; Pregitzer et al., 2002).

Con riferimento alle specie per le quali si hanno a disposizione un maggior numero di campionamenti (*Castanea sativa*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Picea abies*) sono stati condotti dei confronti prendendo in considerazione sia tutte le radici di diametro maggiore di 1 mm, sia le diverse classi diametriche (1-2 mm, 2-5 mm, > 5 mm).

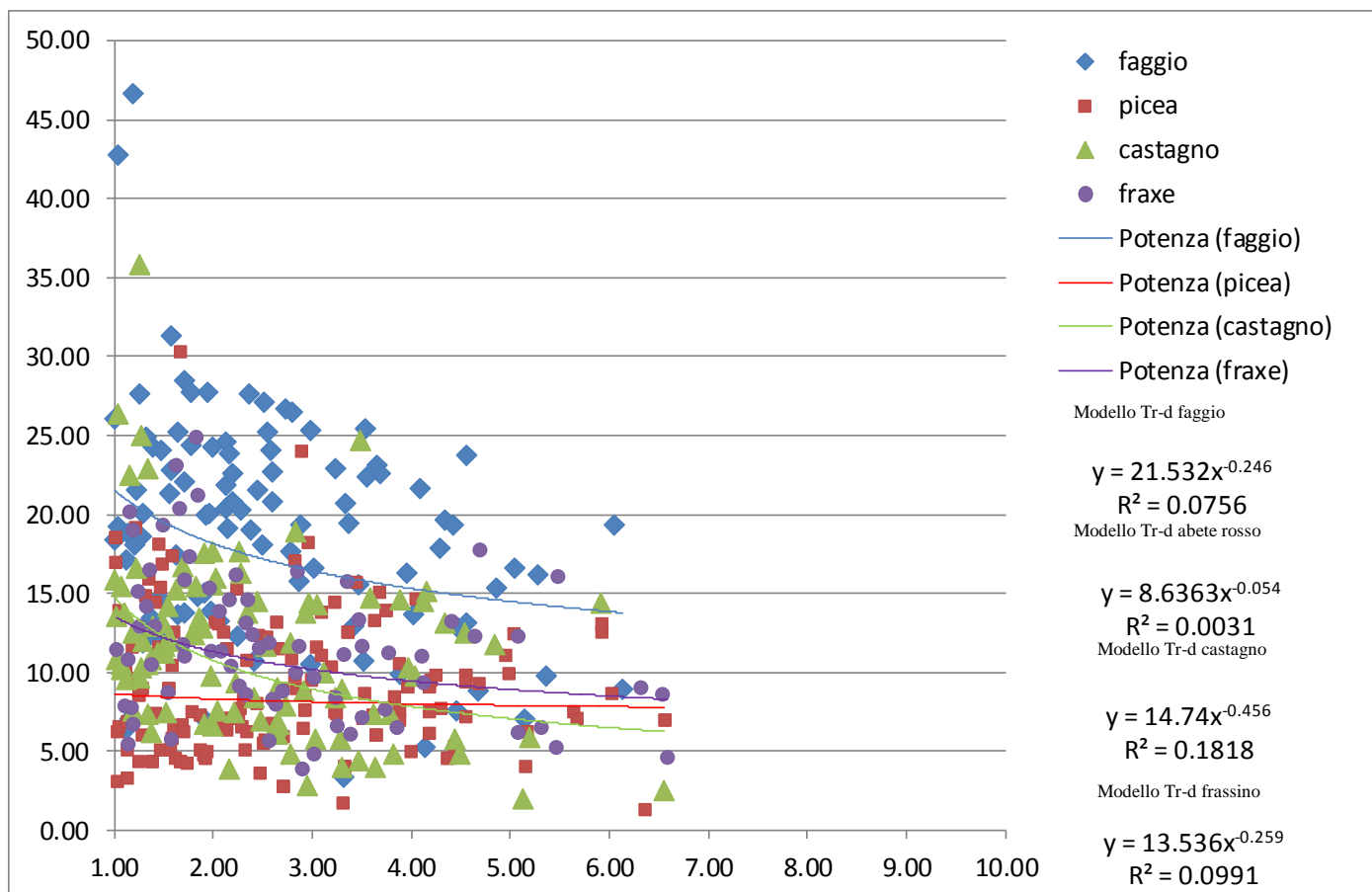


Figura 29. Valori di T_r per le specie *Castanea sativa*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior* e *Picea abies*.

Le regressioni potenziali risultano significative, anche se con valori di R^2 bassi, per faggio, castagno, e frassino, non lo sono invece per l'abete rosso. Ciò in ragione dell'esclusione delle radici inferiori al millimetro, che molto contribuiscono alla bontà di questo tipo di modello.

Assumendo le relazioni sopraindicate, utilizzando una trasformazione logaritmica dei valori di T_r e verificando, con i test di Kolmogorov-Smirnov e il test di Levene, le ipotesi di normalità e omoschedasticità necessarie all'applicazione dell'ANOVA e dell'ANCOVA sono state sviluppati due filoni di analisi. Il primo ha visto l'applicazione dell'ANCOVA alle coppie di valori T_r-d per le radici superiori al millimetro. Il secondo ha visto dei confronti tra specie con riferimento alle classi diametriche.

La Figura 29 evidenzia una maggiore resistenza del faggio rispetto alle altre specie.

Confronto tra specie (diametro > 1mm) mediante ANCOVA

Considerando tutte e quattro le serie, le rette risultano non parallele ($F_{3,424} = 3,88$; $p = 0,009$). Tuttavia, escludendo l'abete rosso, l'ipotesi di parallelismo necessaria all'applicazione dell'ANCOVA è soddisfatta e le intercette risultano significativamente differenti ($F_{2,267} = 45,90$; $p < 0,001$).

I confronti tra le diverse coppie possono essere così riassunti:

- picea-faggio: intercette differenti, le curve sono significativamente diverse ($F_{1,258} = 162,58$; $p < 0,001$);
- castagno-faggio: intercette differenti, le curve sono significativamente diverse ($F_{1,195} = 75,64$; $p < 0,001$);
- frassino-faggio: intercette differenti, le curve sono significativamente diverse ($F_{1,170} = 1,84$; $p < 0,001$);

- abete-castagno: rette non parallele ($F_{1,255} = 10,11$; $p < 0,001$); confrontandoli per un valore specifico della covariata (Soliani, 2005) possono essere considerati statisticamente differenti ($F_{1,256} = 10,30$; $p < 0,001$);
- abete-frassino: intercette differenti ($F_{1,231}=16,98$; $p < 0,001$), le curve sono significativamente diverse;
- frassino-castagno: intercette non differenti ($F_{1,168} = 1,50$; $p = 0,238$), le curve NON sono significativamente diverse.

Confronto tra specie (classi diametriche 1-2mm, 2-5mm, >5mm) con ANOVA

Con riferimento alle classi diametriche 1-2mm, 2-5mm, >5mm, sono stati calcolati i valori medi di T_r per ciascuna classe ed è stata applicata l'ANOVA. Tutte le serie di resistenza alla trazione risultano avere una distribuzione normale, qualora si considerino le trasformate logaritmiche dei valori di T_r .

CLASSI D	FAGGIO			PICEA			CASTAGNO			FRASSINO		
	n	media Tr	media d	n	media Tr	media d	n	media Tr	media d	n	media Tr	media d
1-2 mm	41	20.42	1.49	54	9.42	1.43	45	13.66	1.44	27	13.98	1.46
2-5 mm	53	18.46	3.18	96	9.17	3.20	49	10.15	3.13	38	10.64	3.04
> 5 mm	6	12.97	5.50	11	7.95	5.81	4	6.19	5.70	8	8.59	5.73

Tabella 16. Statistiche dei valori di T_r delle specie considerate per le differenti classi diametriche.

Dalla Tabella 16 si evince che il faggio presenta una maggiore resistenza a trazione media rispetto alle altre specie, per tutte le classi diametriche prese in considerazione.

Considerando le medie di T_r delle quattro specie contemporaneamente si hanno i seguenti risultati:

- classe 1-2 mm: le medie di T_r delle quattro specie risultano significativamente differenti ($F_{3,163}=23,45$; $p < 0,001$);
- classe 2-5 mm: le medie di T_r delle quattro specie risultano significativamente differenti ($F_{3,232}=54,11$; $p < 0,001$);
- > 5 mm: le medie delle quattro specie risultano non significativamente differenti, ma al limite del livello di significatività ($F_{3,25}=2,4934$; $p=0,083$).

Considerando le coppie:

- classe 1- 2 mm. Le medie di T_r delle coppie abete rosso-castagno ($F_{1,84}=19,78$; $p < 0,001$), abete rosso-faggio ($F_{1,93}=56,86$; $p < 0,001$), abete rosso-frassino ($F_{1,79}=12,37$; $p < 0,001$), faggio-frassino ($F_{1,66}=12,71$; $p=0,001$), faggio-castagno ($F_{1,66}=12,71$; $p=0,001$) sono differenti mentre frassino-castagno sono statisticamente simili ($F_{1,70}=0,0554$; $p=0,815$) (Figura 30);

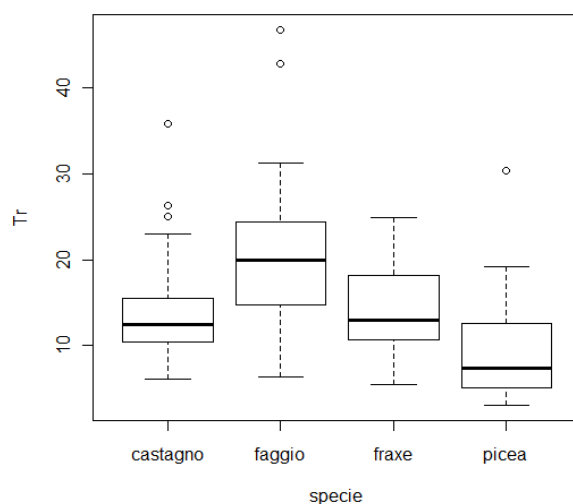


Figura 30. Box plot valori T_r per la classe 1-2 mm.

- classe 2-5mm. Le medie delle coppie castagno-faggio ($F_{1,100}=60,92$; $p < 0,001$), faggio-frassino ($F_{1,89}=53,95$; $p < 0,001$), abete rosso-faggio ($F_{1,147}=140,96$; $p < 0,001$) e abete rosso-frassino ($F_{1,132}=4,6$; $p=0,034$) sono differenti mentre frassino-castagno ($F_{1,85}=0,2885$; $p=0,593$) e castagno-abete rosso ($F_{1,143}=1,93$; $p=0,168$) non lo sono.

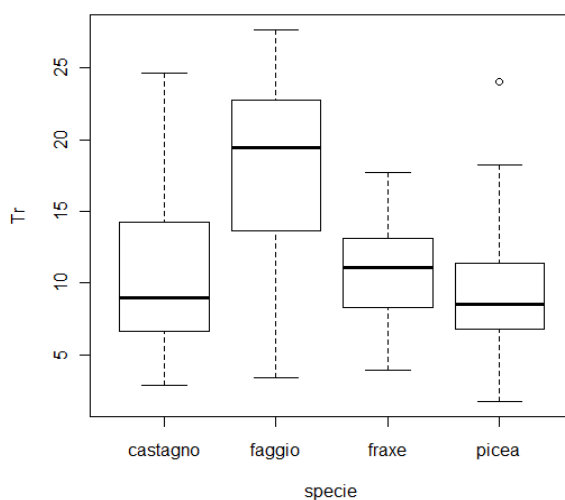


Figura 31. Box plot valori T_r per la classe 2-5 mm.

- classe > 5 mm. Le medie delle coppie risultano sempre NON differenti, a eccezione di abete rosso-faggio (solo per un livello di significatività) ($F_{1,15}=5,65$; $p=0,312$).

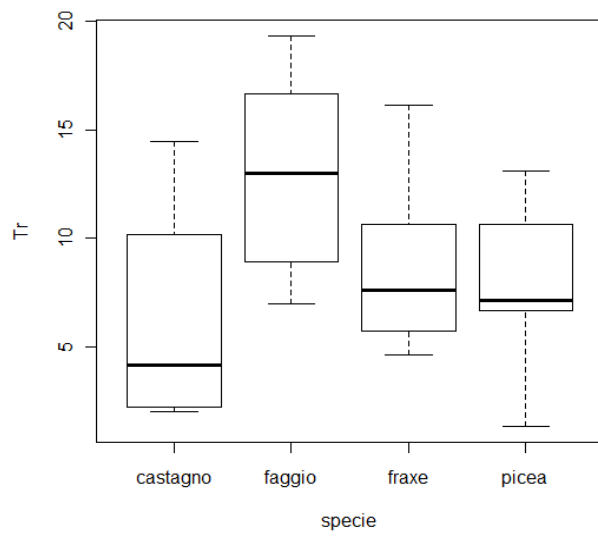


Figura 32. Box plot valori T_r per la classe >5 mm.

3.7 Area radicata

Se si prendono in considerazione i valori di area radicata relativi ai singoli profili si registra una variabilità elevata anche all'interno della medesima stazione. Avendo verificato una distribuzione normale dei dati a disposizione per le diverse classi di profondità, è stato calcolato il profilo medio di area radicata dei profili appartenenti alla medesima specie e stazione (Figura 33 e Figura 34). Il profilo medio è stato ottenuto calcolando per ciascuno strato di profondità la media aritmetica dei valori di RAR.

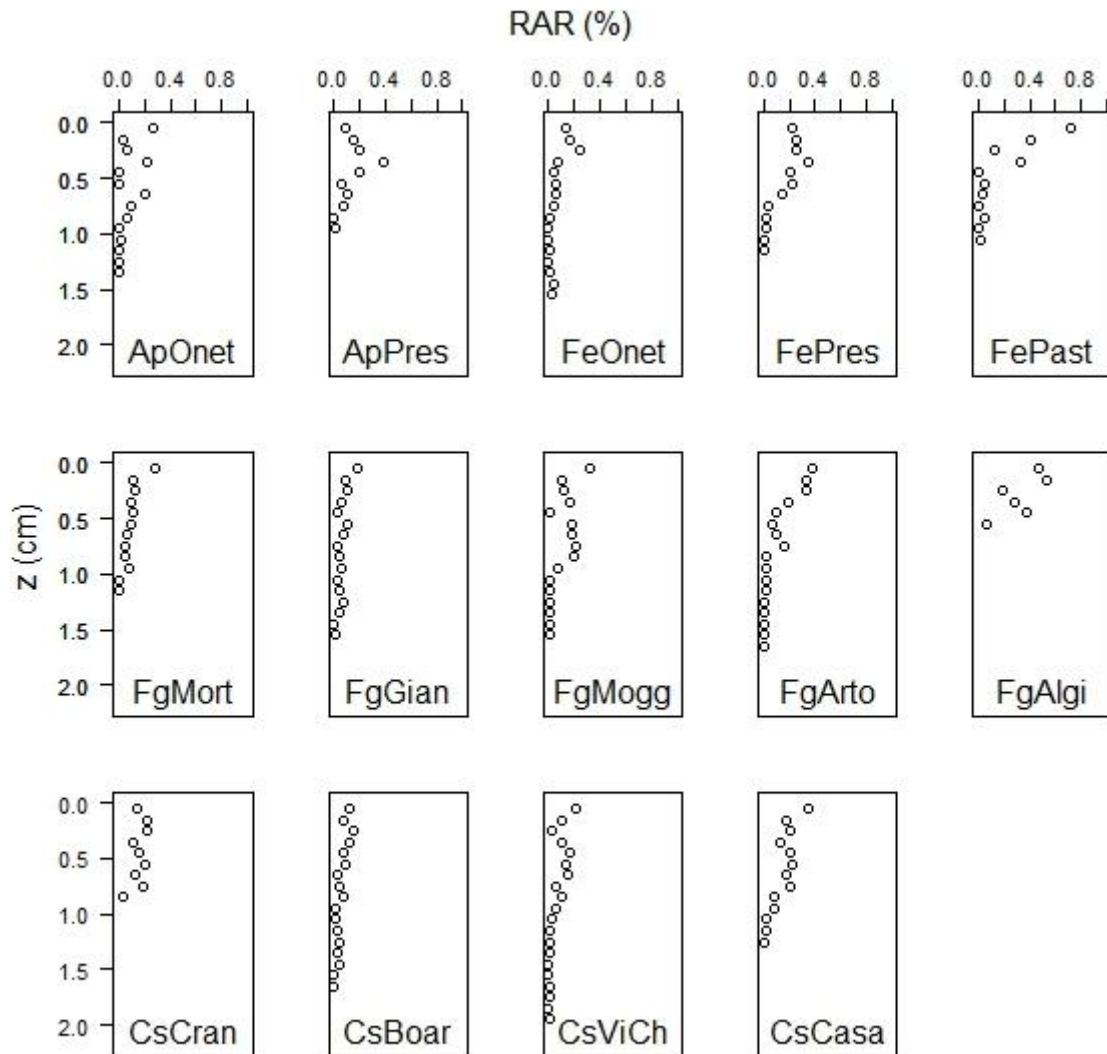


Figura 33. Profili medi di area radicata nelle diverse stazioni per le specie acero montano (Ap), castagno (Cs), frassino maggiore (Fe), faggio (Fg).

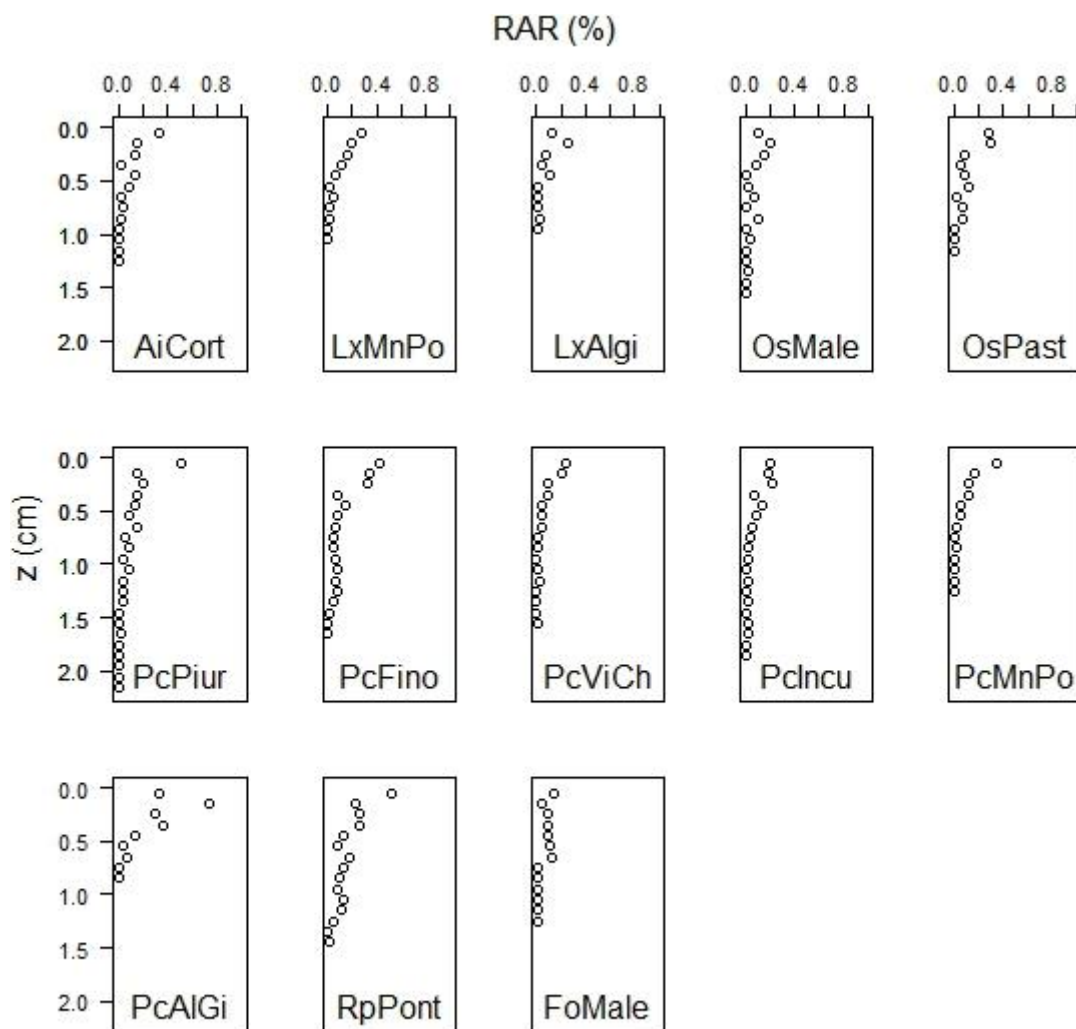


Figura 34. Profili medi di area radicata nelle diverse stazioni per le specie ontano bianco (Ai), orniello (Fo), larice (Lx), carpino nero (Os), abete rosso (Pc), robinia (Rp).

Tra i profili medi delle diverse stazioni si può notare una certa variabilità per quanto riguarda i valori di area radicata e la loro distribuzione rispetto alla profondità; in tutti i casi si registra comunque un trend in diminuzione dell'area radicata all'aumentare della profondità, eccezion fatta per gli strati più superficiali.

Per descrivere l'andamento dei profili medi di area radicata di ciascuna specie in ciascuna stazione in funzione della profondità è stata applicata un'equazione esponenziale del tipo:

$$RAR_m = e^{a-bZ} \quad \text{Equazione 25}$$

in cui RAR_m è il valore medio di area radicata a una data profondità e Z la profondità espressa in metri, a e b sono coefficienti dipendenti da specie e stazione. Di seguito (Tabella 17) vengono riportati i risultati del modello applicato ai diversi profili medi di ciascuna stazione.

stazione	a	b	R ²	p
FgLCMort	0.79	-3.89	0.64	0.002
FgLCMogg	1.00	-3.07	0.55	0.001
FgBSArto	0.59	-3.21	0.91	< 0,001
FgBSGian	1.90	-1.51	0.54	0.001
FgCOAIGi	0.45	-2.95	0.53	0.100
PcCOAIGi	0.39	-6.57	0.80	0.001
PcBGFino	0.81	-2.40	0.61	< 0,001
PcBGMnPo	0.95	-4.66	0.75	<0,001
PcBSIncu	1.40	-2.28	0.80	< 0,001
PcSOPiur	0.85	-2.51	0.84	< 0,001
PcSOViCh	1.55	-2.99	0.64	< 0,001
CsBSBoar	1.83	-1.73	0.53	0.001
CsLCCasa	0.42	-3.20	0.63	0.001
CsLCCran	1.44	-1.22	0.28	0.140
CsSOViCh	1.13	-2.79	0.76	< 0,001
OsLCPast	0.77	-4.35	0.68	< 0,001
OsBSMale	1.85	-2.34	0.64	< 0,001
FeBGOnet	2.04	-1.55	0.43	0.014
FeLCPast	0.35	-4.56	0.81	< 0,001
FeBSPres	0.35	-3.75	0.85	< 0,001
ApBGOnet	1.72	-2.52	0.31	0.092
ApBSPres	1.25	-2.21	0.46	0.043
LxBGMnPo	0.92	-4.38	0.93	< 0,001
LxCOAIGi	1.65	-3.27	0.73	0.002
FoBSMale	1.47	-3.50	0.74	< 0,001
AiBSCort	1.05	-3.95	0.90	< 0,001
RpBGPont	0.62	-2.34	0.68	< 0,001

Tabella 17. Parametri del modello di regressione lineare tra logaritmo di RAR e Z.

La regressione lineare tra il logaritmo dell'area radicata media e la profondità risulta significativa per tutte le stazioni ($p < 0,01$) ad eccezione del castagno, stazione Crandola, del faggio, stazione Alpe Gigiai e dell'acero montano, stazione Oneta. Nel caso dell'acero montano di Prestine e del frassino maggiore di Oneta il modello risulta significativo solo per un livello di significatività ($p < 0,05$).

I valori medi di area radicata a una profondità compresa tra 50 e 100 centimetri (la più interessata dagli scivolamenti superficiali) vanno da 0,14% del faggio di Moggio a 0,011 % del faggio di Alpe Gigiai (Tabella 18). Le radici del faggio di Alpe Gigiai si spingono solo fino a una profondità di 65 centimetri; nel caso di abete rosso di Alpe Gigiai, frassino maggiore di Oneta, castagno di Crandola sono presenti fino a 85 centimetri; fino a 95 centimetri nel caso del larice di Alpe Gigiai.

In tutti i casi, i valori massimi di area radicata si riscontrano nei primi 20-30 centimetri di profilo. I castagni di Casargo e Crandola, il frassino maggiore di Prestine, il faggio di Moggio e la robinia mostrano valori elevati di area radicata (circa 0,2 %) anche a una profondità compresa tra 50 e 70 centimetri.

Per quanto riguarda la profondità massima raggiunta dalle radici, questa è determinata dalle interazioni tra la fenologia radicale, la struttura del suolo, la presenza di strati saturi e la competizione interspecifica (Sudmeyer, 2002 cit. Bischetti et al., 2010). Bisogna tuttavia tener presente che non sempre durante lo scavo dei profili è possibile raggiungere la profondità massima dello strato radicato; non è possibile quindi fare considerazioni attendibili sulla capacità massima di penetrazione delle diverse specie nelle diverse stazioni. Tuttavia, non si può escludere che singole radici possano spingersi più in profondità rispetto a quanto rilevato, ma dato il numero estremamente ridotto è probabile che il loro contributo ai fini del rinforzo non sia rilevante.

stazione	RARm 50 e 100 cm	RAR 55 cm	RAR 65 cm	RAR 75 cm	RAR 85 cm	RAR 95 cm	RAR 105 cm
FgLCMort	0.0525	0.0942	0.0555	0.0453	0.0388	0.0782	0.0029
FgLCMogg	0.1379	0.1748	0.1765	0.2055	0.1933	0.0758	0.0011
FgBSArto	0.0653	0.0734	0.0952	0.1579	0.0231	0.0250	0.0170
FgBSGian	0.0568	0.1098	0.0783	0.0274	0.0378	0.0564	0.0308
FgCOAlGi	0.0113	0.0677	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
PcCOAlGi	0.0179	0.0399	0.0597	0.0018	0.0061	0.0000	0.0000
PcBGFinò	0.0623	0.0745	0.0597	0.0509	0.0475	0.0560	0.0855
PcBGMnPo	0.0169	0.0522	0.0189	0.0047	0.0237	0.0003	0.0015
PcBSIncu	0.0384	0.0905	0.0495	0.0330	0.0251	0.0201	0.0120
PcSOPiur	0.0753	0.0758	0.1415	0.0504	0.0803	0.0281	0.0758
PcSOViCh	0.0869	0.0425	0.0449	0.0157	0.0133	0.0020	0.0129
CsBSBoar	0.0408	0.0822	0.0230	0.0400	0.0691	0.0122	0.0181
CsLCCasa	0.1331	0.2225	0.1730	0.2130	0.0888	0.0794	0.0216
CsLCCran	0.0902	0.2004	0.1214	0.1898	0.0295	0.0000	0.0000
CsSOViCh	0.0219	0.1334	0.1415	0.0540	0.1070	0.0565	0.0292
OsLCPast	0.0461	0.1151	0.0216	0.0684	0.0648	0.0007	0.0061
OsBSMale	0.0395	0.0163	0.0646	0.0122	0.0979	0.0129	0.0329
FeBGOnet	0.0273	0.0495	0.0562	0.0454	0.0126	0.0000	0.0000
FeLCPast	0.0238	0.0506	0.0280	0.0047	0.0418	0.0083	0.0093
FeBSPres	0.0755	0.2287	0.1404	0.0335	0.0243	0.0151	0.0108
ApBGOnet	0.0634	0.0017	0.2036	0.0906	0.0662	0.0000	0.0184
ApBSPres	0.0418	0.0642	0.1051	0.0681	0.0000	0.0135	0.0000
LxBGMnPo	0.0162	0.0175	0.0454	0.0179	0.0071	0.0037	0.0058
LxCOAlGi	0.0115	0.0150	0.0106	0.0101	0.0187	0.0147	0.0000
FoBSMale	0.0416	0.1073	0.1198	0.0073	0.0053	0.0067	0.0032
AiBSCort	0.0256	0.0814	0.0207	0.0266	0.0115	0.0074	0.0059
RpBGPont	0.1151	0.0866	0.1716	0.1269	0.0923	0.0787	0.1344

Tabella 18. Valori di area radicata (%) tra 50 e 100 cm di profondità.

Analisi per specie

Per confrontare tra loro l'andamento dei profili di area radicata della stessa specie campionata in località differenti è stata applicata l'ANCOVA. È il caso di abete rosso, faggio, castagno, carpino nero, frassino maggiore, acero montano e larice. Anche in questo caso, le ipotesi di normalità e omoschedasticità sono verificate tramite i test di Kolmogorov Smirnov e Levene sulle trasformate logaritmiche dei valori di RAR. Sono stati presi in considerazione per il confronto anche il castagno della stazione di Crandola, il faggio di Alpe Gigiai e l'acero montano di Oneta, bisogna comunque tener presente che per questi casi la relazione esponenziale area radicata-profondità non è significativa.

Abete rosso

Per quanto riguarda l'abete rosso, confrontando contemporaneamente le serie delle cinque stazioni non sussistono le condizioni di parallelismo necessarie all'applicazione dell'ANCOVA ($F_{5,81} = 4,4$; $p = 0,001$), come evidente anche dalla Figura 35. Il grafico sembra suggerire un andamento simile delle rette di regressione di Piuro, Fino e Incudine da un lato e Alpe Gigiai, Monte Pora dall'altro. L'ANCOVA conferma l'analisi grafica, le serie Piuro, Fino e Incudine risultano parallele ($F_{2,50} = 0,14$; $p = 0,87$) e statisticamente non differenti tra loro ($F_{2,52} = 1,81$; $p = 0,17$); lo stesso vale per Alpe Gigiai e Monte Pora ($F_{1,19} = 1,49$; $p = 0,24$ e $F_{1,19} = 0,66$; $p = 0,43$). L'ANCOVA considera paralleli e statisticamente non differenti anche le serie Villa di Chiavenna - Monte Pora, anche se in modo meno significativo ($F_{1,24} = 2,7$; $p = 0,11$ e $F_{1,25} = 1,65$; $p = 0,21$).

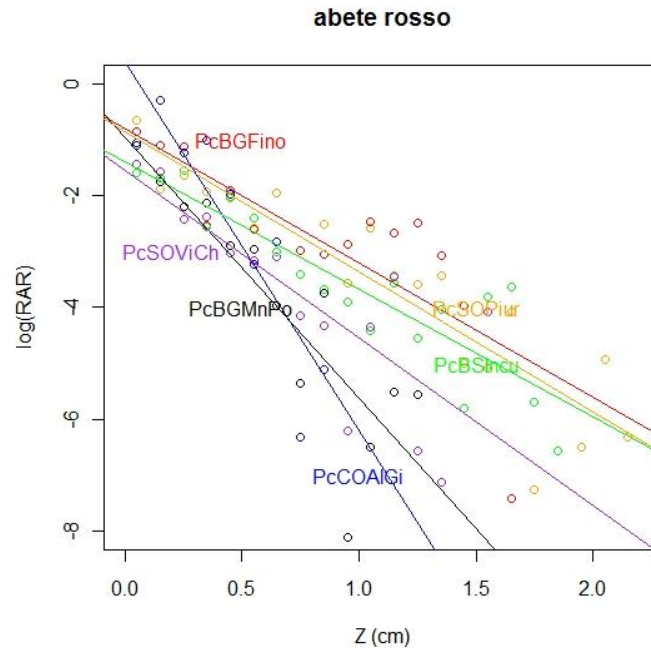


Figura 35. Confronto rette di regressione $\log RAR - Z$ delle stazioni di abete rosso (Pc).

Faggio

Prendendo in esame il faggio, le serie delle cinque stazioni non possono essere considerate parallele in quanto il valore di p è al limite del livello di significatività ($F_{4,57} = 2,32$; $p = 0,07$), come evidente anche dalla Figura 36. Dal grafico sembrerebbero avere un andamento simile le serie di Moggio, Artogne, Morterone e Alpe Gigiai, osservazione confermata dall'ANCOVA per la quale le serie sono parallele e statisticamente non differenti ($F_{3,43} = 0,23$; $p = 0,87$ e $F_{3,46} = 1,33$; $p = 0,27$). Sembra invece discostarsi l'andamento di Gianico, che in effetti nel confronto a coppie risulta statisticamente differente rispetto alle altre stazioni (Alpe Gigiai $F_{1,19} = 7,3$; $p = 0,01$) o non parallelo (Artogne $F_{1,29} = 14,5$; $p > 0,001$ e Morterone $F_{1,24} = 7,32$; $p = 0,01$) o con varianze non confrontabili (Moggio, test di Levene $F_{1,30} = 6,59$; $p = 0,01$).

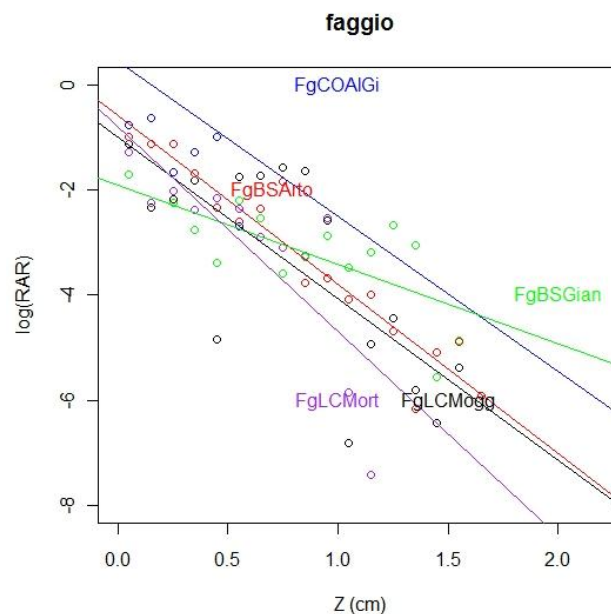


Figura 36. Confronto rette di regressione $\log RAR - Z$ delle stazioni di faggio.

Castagno

Nel caso del castagno confrontando contemporaneamente le serie delle quattro stazioni queste risultano parallele e statisticamente non differenti ($F_{3,47} = 1,94$; $p = 0,13$ e $F_{3,50} = 1,15$, $p = 0,34$), sebbene questo non sia evidente dal grafico di Figura 37. Dal grafico appaiono simili le serie di Villa di Chiavenna - Casargo, come confermato anche dall'ANCOVA per la quale sono parallele e non differenti ($F_{1,26} = 0,24$; $p = 0,63$ e $F_{1,27} = 1,4$; $p=0,25$). Anche Crandola e Casargo risultano assolutamente parallele e non differenti secondo l'ANCOVA ($F_{1,18} = 2,42$; $p = 0,13$ e $F_{1,19} = 0,048$; $p = 0,94$), sebbene non sia così evidente dal grafico, così come Villa di Chiavenna e Crandola ($F_{1,22} = 1,96$; $p = 0,18$ e $F_{1,23} = 1,55$; $p = 0,23$).

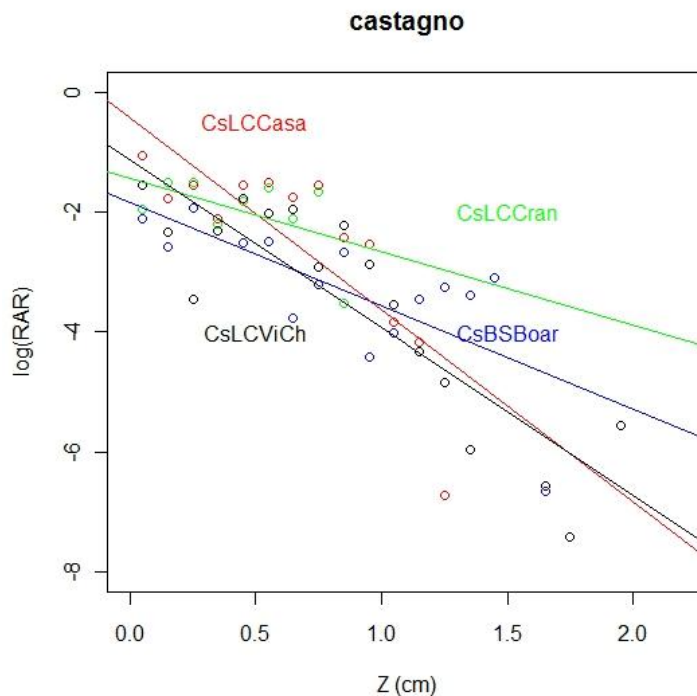


Figura 37. Confronto rette di regressione logRAR - Z delle stazioni di castagno.

Frassino maggiore

Confrontando le serie delle tre stazioni di frassino maggiore non viene soddisfatta l'ipotesi di parallelismo necessaria all'applicazione dell'ANCOVA ($F_{2,29} = 7,43$; $p = 0,002$). La medesima situazione come evidente dalla Figura 38 si ripropone per le serie Oneta - Prestine e Oneta - Pasturo; nel caso di Pasturo - Prestine invece l'ipotesi di parallelismo è verificata e le serie risultano statisticamente non differenti ($F_{1,19} = 2,47$; $p = 0,132$).

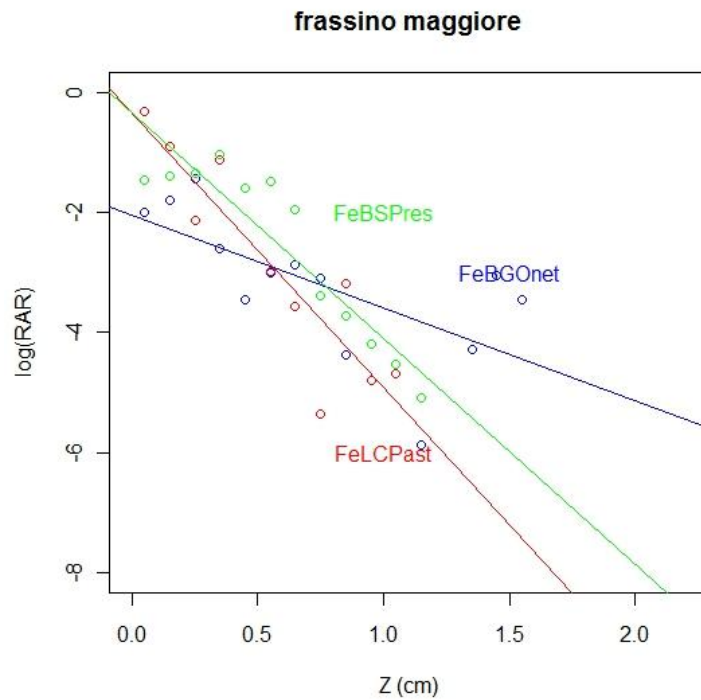


Figura 38. Confronto rette di regressione $\log RAR - Z$ delle stazioni di frassino maggiore.

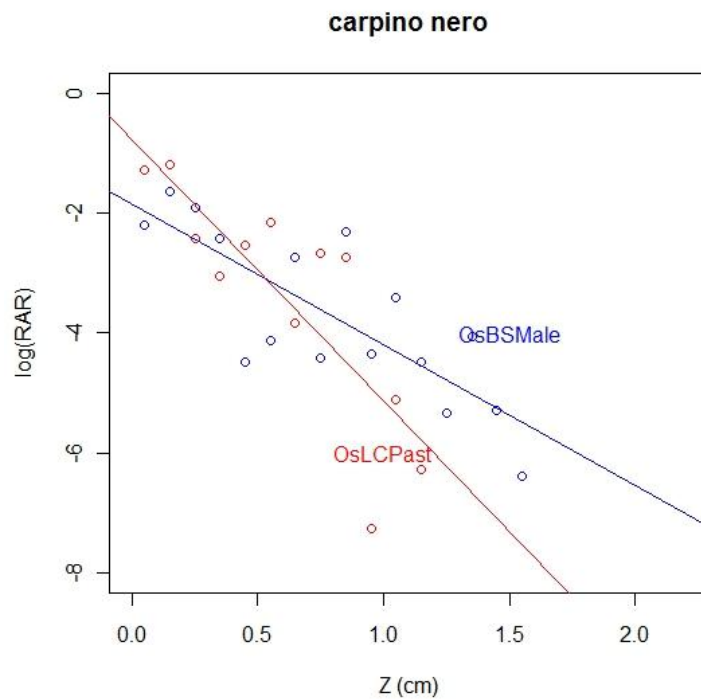


Figura 39. Confronto rette di regressione $\log RAR - Z$ delle stazioni di carpino nero.

Carpino nero

Le serie delle due stazioni di campionamento del carpino nero non possono essere considerate parallele in quanto il valore di p è al limite del livello di significatività ($F_{1,24} = 4,2$; $p = 0,051$), come si vede anche dal grafico di Figura 39. Nel caso si accetti l'ipotesi di parallelismo, le intercette risultano non differenti ($F_{1,25} = 0,35$; $p = 0,56$).

Acero montano

Nel caso dell'acero di monte (Figura 40) il parallelismo è verificato ($F_{1,14} = 0,04$; $p = 0,84$) e le serie risultano non differenti ($F_{1,15} = 1,96$; $p = 0,18$).

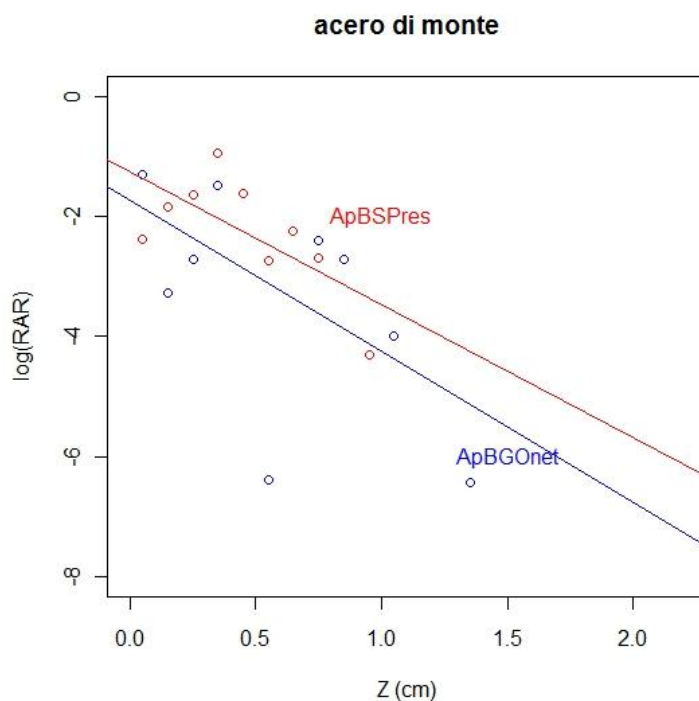


Figura 40. Confronto rette di regressione $\log RAR - Z$ delle stazioni di acero montano.

Larice

Nel caso del larice (Figura 41) il parallelismo è verificato ($F_{1,17} = 2,01$; $p = 0,17$) e le serie risultano non differenti ($F_{1,18} = 0,39$; $p = 0,54$).

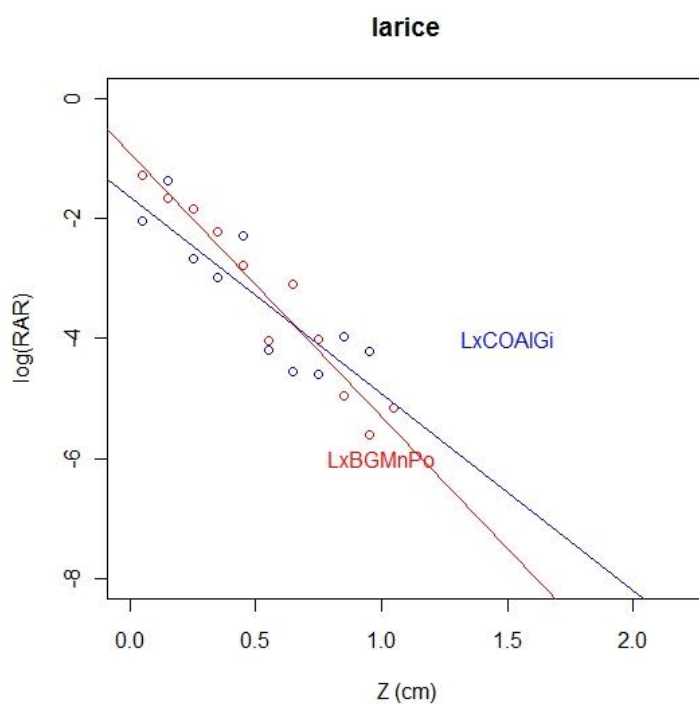


Figura 41. Confronto rette di regressione $\log RAR - Z$ delle stazioni di larice.

Analisi per stazione

Oltre alle serie della medesima specie campionate in stazioni differenti, vengono confrontate anche le serie di specie diverse appartenenti alla stessa stazione.

Per quanto riguarda la stazioni Alpe Gigiai, in cui sono state campionati i profili radicali di faggio, abete rosso e larice, le serie delle tre specie prese in considerazione non possono essere considerate parallele in quanto al limite del livello di significatività ($F_{2,19} = 3,47$, $p=0,051$), come è evidente anche dal grafico di Figura 42. Nel grafico è evidente il parallelismo delle serie di faggio e larice, confermato anche dall'ANCOVA ($F_{1,12} = 0,038$; $p = 0,85$); le intercette risultano statisticamente differenti tra loro ($F_{1,13} = 15,5$; $p = 0,001$). Anche le serie di faggio e abete rosso risultano parallele ma statisticamente non differenti tra loro ($F_{1,11} = 2,36$; $p = 0,15$ e $F_{1,12} = 0,51$; $p = 0,49$), sebbene questo non sia affatto evidente dal grafico. Le serie di abete rosso e larice risultano invece non parallele ($F_{1,15} = 5,54$; $p = 0,03$).

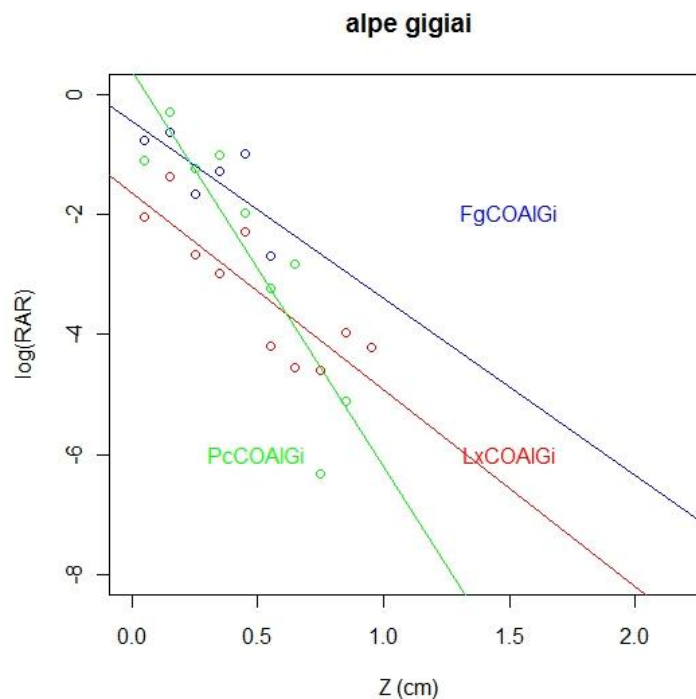


Figura 42. Confronto rette di regressione logRAR - Z delle specie (faggio, larice, abete rosso) campionate ad Alpe Gigiai.

In tutte le altre stazioni, le serie delle specie campionate risultano avere andamenti statisticamente non differenti: è il caso di carpino e orniello a Malegno ($F_{1,26} = 1,73$; $p = 0,2$); abete rosso e larice a Monte Pora ($F_{1,21} = 0,51$; $p = 0,48$); frassino maggiore e acero di monte a Oneta ($F_{1,19} = 0,31$; $p = 0,58$); carpino e frassino maggiore di Pasturo ($F_{1,19} = 0,5$, $p = 0,48$); frassino maggiore e acero di monte a Prestine ($F_{1,18} = 0,15$, $p = 0,69$); di castagno e abete a Villa di Chiavenna ($F_{1,29} = 2,79$; $p = 0,10$).

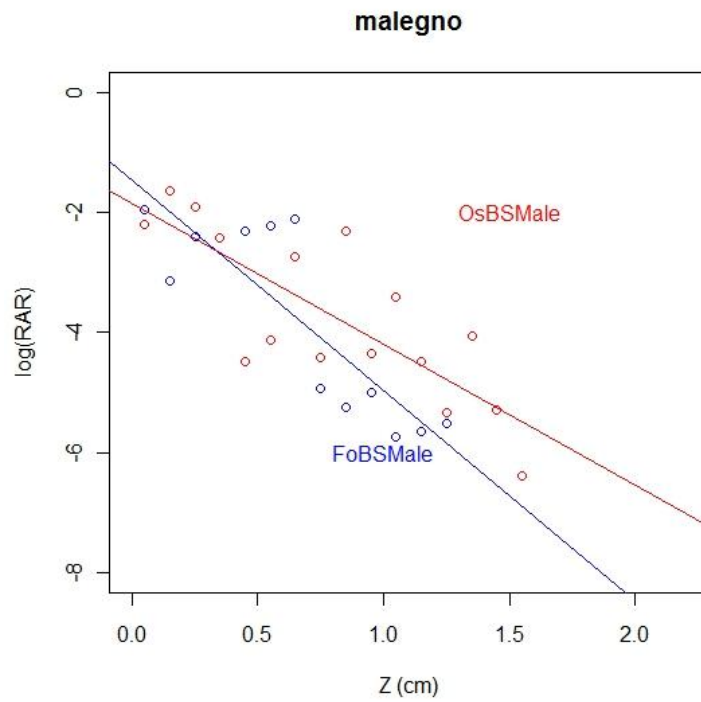


Figura 43. Confronto rette di regressione $\log\text{RAR} - Z$ delle specie (carpino e orniello) campionate a Malegno.

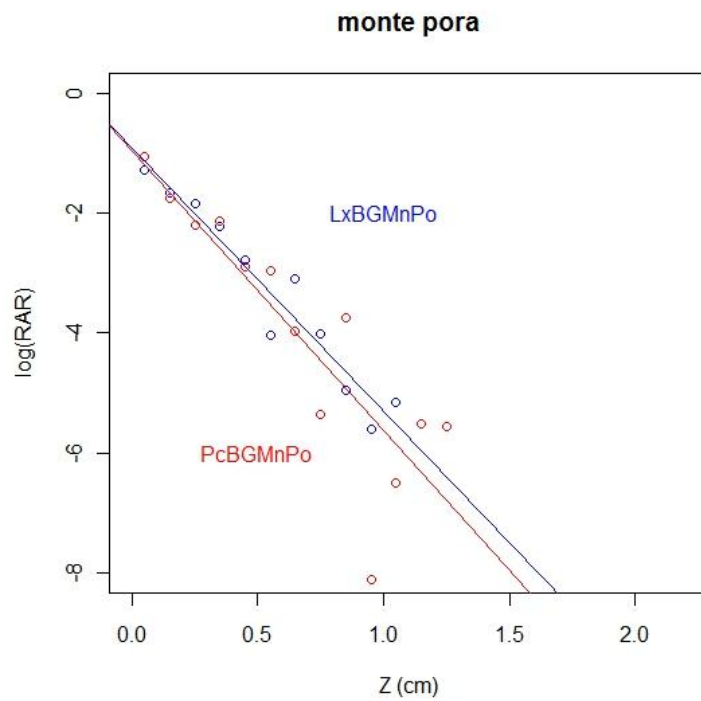


Figura 44. Confronto rette di regressione $\log\text{RAR} - Z$ delle specie (larice e abete rosso) campionate a Monte Pora.

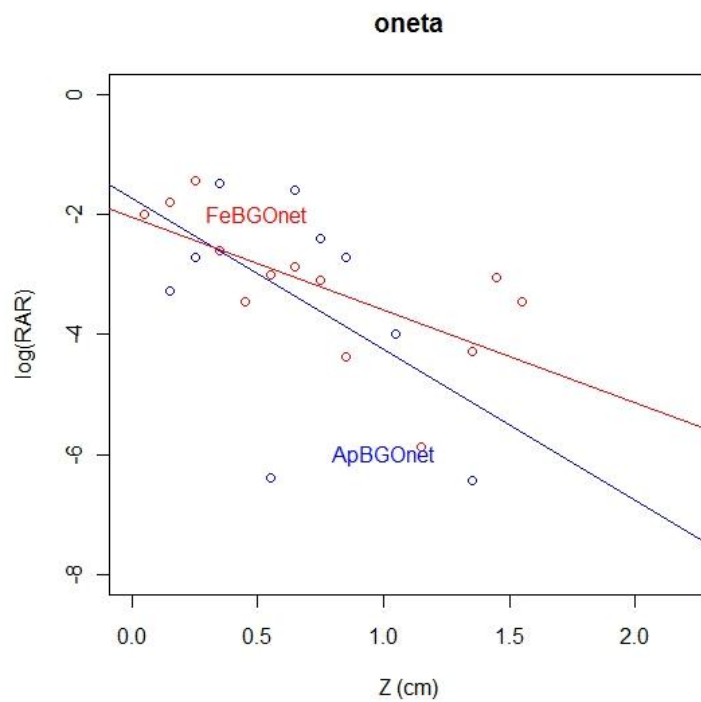


Figura 45. Confronto rette di regressione $\log RAR - Z$ delle specie (frassino maggiore e acero di monte) campionate a Oneta.

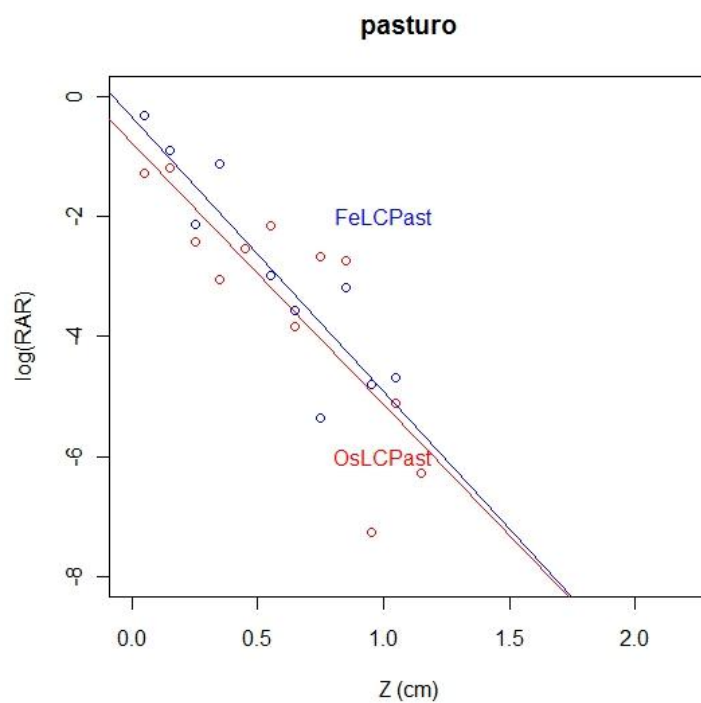


Figura 46. Confronto rette di regressione $\log RAR - Z$ delle specie (frassino maggiore e acero di monte) campionate a Pasturo.

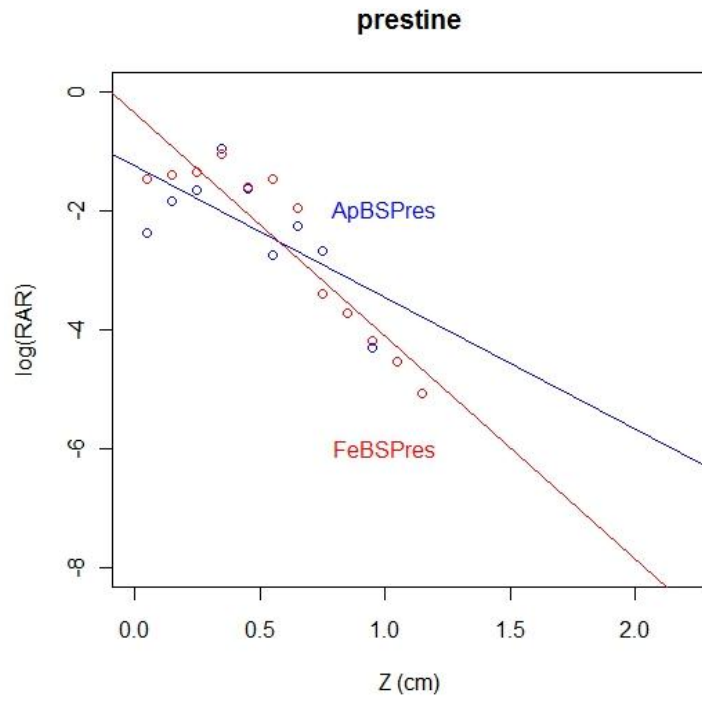


Figura 47. Confronto rette di regressione logRAR - Z delle specie (castano e abete rosso) campionate a Prestine.

Confronto valori di RAR in funzione della morfologia del versante

In accordo con le ricerche sviluppate da Hales et al. (2009) sono stati eseguiti dei confronti tra i valori appartenenti ad una medesima specie e provenienti da aree di displuvio o di compluvio. L'ipotesi di partenza per lo sviluppo di queste analisi risiede nella volontà di verificare l'esistenza di una maggiore o minore presenza di radici in relazione ai fattori microstazionali, in questo caso sintetizzati dai caratteri topografici e morfologici quali indicatori dei processi che influenzano lo sviluppo delle radici.

Con riferimento alle specie con un maggiore numero di campioni (abete rosso, faggio e castagno) i profili di area radicata, anche se provenienti da stazioni diverse, sono stati suddivisi in relazione alla loro posizione sul versante (aree di displuvio o di compluvio). Successivamente sono stati ottenuti i profili medi di RAR, per ciascuna specie e per le due diverse condizioni topografiche (displuvio e compluvio), calcolando, per ciascuno strato di profondità, la media aritmetica dei valori di RAR.

La suddivisione tra compluvio e displuvio è stata condotta con tre diversi metodi. Il primo, in modo analogo a quanto indicato da Hales et al. (2009), ha visto l'applicazione del metodo standard utilizzato dal software ARCGIS 9.2 per la determinazione della curvatura. A tale scopo è stato utilizzato il DTM 20x20 della Regione Lombardia. La mappa così ottenuta ha permesso di identificare le presumibili aree di displuvio (valori maggiori di zero) e di compluvio (valori minori di zero). Il secondo metodo è riconducibile all'applicazione, in ambiente ARCGIS 9.2, di un filtro (low-pass circular filter) di raggio tre pixel alla mappa precedentemente ottenuta, in accordo con lo studio di Hales et al. (2009). Anche in questo caso i valori ottenuti hanno consentito di suddividere le aree di displuvio (valori maggiori di zero) da quelle di compluvio (valori minori di zero). L'ultimo metodo ha permesso di assegnare i profili ad una delle due classi topografiche sulla base dell'interpretazione delle fotografie scattate nei siti di campionamento. In molti casi i tre metodi non concordano nell'attribuzione di un profilo ad una o all'altra categoria.

Di seguito vengono esposti i risultati per le tre specie considerate.

Abete rosso

Per l'abete rosso sono stati considerati i valori di RAR medi per le coppie compluvio/displuvio classificate secondo i metodi curvature, curvature+filter e foto.

Per ciascuna serie RAR-profondità sono stati applicati diversi metodi di regressione ed è stata infine scelta una relazione di tipo logaritmico (Tabella 19).

Abete rosso	R²	p
curvature displuvio	0.83	< 0,001
curvature compluvio	0.81	< 0,001
filter displuvio	0.83	< 0,001
filter compluvio	0.81	< 0,001
foto displuvio	0.80	< 0,001
foto compluvio	0.76	< 0,001

Tabella 19. Coefficienti di determinazione e significatività dei modelli logaritmici di RAR-Z per l'abete rosso.

Per ciascun metodo sono stati condotti dei confronti tra i valori medi di RAR-profondità di displuvio e compluvio, mediante il metodo statistico dell'ANCOVA. Prima dell'applicazione di questo metodo, con riferimento alla regressione logaritmica, sono stati linearizzati i dati di partenza (regressione lineare RAR-logz).

Per i tre metodi, è stata inoltre verificata la normalità dei residui con il test di Kolmogorov-Smirnov. L'omogeneità delle varianze, necessaria per l'applicazione dell'ANCOVA, è stata invece verificata con il test di Levene. Entrambe risultano sempre verificate.

ANCOVA – metodo “curvature”

Varianze omogenee (test di Levene $F_{1,36} = 0,1539$; $p = 0,697$).

Le serie risultano parallele ($F_{1,34} = 0,9909$; $p = 0,327$).

Le intercette sono differenti per un livello di significatività ($F_{1,35} = 5,243$; $p = 0,028$).

ANCOVA – metodo “curvature+filter”

Varianze omogenee (test di Levene $F_{1,36} = 0,1539$; $p = 0,697$).

Le serie risultano parallele ($F_{1,34} = 0,9909$; $p = 0,327$).

Le intercette sono differenti per un livello di significatività ($F_{1,35} = 5,243$; $p = 0,028$).

ANCOVA – metodo “foto”

Varianze omogenee (test di Levene $F_{1,36} = 0,0033$; $p = 0,955$).

Le serie risultano parallele ($F_{1,34} = 0,0133$; $p = 0,909$).

Le intercette non differenti ($F_{1,35} = 0,7476$; $p = 0,028$).

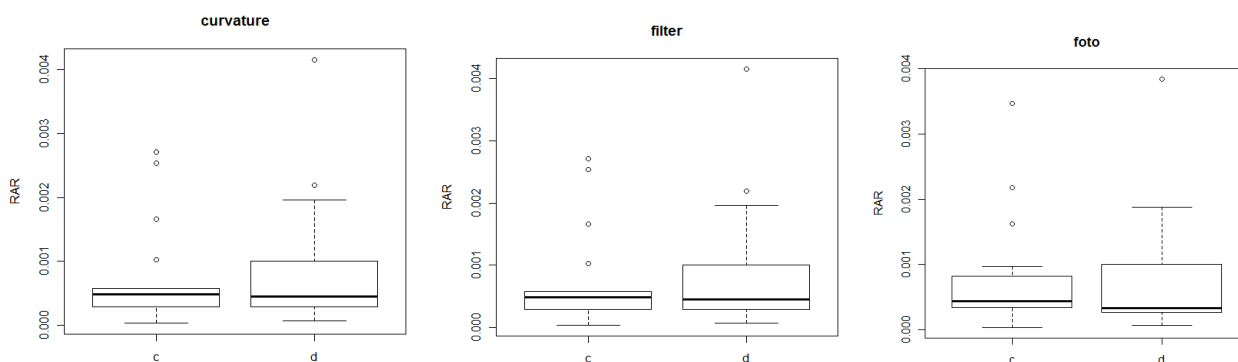


Figura 48. Box plot dei confronti dei valori medi di RAR dell’abete rosso provenienti da aree di compluvio (“c”) o displuvio (“d”), secondo i tre metodi utilizzati.

Per quanto riguarda l’abete rosso, i valori medi di RAR relativi ai profili posizionati sui displuvi sono maggiori rispetto a quelli presenti nei displuvi. Ciò è vero per i primi due metodi ma non trova riscontro statistico nei confronti del terzo metodo (metodo fotografico).

Faggio

Come per l’abete rosso anche per il faggio sono stati presi in considerazione i valori medi di RAR-profondità per le coppie compluvio/displuvio classificate secondo i metodi curvature, curvature+filter e foto. Per ciascuna serie RAR-profondità è stata adottata una relazione di tipo logaritmico (Tabella 20).

Faggio	R ²	p
curvature displuvio	0.89	< 0,001
curvature compluvio	0.93	< 0,001
filter displuvio	0.90	< 0,001
filter compluvio	0.91	< 0,001
foto displuvio	0.82	< 0,001
foto compluvio	0.88	< 0,001

Tabella 20. Coefficienti di determinazione e significatività dei modelli logaritmici di RAR-Z per il faggio.

La normalità dei dati e l'omogeneità delle varianze sono sempre verificate.

ANCOVA – metodo “curvature”

Varianze omogenee (test di Levene $F_{1,31} = 0,294$; $p = 0,592$).

Le serie risultano parallele solo per un livello di significatività ($F_{1,29} = 5,723$; $p = 0,023$).

Le intercette non sono differenti, anche se al limite del livello di significatività ($F_{1,30} = 3,83$; $p = 0,060$).

ANCOVA – metodo “curvature+filter”

Varianze omogenee (test di Levene $F_{1,31} = 1,073$; $p = 0,308$).

Le serie risultano parallele ($F_{1,29} = 1,982$; $p = 0,170$).

Le intercette sono differenti ($F_{1,30} = 9,167$; $p = 0,005$).

ANCOVA – metodo “foto”

Varianze omogenee (test di Levene $F_{1,28} = 0,032$; $p = 0,850$).

Le serie risultano parallele ($F_{1,26} = 0,228$; $p = 0,637$).

Le intercette sono differenti ($F_{1,27} = 7,013$; $p = 0,013$).

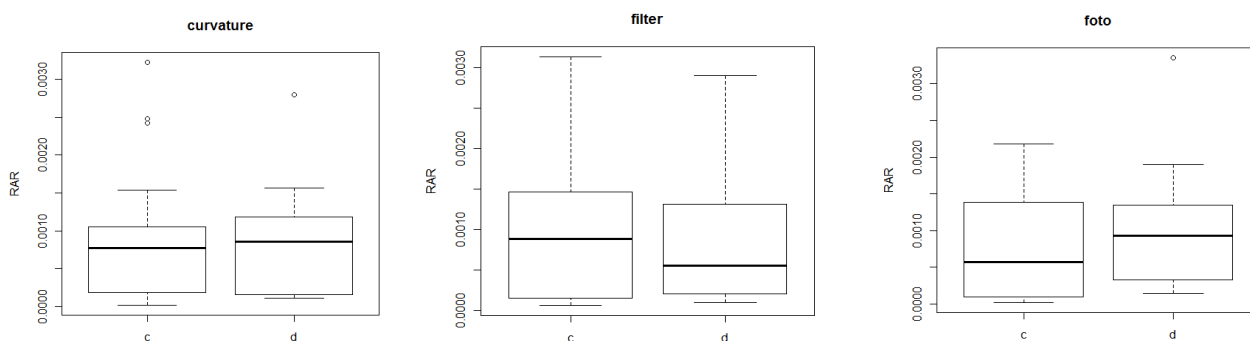


Figura 49. Box plot dei confronti dei valori medi di RAR del faggio provenienti da aree di compluvio ("c") o displuvio ("d"), secondo i tre metodi utilizzati.

Con riferimento al primo metodo, dal punto di vista statistico, pare non vi siano differenze sostanziali tra i valori di RAR dei displuvi rispetto ai compluvi. Il secondo e il terzo metodo mettono invece in evidenza l'esistenza di differenze significative tra le due classi. Tuttavia con il secondo metodo si hanno valori maggiori nei compluvi mentre con il terzo metodo si ottengono dei valori di RAR superiori per le aree di displuvio.

Castagno

Castagno	R ²	p
curvature displuvio	0.63	< 0,001
curvature compluvio	0.85	< 0,001
filter displuvio	0.61	< 0,001
filter compluvio	0.80	< 0,001
foto displuvio	0.65	< 0,001
foto compluvio	0.61	< 0,001

Tabella 21. Coefficienti di determinazione e significatività dei modelli logaritmici di RAR-Z per il castagno.

Per il castagno sono stati presi in considerazione i valori medi di RAR-profondità per le coppie compluvio/displuvio classificate secondo i metodi curvatura, curvatura+filter e foto. Per ciascuna serie RAR-profondità è stata adottata una relazione di tipo logaritmico (Tabella 20).

ANCOVA – metodo “curvatura”

Varianze omogenee (test di Levene $F_{1,30} = 2,1163$; $p = 0,156$).

Le serie sono parallele ($F_{1,28} = 0,0598$; $p = 0,809$).

Le intercette sono differenti ($F_{1,29} = 16,155$; $p < 0,001$).

ANCOVA – metodo “curvatura+filter”

Varianze omogenee (test di Levene $F_{1,32} = 0,0152$; $p = 0,907$).

Le serie risultano parallele ($F_{1,30} = 1,1224$; $p = 0,298$).

Le intercette non sono differenti ($F_{1,31} = 0,3866$; $p = 0,539$).

ANCOVA – metodo “foto”

Varianze omogenee (test di Levene $F_{1,30} = 0,8891$; $p = 0,020$).

Le serie sono parallele ($F_{1,31} = 1,3313$; $p = 0,257$).

Le intercette non sono differenti ($F_{1,32} = 0,1373$; $p = 0,713$).

Nelle posizioni di displuvio si hanno valori medi di RAR tendenzialmente superiori rispetto a alle aree di compluvio. Ciò è stato statisticamente verificato per il primo metodo. Con riferimento al secondo e al terzo metodo le differenze non sono invece statisticamente significative e non si identifica la prevalenza di una categoria rispetto all'altra.

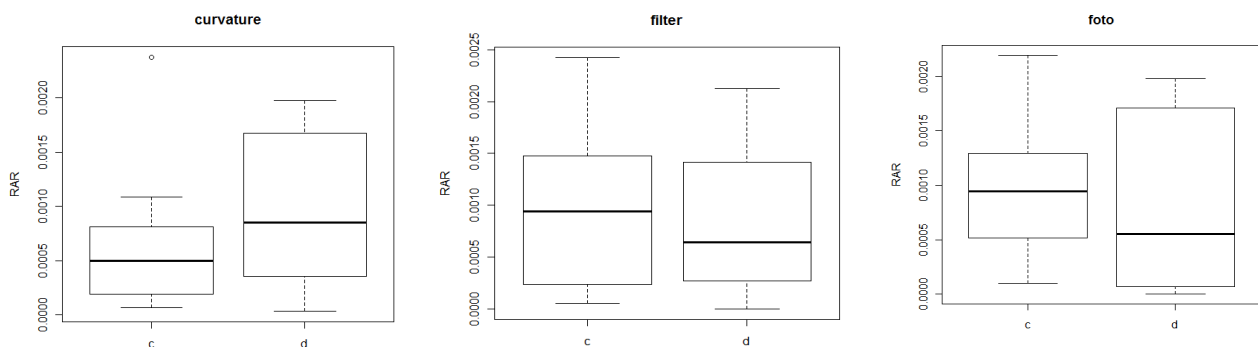


Figura 50. Box plot dei confronti dei valori medi di RAR del castagno provenienti da aree di compluvio ("c") o displuvio ("d"), secondo i tre metodi utilizzati.

3.8 Coesione radicale

Modello di W&W

Con riferimento al metodo di Wu (1976) e Waldron (1977), adottando dei valori di k' e k'' unitari, è stata calcolata la coesione radicale per ciascuna classe di profondità e per ciascun profilo. I valori di rinforzo radicale sono stati infine mediati per ciascuna specie in ciascuna stazione.

Abete Rosso Metodo W&W	PcFino	PcMoPo	PcIncu	PcPiur	PcViCh	PcAlGi
Numero profili	5	10	5	5	5	3
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	35.11	37.07	14.66	40.88	17.67	28.81
10-20	23.78	11.71	13.24	8.29	14.58	45.14
20-30	23.04	4.63	15.14	15.46	7.67	25.95
30-40	7.26	6.34	5.65	13.51	7.02	26.18
40-50	11.90	6.12	9.44	10.34	4.29	13.52
50-60	6.89	6.94	6.45	5.33	3.78	7.13
60-70	5.30	0.82	3.62	9.22	3.76	14.43
70-80	4.88	2.18	2.42	3.82	1.40	1.02
80-90	4.41	6.77	1.85	6.23	1.17	
90-100	4.71	0.51	1.48	2.37	0.22	
100-110	6.48	1.92	0.88	6.83	0.94	
110-120	5.98	5.17	2.00	5.60	1.79	
120-130	6.97	4.01	0.81	4.07	0.23	
130-140	6.33		1.63	8.54	0.23	
140-150	4.14		0.41	1.84	0.00	
150-160	0.00		3.92	2.54	2.18	
160-170	0.31		9.46	5.33		
170-180			1.28	0.35		
180-190				0.00		
190-200				0.61		
200-210				2.15		
210-220				0.80		

Tabella 22. Valori medi di coesione radicale per l'abete rosso (metodo W&W).

Castagno Metodo W&W	CsBoar	CsCran	CsCasa	CsViCh
Numero profili	5	5	5	5
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	7.76	16.65	22.84	17.74
10-20	5.02	21.78	10.62	8.89
20-30	7.24	22.28	14.49	2.95
30-40	6.94	11.72	9.59	8.32
40-50	4.88	15.95	14.82	11.60
50-60	4.77	18.71	14.73	8.62
60-70	1.86	20.73	13.09	9.79
70-80	2.43	27.12	16.14	4.80
80-90	4.39		7.78	7.68
90-100	1.07		5.55	4.52
100-110	1.34		10.83	2.56
110-120	1.85		6.04	1.38
120-130	2.14			2.28
130-140	2.46			0.79
140-150	4.88			0.00
150-160	0.00			0.00
160-170				1.04
170-180				0.48
180-190				0.00
190-200				1.78

Tabella 23. Valori medi di coesione radicale del castagno (metodo W&W).

Faggio Metodo W&W	FgArto	FgGian	FgMogg	FgMort	FgAlGi
Numero profili	5	5	5	5	3
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	43.45	27.73	43.28	47.34	39.45
10-20	38.82	14.14	14.41	20.72	16.42
20-30	38.77	15.44	14.07	24.40	17.97
30-40	23.02	9.66	18.80	17.94	15.47
40-50	12.53	5.23	1.45	19.96	8.88
50-60	8.90	15.83	20.80	16.45	17.69
60-70	12.59	11.71	23.22	9.90	
70-80	18.66	4.72	25.51	8.67	
80-90	3.33	6.37	24.53	7.00	
90-100	3.68	8.65	10.21	13.08	
100-110	2.41	4.91	0.22	0.50	
110-120	2.39	6.32	1.17	0.18	
120-130	1.36	11.61	4.75	0.00	
130-140	0.32	11.89	1.40	0.00	
140-150	1.23	1.71	1.50	0.00	
150-160	1.36	3.05	3.50	0.00	
160-170	1.65	0.00			
170-180		0.00			

Tabella 24. Valori medi di coesione radicale del faggio (metodo W&W).

Acero Montano Metodo W&W	ApOnet	ApPres
Numero profili	2	2
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	26.98	18.89
10-20	4.40	20.47
20-30	6.45	40.26
30-40	16.78	56.38
40-50	0.00	45.35
50-60	0.25	14.89
60-70	15.54	26.44
70-80	8.05	6.89
80-90	5.50	0.00
90-100	0.00	5.06
100-110	4.41	
110-120	0.00	
120-130	0.00	

Tabella 25. Valori medi di coesione radicale dell'acero montano (metodo W&W).

Frassino maggiore Metodo W&W	FeOnet	FePres	FePast
Numero profili	4	3	1
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	9.26	22.96	60.47
10-20	8.86	24.07	40.15
20-30	10.76	25.06	14.10
30-40	4.83	32.62	24.44
40-50	2.22	18.39	0.00
50-60	2.46	20.22	5.68
60-70	3.42	13.90	3.46
70-80	2.80	3.95	0.74
80-90	0.84	3.42	4.94
90-100	0.00	1.75	1.36
100-110	0.00	1.42	1.26
110-120	0.33	0.87	0.00
120-130	0.00	0.00	
130-140	2.25	0.00	
140-150	8.30	0.00	
150-160	5.18		
160-170	0.00		
170-180	0.00		

Tabella 26. Valori medi di coesione radicale del frassino maggiore (metodo W&W).

FBM

Con riferimento al formalismo dei FBM e alle assunzioni descritte nei paragrafi precedenti è stato determinato il rinforzo radicale. Per ciascuna classe di profondità, in ciascuna stazione e per ciascuna specie, è stato quindi calcolato il rinforzo medio specie e stazione specifico, come media della coesione per ciascuna classe di profondità. I dati sono riassunti nelle tabelle e nei grafici seguenti.

Abete Rosso Metodo FBM	PcFino	PcMoPo	PcIncu	PcPiur	PcViCh	PcAlGi
Numero profili	5	10	5	5	5	3
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	13.50	15.80	8.23	17.10	8.70	13.68
10-20	11.97	8.25	6.86	4.67	5.83	23.18
20-30	10.30	5.34	7.88	6.89	3.80	13.29
30-40	3.92	6.07	3.47	6.32	3.28	12.95
40-50	5.57	3.05	6.18	5.30	2.25	6.07
50-60	3.95	2.73	3.82	2.67	2.21	5.17
60-70	3.00	1.28	2.22	4.02	2.31	7.57
70-80	3.18	1.09	1.63	2.48	1.02	1.02
80-90	2.81	4.03	1.05	3.87	1.01	
90-100	2.91	0.25	1.03	1.33	0.15	
100-110	4.61	0.71	0.73	3.40	0.52	
110-120	3.19	3.42	1.96	3.31	1.02	
120-130	3.57	2.75	0.53	1.79	0.23	
130-140	3.30		0.96	3.60	0.23	
140-150	2.74		0.32	1.70	0.00	
150-160	0.00		3.31	1.76	2.18	
160-170	0.31		6.56	3.47		
170-180			0.90	0.35		
180-190				0.00		
190-200				0.61		
200-210				1.80		
210-220				0.72		

Tabella 27. Valori medi di coesione radicale per l'abete rosso (metodo FBM).

Castagno Metodo FBM	CsBoar	CsCran	CsCasa	CsViCh
Numero profili	5	5	5	5
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	4.19	7.42	9.62	9.32
10-20	3.28	10.69	6.21	5.33
20-30	4.40	9.69	7.17	1.80
30-40	4.26	6.38	5.63	5.44
40-50	2.95	7.71	7.38	6.85
50-60	3.28	8.72	8.04	3.96
60-70	1.45	10.88	6.23	4.69
70-80	1.91	14.41	7.30	3.01
80-90	2.68		4.60	4.05
90-100	0.89		3.22	2.50
100-110	0.90		5.28	1.81
110-120	1.34		3.59	1.00
120-130	1.95			2.10
130-140	1.54			0.79
140-150	2.94			0.00
150-160	0.00			0.00
160-170				1.01
170-180				0.48
180-190				0.00
190-200				1.78

Tabella 28. Valori medi di coesione radicale per il castagno (metodo FBM).

Faggio Metodo FBM	FgArto	FgGian	FgMogg	FgMort	FgAlGi
Numero profili	5	5	5	5	3
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	20.8	14.0	17.9	22.5	29.3
10-20	20.4	10.2	8.8	13.0	35.5
20-30	17.7	11.4	10.9	10.1	15.3
30-40	11.4	6.6	13.3	9.2	19.5
40-50	6.9	3.4	1.1	11.1	21.3
50-60	6.4	10.1	14.5	10.5	2.3
60-70	8.6	7.5	12.1	7.2	
70-80	9.0	3.2	14.5	5.7	
80-90	2.4	3.9	16.1	5.3	
90-100	2.6	5.6	5.3	9.9	
100-110	1.9	3.2	0.2	0.5	
110-120	2.0	5.4	1.0	0.2	
120-130	1.3	9.1	3.6	0.0	
130-140	0.3	8.2	1.0	0.0	
140-150	0.8	1.6	1.5	0.0	
150-160	0.8	2.2	3.5	0.0	
160-170	1.2	0.0			
170-180		0.0			

Tabella 29. Valori medi di coesione radicale per il faggio (metodo FBM).

Acerò montano Metodo FBM	ApOnet	ApPres
Numero profili	2	2
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	13.68	12.93
10-20	2.76	11.98
20-30	4.05	17.39
30-40	10.83	43.18
40-50	0.00	22.89
50-60	0.25	10.23
60-70	12.66	15.08
70-80	6.64	6.89
80-90	5.14	0.00
90-100	0.00	4.31
100-110	2.72	12.93
110-120	0.00	
120-130	0.00	

Tabella 30. Valori medi di coesione radicale per l'acero montano (metodo FBM).

Frassino maggiore Metodo FBM	FeOnet	FePres	FePast
Numero profili	4	3	1
Profondità (cm)	Cr (kPa)	Cr (kPa)	Cr (kPa)
0-10	5.79	5.79	26.49
10-20	5.39	5.39	13.35
20-30	7.20	7.20	6.06
30-40	3.30	3.30	16.10
40-50	1.71	1.71	0.00
50-60	2.02	2.02	3.51
60-70	2.35	2.35	3.20
70-80	1.90	1.90	0.75
80-90	0.63	0.63	2.97
90-100	0.00	0.00	1.19
100-110	0.00	0.00	1.26
110-120	0.33	0.33	0.00
120-130	0.00	0.00	
130-140	1.70	1.70	
140-150	6.02	6.02	
150-160	5.18		
160-170	0.00		
170-180	0.00		

Tabella 31. Valori medi di coesione radicale per il frassino maggiore (metodo FBM).

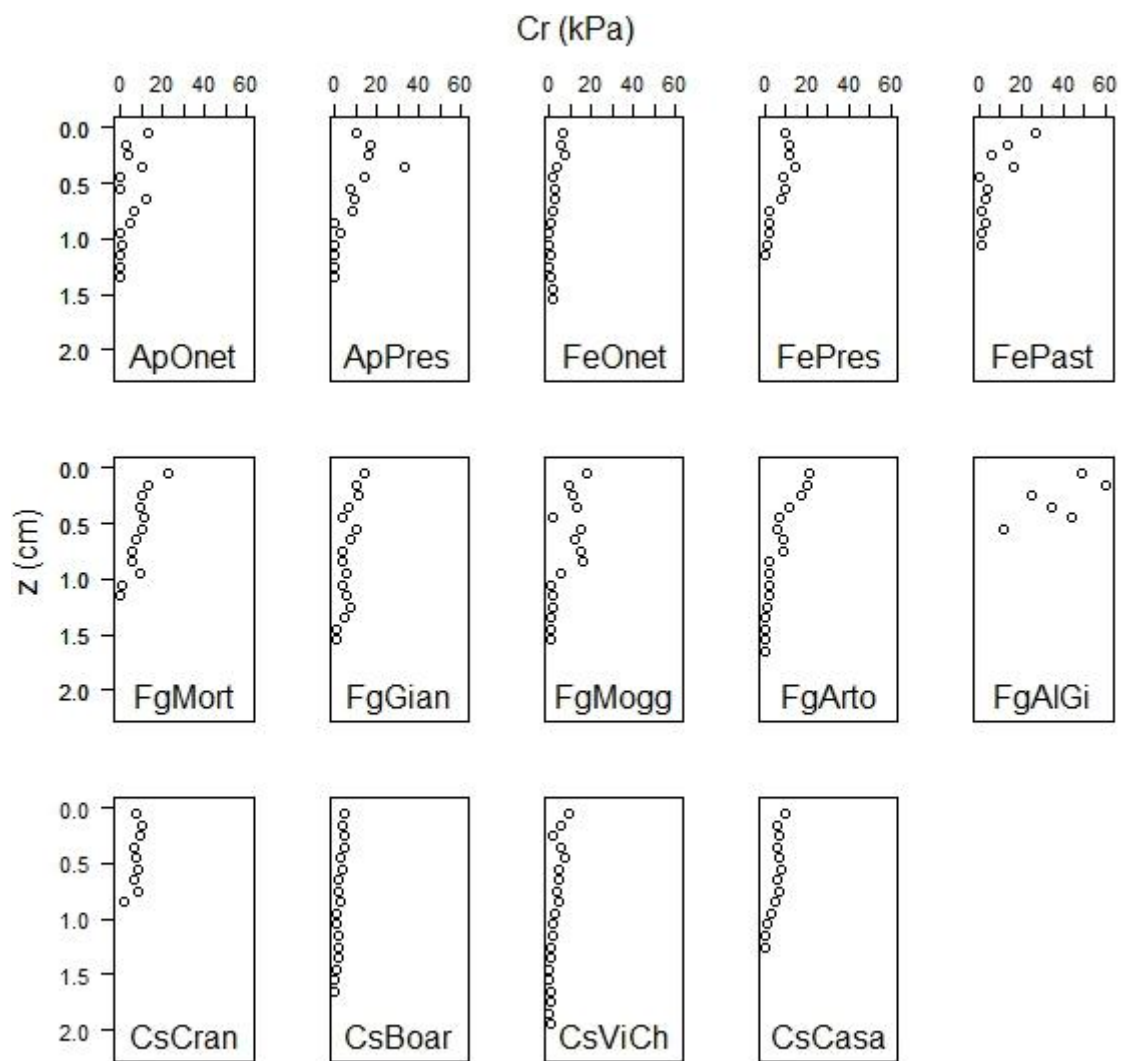


Figura 51. Profili medi di coesione radicale nelle diverse stazioni per le specie acero montano, castagno, frassino maggiore, faggio.

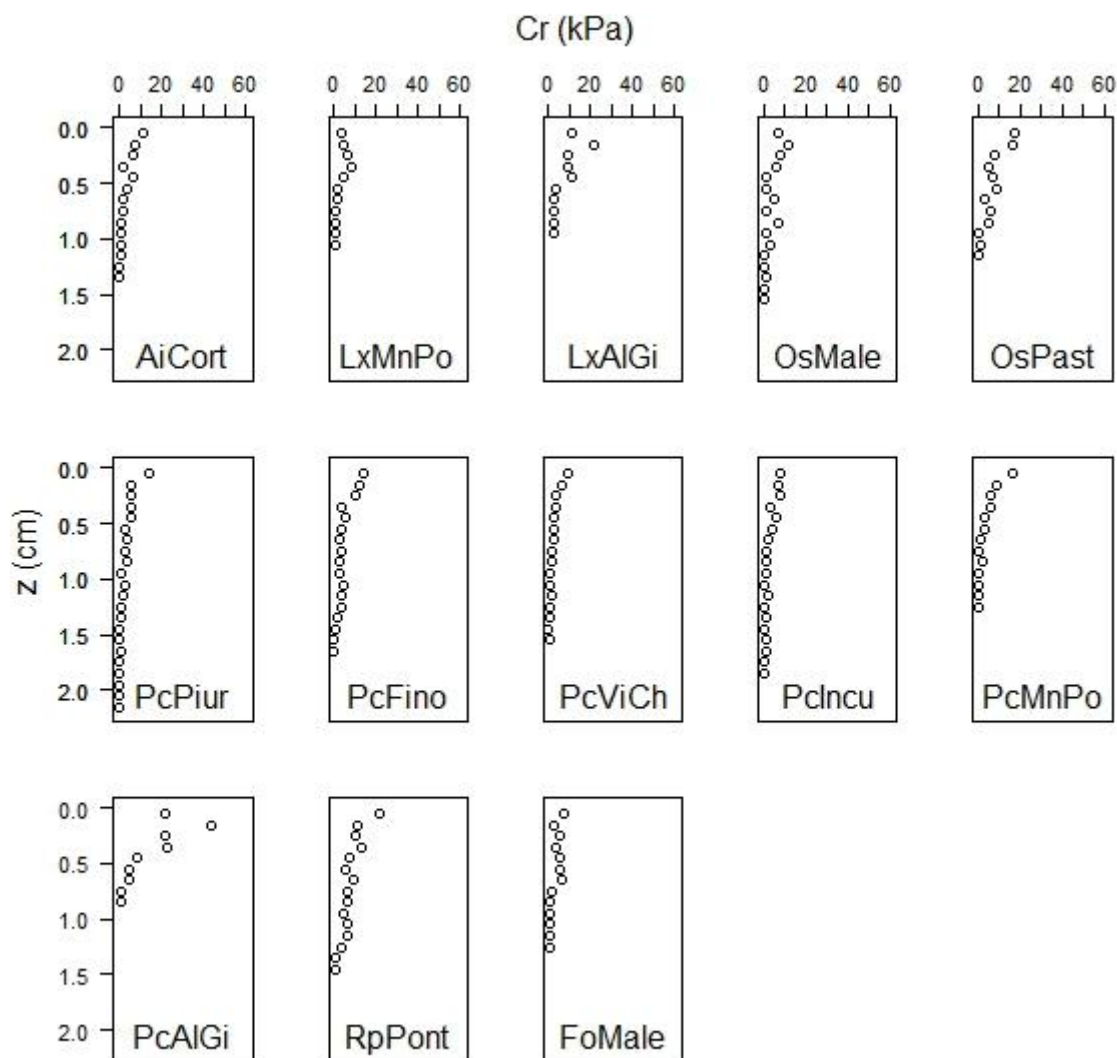


Figura 52. Profili medi di coesione radicale nelle diverse stazioni per le specie ontano bianco, orniello, larice, carpino nero, abete rosso, robinia.

Analogamente a quanto osservato per l'area radicata, i valori di C_r mostrano un'elevata variabilità anche tra profili di una stessa specie, eseguiti nella medesima stazione. Ciò a causa dell'elevata variabilità che caratterizza la resistenza a trazione delle radici e la loro distribuzione nel suolo.

Va precisato che i valori medi per le profondità maggiori sono calcolati in base ai soli profili che si spingono a tali profondità. Il dato medio è in questi casi espressione solo di alcuni profili e talora di un unico profilo.

Particolarmente interessanti sono i risultati relativi all'applicazione del FBM, che sono più realistici e ai quali si fa pertanto riferimento nel presente lavoro.

I valori massimi di coesione radicale si riscontrano generalmente nei primi 20 centimetri di profilo, spesso nei primi 5 centimetri, in sostanziale accordo con l'andamento dell'area radicata; fanno eccezione l'acero montano di Prestine, il frassino maggiore di Prestine e il larice di Monte Pora, per i quali i valori massimi di coesione si ritrovano a 35 centimetri di profondità.

Il valore più elevato di coesione riscontrato è dato dal faggio di Alpe Gigiai, con 60 kPa a una profondità di 15 centimetri; questo presenta anche i valori medi di coesione più elevati, ma il profilo radicato (e quindi anche la coesione) si spinge solo fino a 55 centimetri di profondità.

Ad una profondità compresa tra i 50 e i 100 centimetri, quella di riferimento per i fenomeni franosi superficiali, i valori medi di coesione sono compresi tra i 10 kPa garantiti dal faggio di Moggio e il valore inferiore a 1 del larice nella stazione di Monte Pora (Tabella 32). La media della coesione tra

50 e 100 centimetri è considerevole, di 4 - 6 kPa, nel caso dei due aceri, dei castagni di Crandola e Casargo, del frassino maggiore di Prestine, dei faggi di Morterone, Gianico e Artogne, della robinia. Gli abeti rossi si attestano su medie inferiori, a eccezione di Fino, così come i larici. Il castagno di Crandola, il frassino maggiore di Oneta e l'abete rosso di Alpe Gigiai garantiscono un rinforzo solo fino a 90 centimetri di profondità.

stazione	Cr m 50-100 cm	Cr 55 cm	Cr 65 cm	Cr 75 cm	Cr 85 cm	Cr 95 cm	Cr 105 cm
ApOnet	4.34	0.25	12.66	6.64	5.14	0.00	1.36
ApPres	4.39	7.00	9.06	8.15	0.00	2.16	0.00
CsCran	4.42	8.72	6.90	8.64	2.25	0.00	0.00
CsBoar	1.85	3.28	1.45	1.91	2.68	0.89	0.90
CsViCh	3.34	3.96	4.69	3.01	4.05	2.50	1.81
CsCasa	5.07	8.04	6.23	7.30	4.60	3.22	1.06
FeOnet	1.15	2.02	2.35	1.90	0.63	0.00	0.00
FePres	4.28	9.84	8.03	2.51	2.21	1.74	1.32
FePast	2.15	3.51	3.20	0.75	2.97	1.19	1.26
FgMort	6.54	10.47	7.19	5.68	5.35	9.87	0.67
FgGian	5.58	10.14	7.48	3.16	3.93	5.57	3.22
FgMogg	10.47	14.55	12.14	14.55	16.07	5.30	0.22
FgArto	5.16	6.39	8.61	9.03	2.44	2.58	1.90
FgAlGi	1.91	11.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AiCort	1.67	3.87	1.49	2.26	1.03	0.79	0.58
FoMale	2.49	5.62	6.47	1.00	0.67	0.81	0.40
LxMnPo	0.94	1.63	1.80	0.93	0.55	0.30	0.45
LxAlGi	2.05	3.08	2.37	2.41	2.42	2.03	0.00
OsMale	3.06	1.25	4.84	1.13	6.86	1.28	3.00
OsPast	3.85	8.65	3.40	5.41	4.63	0.17	0.84
PcPiur	2.70	2.80	3.81	2.47	3.39	1.20	2.52
PcFino	3.47	4.03	3.06	3.26	2.87	2.95	4.66
PcViCh	1.20	2.21	2.31	1.02	1.01	0.15	0.52
PcIncu	1.75	3.82	2.22	1.63	1.05	1.03	0.73
PcMnPo	1.04	2.73	1.28	0.44	1.61	0.05	0.14
PcAlGi	1.93	5.17	4.76	0.49	1.15	0.00	0.00
RpPont	6.49	5.25	9.46	6.61	6.02	4.93	6.64

Tabella 32. Valori di coesione radicale (kPa) tra 50 e 100 cm di profondità.

Visto che i valori di C_r lungo il profilo di suolo seguono sostanzialmente l'andamento dei valori di area radicata anche ad essi può essere applicato un modello di tipo esponenziale che ne approssimi il comportamento in funzione della profondità:

$$C_{rm} = e^{a-bZ} \quad \text{Equazione 26}$$

Il modello risulta significativo e con valori di R^2 superiori al 50% per tutte le specie e stazioni a eccezione del faggio di Alpe Gigiai, del castagno di Crandola e dell'acero di Oneta; nel caso dell'acero di Prestine il modello è valido solo per un livello di significatività (Tabella 33). Questi risultati ripropongono esattamente quanto rilevato per l'area radicata.

Stazione	a	b	R ²	p
FgLCMort	3.52	3.04	0.60	0.003
FgLCMogg	3.21	2.55	0.56	< 0,001
FgBSArto	3.43	2.65	0.93	< 0,001
FgBSGian	2.60	1.30	0.53	0.001
FgCOAlGi	4.17	2.23	0.48	0.120
PcCOAlGi	4.22	4.95	0.82	< 0,001
PcBGFino	2.77	2.00	0.62	< 0,001
PcBGMnPo	2.81	3.97	0.79	< 0,001
PcBSIncu	2.26	2.04	0.77	< 0,001
PcSOPiur	2.50	2.10	0.88	< 0,001
PcSOViCh	1.99	2.46	0.69	< 0,001
CsBSBoar	1.73	1.46	0.69	< 0,001
CsLCCasa	2.88	2.51	0.65	< 0,001
CsLCCran	2.39	0.96	0.33	0.100
CsSOViCh	2.40	2.11	0.80	< 0,001
OsLCPast	3.27	3.42	0.71	< 0,001
OsBSMale	2.21	1.93	0.61	< 0,001
FeBGOnet	1.62	1.37	0.53	0.005
FeLCPast	3.12	3.07	0.79	< 0,001
FeBSPres	3.13	2.64	0.84	< 0,001
ApBGOnet	2.27	1.96	0.29	0.106
ApBSPres	3.20	1.85	0.52	0.029
LxBGMnPo	2.37	3.16	0.81	< 0,001
LxCOAlGi	2.93	2.54	0.81	< 0,001
FoBSMale	2.32	2.62	0.75	< 0,001
AiBSCort	2.63	3.07	0.90	< 0,001
RpBGPont	3.09	1.87	0.65	< 0,001

Tabella 33. Parametri del modello di regressione lineare tra logaritmo di C_r e Z .

Sono stati inoltre messi a confronto i valori delle coesione radicale calcolati con i due metodi. Il rapporto tra il rinforzo determinato con il formalismo del FBM e la coesione calcolata con il modello di Wu (1976) e Waldron (1977) permette infatti di stimare il coefficiente correttivo k'' da utilizzare nel contesto del modello di W&W.

Di seguito si propongono le tabelle dei confronti eseguiti

Abete Rosso Rapporto CrFBM/CrW&W	PcFino	PcMoPo	PcIncu	PcPiur	PcViCh	PcAlGi	Media
Numero profili	5	10	5	5	5	3	
Profondità (cm)	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W
0-10	0.38	0.51	0.54	0.44	0.51	0.48	0.46
10-20	0.49	0.55	0.52	0.56	0.51	0.51	0.53
20-30	0.54	0.59	0.59	0.48	0.57	0.51	0.60
30-40	0.64	0.66	0.62	0.60	0.66	0.49	0.59
40-50	0.58	0.68	0.62	0.54	0.61	0.65	0.52
50-60	0.58	0.63	0.64	0.69	0.61	0.74	0.56
60-70	0.59	0.85	0.67	0.70	0.71	0.52	0.72
70-80	0.63	1.00	0.73	0.79	0.80	1.00	0.70
80-90	0.65	0.94	0.66	0.64	0.92		0.66
90-100	0.65	1.00	0.75	0.75	0.67		0.61
100-110	0.62	0.73	0.90	0.75	0.56		0.59

110-120	0.74	0.66	0.96	0.64	0.57	0.67
120-130	0.73	0.69	0.75	0.44	1.01	0.66
130-140	0.60		0.72	0.42	1.01	0.64
140-150	0.67		0.78	0.92	-	0.79
150-160	-		0.76	0.69	1.00	0.85
160-170	1.01		0.69	0.65		0.78
170-180	0.38		0.70	1.01		0.86
180-190	0.49			-		-
190-200	0.54			1.00		1.00
200-210	0.64			0.84		0.84
210-220	0.58			0.90		0.90
Media	0.58	0.69	0.67	0.63	0.67	0.59

Tabella 34. Valori medi stagionali del rapporto coesione radicale metodo FBM/W&W per l'abete rosso.

Castagno	CsBoar	CsCran	CsCasa	CsViCh	Media
Rapporto CrFBM/CrW&W					
Numero profili	5	5	5	5	
Profondità (cm)	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W
0-10	0.62	0.57	0.46	0.60	0.56
10-20	0.65	0.52	0.60	0.66	0.61
20-30	0.65	0.45	0.56	0.77	0.61
30-40	0.67	0.63	0.60	0.71	0.65
40-50	0.71	0.57	0.53	0.68	0.62
50-60	0.74	0.68	0.54	0.74	0.68
60-70	0.76	0.58	0.54	0.69	0.64
70-80	0.88	0.66	0.49	0.67	0.68
80-90	0.80		0.65	0.66	0.70
90-100	0.86		0.74	0.63	0.74
100-110	0.68		0.49	0.81	0.66
110-120	0.87		0.59	0.89	0.78
120-130	0.89			0.89	0.89
130-140	0.86			1.00	0.93
140-150	0.60			-	0.60
150-160	-			-	-
160-170				0.96	0.96
170-180				1.00	1.00
180-190				-	-
190-200				1.00	1.00
Media	0.75	0.58	0.57	0.74	

Tabella 35. Valori medi stagionali del rapporto coesione radicale metodo FBM/W&W per il castagno.

Faggio						
Rapporto CrFBM/CrW&W	FgArto	FgGian	FgMogg	FgMort	FgAlGi	Media
Numero profili	5	5	5	5	3	
Profondità (cm)	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W
0-10	0.50	0.55	0.47	0.54	0.45	0.50
10-20	0.56	0.68	0.63	0.62	0.57	0.61
20-30	0.50	0.80	0.86	0.60	0.56	0.66
30-40	0.53	0.70	0.81	0.62	0.58	0.65
40-50	0.64	0.75	0.92	0.61	0.68	0.72
50-60	0.82	0.81	0.70	0.75	0.94	0.80
60-70	0.76	0.77	0.55	0.68		0.69
70-80	0.62	0.76	0.71	0.84		0.73
80-90	0.78	0.74	0.72	0.85		0.77
90-100	0.84	0.77	0.52	0.84		0.74
100-110	0.85	0.80	1.00	1.00		0.91
110-120	0.82	0.87	0.93	1.00		0.91
120-130	0.98	0.69	0.82	-		0.83
130-140	1.00	0.71	0.70	-		0.80
140-150	0.67	0.96	1.00	-		0.88
150-160	0.59	0.73	1.00	-		0.77
160-170	0.71	-				0.71
170-180		-				-
Media	0.72	0.76	0.77	0.75	0.63	

Tabella 36. Valori medi stazionali del rapporto coesione radicale metodo FBM/W&W per il faggio.

Acero Montano Rapporto CrFBM/CrW&W	ApOnet	ApPres	Media
Numero profili	2	2	
Profondità (cm)	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W
0-10	0.51	0.68	0.60
10-20	0.63	0.59	0.61
20-30	0.63	0.43	0.53
30-40	0.65	0.77	0.71
40-50	-	0.50	0.50
50-60	1.00	0.69	0.84
60-70	0.81	0.57	0.69
70-80	0.83	1.00	0.91
80-90	0.93	-	0.93
90-100	-	0.85	0.85
100-110	0.62		0.62
110-120	-		-
120-130	-		-
Media	0.73	0.68	0.70

Tabella 37. Valori medi stazionali del rapporto coesione radicale metodo FBM/W&W per l'acero montano.

Frassino maggiore Rapporto CrFBM/CrW&W	FeOnet	FePres	FePast	Media
Numero profili	4	3	1	
Profondità (cm)	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W	FBM/W&W
0-10	5.79	5.79	26.49	0.44
10-20	5.39	5.39	13.35	0.39
20-30	7.20	7.20	6.06	0.46
30-40	3.30	3.30	16.10	0.48
40-50	1.71	1.71	0.00	0.43
50-60	2.02	2.02	3.51	0.51
60-70	2.35	2.35	3.20	0.59
70-80	1.90	1.90	0.75	0.72
80-90	0.63	0.63	2.97	0.51
90-100	0.00	0.00	1.19	0.44
100-110	0.00	0.00	1.26	0.50
110-120	0.33	0.33	0.00	0.69
120-130	0.00	0.00		-
130-140	1.70	1.70		0.75
140-150	6.02	6.02		0.73
150-160	5.18			1.00
160-170	0.00			-
170-180	0.00			-
Media	0.75	0.19	0.69	

Tabella 38. Valori medi stazionali del rapporto coesione radicale metodo FBM/W&W per il frassino maggiore..

4 Discussione e considerazioni conclusive

4.1 Resistenza a trazione

Le misure effettuate confermano l'andamento decrescente della resistenza alla trazione delle radici in funzione del diametro. La relazione, che segue un andamento di potenza, non risulta significativa solo in un caso (abete rosso–stazione Incudine), probabilmente a causa di problemi nella conservazione delle radici.

I valori di R^2 dei modelli adottati si attestano attorno al 50%, indicando una forte variabilità dei dati raccolti, difficilmente interpretabili da una relazione univoca.

Una diminuzione della resistenza al crescere del diametro trova spiegazione negli studi di Genet et al. (2005) e Hales et al. (2009). Tali Autori hanno riscontrato un legame tra resistenza e contenuto di cellulosa e hanno osservato che quest'ultima decresce all'aumentare del diametro. Più nel dettaglio, Hales et al. (2009) hanno osservato che, in corrispondenza dei displuvi, dove il contenuto idrico del suolo è presumibilmente inferiore, le radici hanno una maggiore quantità di cellulosa e una maggiore resistenza rispetto alle radici cresciute nelle aree di compluvio.

L'esistenza di una relazione tra T_r e diametri è un fatto certo e ineluttabile. Lo stesso non si può dire per gli altri fattori che influenzano la resistenza delle radici.

Incrociando i risultati ottenuti dai confronti con i caratteri ambientali delle stazioni (altitudine, esposizione, pendenza, area drenata specifica, tipologia di suolo, regione forestale, ecc.), non è infatti possibile individuare la presenza di fattori determinanti nell'espressione della resistenza a trazione. A sostegno di quanto indicato vi sono anche gli studi di Vergani et al. (com pers.) che, applicando delle tecniche di analisi statistica multivariata (regressione multipla, cluster analysis) ai dati qui presentati, non hanno trovato delle chiare chiavi di interpretazione del fenomeno.

Confronto tra T_r di una stessa specie in stazioni diverse

I confronti eseguiti tra i valori di T_r-d di una stessa specie in stazioni diverse mettono in evidenza come non vi sia un comportamento chiaro ed univoco, che possa in qualche modo condurre ad una esaustiva interpretazione del fenomeno. Si ritiene tuttavia che l'ambiente possa influenzare la resistenza a trazione delle radici di una stessa specie, in accordo con gli studi condotti da altri Autori (Hathaway e Penny, 1975; Genet et al., 2005 e 2006; De Baets et al., 2008; Abdi et al., 2009), che evidenziano appunto l'esistenza di differenze significative anche all'interno di una stessa specie. Ciò trova sostegno nella maggiore parte di confronti eseguiti. Delle differenze marcate si riscontrano per i valori di T_r , appartenenti a stazioni diverse, per le specie carpino nero (Figura 19) e acero montano (Figura 21). Anche per l'abete rosso, ad eccezione della coppia Piuro-Villa di Chiavenna, vi sono delle differenze significative tra i valori di T_r provenienti da ambienti differenti (Figura 16 e Tabella 11). Più confuso è il quadro per il faggio (Figura 17, Tabella 12), il castagno (Figura 18, Tabella 13) e il frassino maggiore (Figura 20, Tabella 14). Nel primo caso, con riferimento all'applicazione dell'ANCOVA, solo Morterone si distingue da Artogne e Gianico. Le altre coppie, Artogne-Moggio, Artogne-Gianico e Moggio-Morterone, sono statisticamente simili. Per il castagno la stazione di Boario si distingue in modo netto dalle altre mentre statisticamente simili sono le coppie Casargo-Crandola, Casargo-Villa di Chiavenna e Crandola-Villa di Chiavenna. Per il frassino maggiore la stazione di Oneta è statisticamente diversa da Prestine e Pasturo, che, al contrario, risultano simili.

Confronti tra T_r di specie diverse in una stessa stazione

Dal confronto tra le serie resistenza alla trazione – diametro delle diverse specie campionate nella medesima stazione non si possono trarre conclusioni univoche: nel caso di Malegno le due specie mostrano andamenti simili (Figura 24); lo stesso si può dire per Alpe Gigiai in cui le due conifere mostrano curve sostanzialmente identiche, ma differenti rispetto alla latifolia (faggio) della

medesima stazione (Figura 23, Tabella 15). Sembrerebbe quindi che in questi due casi le caratteristiche stazionali determinino un andamento simile della resistenza alla trazione in funzione del diametro tra specie diverse, sebbene appartenenti alla stessa tipologia di vegetazione, rispettivamente latifoglie nel caso di Malegno e conifere nel caso di Alpe Gigiai. Lo stesso vale anche per le stazioni di Monte Pora (Figura 25) e Oneta (Figura 26) dove, pur non essendo applicabile l'ANCOVA, l'ANOVA mette in evidenza come le specie, rispettivamente abete rosso e larice per Monte Pora e acero montano e frassino maggiore per Oneta, sono statisticamente simili. Va precisato come per il caso di Monte Pora l'osservazione del grafico di Figura 25 permetta di mettere in discussione i risultati derivanti dell'applicazione dell'ANOVA. Gli andamenti dei valori di T_r in funzione del diametro delle specie considerate sembrano essere infatti alquanto diversi.

Tuttavia, al contrario, nelle stazioni di Pasturo (Figura 27) e Prestine (Figura 28), i valori di T_r appartenenti a specie diverse risultano essere significativamente differenti, indicando un andamento della resistenza alla trazione in funzione del diametro sostanzialmente specie-specifico.

Anche con riferimento a queste tipologie di analisi si può comprendere come l'ambiente possa condizionare la resistenza a trazione delle radici, al punto da far convergere verso andamenti simili anche specie che dal punto di vista sistematico appartengono a classi diverse. Allo stesso tempo, tuttavia, si osserva come specie diverse in una stessa stazione possono presentare differenze significative in ragione probabilmente dei caratteri genetici tipici della specie e in virtù degli altri fattori che influenzano la resistenza.

Confronto T_r tra specie

Con riferimento alle radici di diametro maggiore di un millimetro e ai valori di T_r delle quattro principali specie indagate (abete rosso, castagno, faggio e frassino), si osserva una perdita di significatività dei modelli di tipo potenziale, e ciò lascia trasparire la possibilità di scegliere altre relazioni interpolanti oppure di trattare i valori di resistenza indipendentemente dai diametri.

Mettendo a confronto i valori di T_r specie specifici per le radici maggiori di 1 mm (Figura 29), sembra chiaro vi siano delle sostanziali differenze tra le specie; vi è infatti un'unica coppia (frassino-castagno) che non presenta delle differenze significative. Dai confronti e dalle statistiche dei dati presi in considerazione emerge una conclamata superiorità del faggio rispetto alle altre specie, in accordo con quanto trovato da Genet et al. (2005). Ciò è confermato anche dall'analisi per le diverse classi (Tabella 16), e in particolare per le classi 1-2 mm e 2-5 mm (Figura 30, Figura 31), per le quali le differenze sono comprovate anche dai test statistici.

Più in generale, passando dalla classe 1-2 mm a quelle di 2-5 mm e >5mm, gli andamenti tendono ad avvicinarsi come confermato dalle analisi statistiche, che evidenziano una sempre minor quantità di coppie differenti passando da una classe all'altra. Vi è quindi una tendenza verso una maggior uniformità nelle caratteristiche meccaniche delle specie per i diametri maggiori. La causa di questa tendenza può essere ricercata nei processi di lignificazione a carico delle radici più grosse (Hales et al., 2009), che inducono una riduzione della percentuale di cellulosa e un conseguente appiattimento delle differenze tra i valori di T_r appartenenti alle diverse specie. Bisogna tuttavia precisare come il numero di radici superiori ai 5 mm per le diverse specie sia modesto e per questo motivo è necessaria una certa cautela nell'interpretazione di questi risultati.

4.2 Area radicata

I valori di RAR sono caratterizzati da una grande variabilità che trova spiegazione nell'elevato numero di fattori coinvolti nella sua determinazione. Tale variabilità è elevata anche con riferimento ad una singola stazione. Ciononostante, per la quasi totalità delle stazioni indagate è possibile riscontrare una diminuzione della densità di radicazione con la profondità (Figura 33, Figura 34), tale andamento può essere opportunamente descritto con una relazione di tipo esponenziale, in accordo con Preti e Giadrossich (2009), Preti e Dani (2009), Mickovski e Van Beek (2009). La regressione lineare tra il logaritmo dell'area radicata media e la profondità risulta significativa per

tutte le stazioni ($p < 0,01$) (Tabella 17), ad eccezione del castagno, stazione Crandola, del faggio, stazione Alpe Gigiai, e dell'acero montano, stazione Oneta.

Confronto RAR di una stessa specie in stazioni diverse

Come per la resistenza a trazione anche per i valori di RAR di una stessa specie in stazioni diverse non è facile intravedere una chiara spiegazione del fenomeno. In termini generali si può ritenere che la densità di radicazione sia influenzata dalla genetica, intesa come appartenenza ad una specie, e dai fattori ambientali.

Si osserva come, per molte specie, gli andamenti RAR-profondità di stazioni differenti possono risultare statisticamente simili, oppure statisticamente differenti, per cause che al momento sono sconosciute. Infatti, stazioni vicine e nel complesso simili (coppie: abete rosso Piuro-Villa di Chiavenna, abete rosso Fino del Monte-Monte Pora; faggio Artogne-Gianico) risultano statisticamente differenti, mentre stazioni lontane e diverse, presentano un elevato grado di similitudine (i.e. coppie: abete rosso Piuro-Fino-Incudine, faggio: Moggio, Artogne, Morterone e Alpe Gigiai; castagno: Villa di Chiavenna – Casargo, Villa di Chiavenna e Crandola; frassino maggiore Pasturo-Prestine; acero di monte Pasturo-Prestine, larice Alpe Gigiai-Monte Pora).

Il tentativo di interpretare i risultati dei confronti alla luce delle caratteristiche stazionali non ha permesso di capire quali sono i fattori che guidano l'espressione della densità di radicazione.

A conferma di quanto indicato, sempre con riferimento ai dati presentati in questo lavoro, con tecniche di statistica multivariata, Vergani et al. (com pers.) hanno cercato di identificare i fattori ambientali più importanti per la definizione della densità di radicazione, senza purtroppo giungere ad una maggiore comprensione del fenomeno.

Confronto della RAR di specie diverse in una stessa stazione

Il confronto tra le serie RAR-profondità delle diverse specie in una stessa stazione conduce ad ipotizzare l'esistenza di un comportamento stazione specifico. Per la maggior parte delle stazioni (Monte Pora, Malegno, Oneta, Pasturo e Prestine) i test statistici mettono infatti in evidenza l'assenza differenze significative. Solo in Alpe Gigiai il faggio si dimostra differente dalle altre due specie (Figura 42). A tal proposito bisogna tenere presente che la stazione di Alpe Gigiai è caratterizzata da una grande variabilità e che i rilievi relativi al faggio sono fisicamente distanti da quelli dell'abete rosso e del larice.

Quanto emerso da questi confronti si presume non sia sufficiente per sostenere una generalizzazione dei risultati ai quali si è pervenuti. La verifica di una ipotesi così forte si ritiene richieda maggiori e più mirati studi.

Confronto RAR displuvio-compluvio

Con riferimento ai confronti dei valori di RAR displuvio-compluvio non è possibile comprendere se esiste una influenza della microstazione, intesa come posizione topografica (displuvio-compluvio), sulla densità di radicazione.

Se si prende in considerazione il primo metodo utilizzato per la discriminazione tra aree di displuvio e compluvio, si osservano valori di RAR maggiori nei displuvi rispetto ai compluvi. Dal punto di vista statistico ciò trova riscontro per l'abete rosso e il castagno mentre per il faggio le differenze non sono statisticamente significative, anche se al limite del livello di significatività.

Con riferimento al secondo metodo (applicazione del filtro 3x3), si osservano valori di RAR maggiori per i displuvi per l'abete rosso mentre per il faggio si ha un comportamento inverso. Il castagno invece non manifesta delle differenze significative tra i valori di RAR provenienti da una delle due categorie.

Con il terzo metodo si è mettono in luce una superiorità dei displuvi che è tuttavia confermata statisticamente solo per l'abete rosso.

I risultati ottenuti nel presente studio, per quanto controversi e opinabili, possono essere messi in relazione con quelli di Hales et al. (2009). Questi Autori hanno suddiviso i profili in campo e poi

hanno verificato la congruenza delle loro osservazioni con una mappa della curvatura, derivata da un LIDAR (7x7 m). Con riferimento al primo e al terzo metodo, i più simili a quelli utilizzati da Hales et al. (2009), i risultati presentati in questo studio contrastano con quelli da loro ottenuti. Essi sostengono che vi sia una più uniforme ed equa distribuzione delle radici nelle posizioni di compluvio rispetto a quelle di displuvio, in ragione di una migliore distribuzione lungo il profilo dell'acqua e dei nutrienti. Dai risultati qui presentati, in linea generale e forzando l'interpretazione dei confronti, si può ritenere che avvenga esattamente il contrario, e cioè che nei displuvi vi sia una maggiore densità di radicazione. A tal proposito, si può supporre che, in corrispondenza dei displuvi, dove maggiori sono le sollecitazioni meccaniche (ad es. vento) e dove minore è solitamente lo spessore dell'orizzonte A, i sistemi radicali, al fine di garantire la stabilità degli alberi e per far fronte alle necessità edafiche delle piante, tendono a raggiungere un livello maggiore di sviluppo. Nei compluvi si ha inoltre una maggiore probabilità di ristagno idrico, dal quale, in genere, le radici rifuggono.

4.3 Coesione radicale

La distribuzione dei valori di coesione radicale ricalca di fatto quella dell'area radicata e pertanto si possono riproporre le medesime considerazioni fatte per la RAR, sia con riferimento all'effetto delle diverse stazioni sia in relazione delle diverse specie. Si osserva anche in questo caso l'assenza di un comportamento specie-specifico o stazione-specifico.

In analogia con i valori di RAR anche per i valori di C_r si ottengono dei buoni risultati se si cerca di descrivere l'andamento coesione – profondità con un modello di tipo esponenziale. Esso risulta significativo e con valori di R^2 superiori al 50% per tutte le specie e stazioni a eccezione del faggio di Alpe Gigiai, del castagno di Crandola e dell'acero di Oneta.

I valori di C_r sono contraddistinti da una grande variabilità che è giustificata dalla quantità e diversità dei fattori che influenzano la resistenza a trazione delle radici e la loro distribuzione nel suolo. A questi fattori si aggiungono le semplificazioni, le assunzioni e le elaborazioni necessarie per il calcolo della coesione radicale. Per avere un'idea del peso di tali assunzioni basta mettere a confronto i risultati ottenuti con il metodo di Wu (1976) e Waldron (1977) con quelli determinati con il metodo FBM. Un confronto di questo tipo, oltre a sottolineare l'importanza della scelta di un metodo rispetto ad un altro, permette di ottenere dei fattori correttivi (k'') da utilizzare nell'applicazione del metodo di Wu (1976) e Waldron (1977). I valori di k'' così calcolati variano da 0.38 ad 1. I valori di k'' , ottenuti come media dei valori lungo un intero profilo, ricadono nell'intervallo 0,6-0,8. Se si prende in considerazione l'andamento dei valori di k'' con la profondità si assiste ad un aumento del valore del fattore correttivo passando dagli strati più superficiali a quelli più profondi. Nei primi strati di suolo k'' è prossimo a 0,5 mentre in profondità (>1 metro) esso si attesta tra 0,8 ed 1. Ciò trova spiegazione nell'esiguo numero di radici presenti ad elevate profondità, e nella maggiore uniformità diametrica degli elementi radicali che si trovano negli strati di suolo più profondi (Epis, 2007). L'applicazione del metodo iterativo FBM, se applicato a poche radici che hanno diametri simili e di conseguenza resistenze simili, porta ad ottenere dei valori di rinforzo che sono molto vicini a quelli che si possono ottenere con il metodo di Wu (1976) e Waldron (1977). Nel caso estremo nel quale sia presente un'unica radice i risultati dei due metodi coincidono, e k'' è pertanto pari ad 1.

4.4 Conclusioni

Il lavoro svolto ha permesso di ampliare e approfondire le conoscenze relative al rinforzo radicale del suolo operato dalle radici delle principali specie forestali della Lombardia. Per ciascuna specie indagata (*Acer pseudoplatanus*, *Alnus incana*, *Castanea sativa*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Fraxinus ornus*, *Larix decidua*, *Ostrya carpinifolia*, *Picea abies* e *Robinia pseudoacacia*) sono stati ottenuti dei valori caratteristici della resistenza a trazione, dell'area radicata e della coesione radicale.

Per quanto riguarda la resistenza a trazione delle radici, se si prendono in considerazione anche gli elementi radicali al di sotto del millimetro, le analisi condotte permettono di escludere l'esistenza di comportamenti specie o stazione specifici. Tali analisi portano inoltre all'adozione di modelli di tipo potenziale per descrivere il legame T_r-d . Se invece si escludono le radici più sottili ($d < 1\text{mm}$) allora i modelli di tipo potenziale perdono di significatività e si apre la possibilità di utilizzare altre relazioni oppure di considerare la resistenza delle radici indipendentemente dal diametro. Dai confronti tra specie, per diametri $> 1\text{mm}$ e con riferimento alle classi 1-2 mm, 2-5mm, $> 5\text{mm}$, emerge una maggiore resistenza del faggio rispetto all'abete rosso, al castagno e al frassino maggiore. Con riferimento alle classi indicate si osserva inoltre una diminuzione delle differenze tra specie al crescere dei diametri. Ulteriori ricerche devono essere eseguite al fine di comprendere se, per i diametri maggiori, esistono realmente delle differenze tra specie. Un altro filone che andrebbe sviluppato riguarda la relazione tra resistenza a trazione e umidità e nutrienti presenti nel suolo. A tal fine, nuovi studi di questo tipo possono essere condotti misurando la resistenza di radici provenienti da posizioni topografiche di displuvio, di versante o di compluvio, in analogia con quanto proposto da Hales et al. (2009), oppure, considerato che nel suolo vi sono dei gradienti di umidità, mettendo a confronto i valori di T_r di radici prelevate a diverse profondità.

Con riferimento ai valori di RAR, sulla base dei confronti eseguiti, si ritiene che la densità di radicazione sia influenzata sia dalle specie che dall'ambiente, anche se ulteriori ricerche vanno compiute al fine di isolare i fattori che più contribuiscono al fenomeno.

La ricerca di differenze tra valori di RAR provenienti da aree di displuvio o di compluvio non ha purtroppo portato a dei risultati univoci ed esaustivi. Con riferimento al terzo metodo, quello ritenuto più attendibile, ci si accorge che vi è una debole tendenza verso valori di RAR superiori nei displuvi rispetto ai compluvi, in contrasto con quanto suggerito da Hales et al. (2009).

Una conclusione indiscutibile è invece rappresentata dalla diminuzione della densità di radicazione con la profondità, che, come indicato nei paragrafi precedenti, si presta ad essere descritta con una relazione di tipo esponenziale. Questo è un primo passo per poter giungere ad una quantificazione della RAR e di conseguenza della coesione radicale nello spazio. In quest'ottica è auspicabile che gli sviluppi delle ricerche che vedono per oggetto la RAR portino ad una maggiore comprensione dei legami tra dimensione e distanza dagli alberi e densità di radicazione. Questa è infatti la vera chiave per poter ottenere una corretta spazializzazione del rinforzo radicale.

In ultimo, con riferimento alla coesione radicale, si può ritenere che essa sia espressione delle dimensioni, della distribuzione e della resistenza a trazione delle radici. Come tale risente della variabilità delle grandezze di base, alle quali si aggiungono le assunzioni e le elaborazioni necessarie per l'utilizzo dei modelli (in questo caso W&W e FBM) che consentono il calcolo della coesione radicale. L'influenza della tipologia di modello si fa tuttavia sentire soprattutto negli strati superficiali mentre, per quelli più profondi, che sono i più interessanti per la stabilità dei versanti, le differenze tra i risultati ottenuti con i due metodi sono poco rilevanti.

Alla luce delle analisi condotte si può ritenere di aver fornito un valido contributo alle ricerche che si propongono di quantificare il rinforzo del terreno operato dalle radici. Ciononostante, quanto qui presentato è un piccolo tassello che deve essere di supporto e di stimolo per ulteriori studi. Si è ancora infatti lontani dagli obiettivi indicati nell'introduzione. Molto lavoro deve essere ancora compiuto per consentire un utilizzo più corretto e consapevole della vegetazione negli interventi sistemazione idraulico-forestale del territorio con tecniche di ingegneria naturalistica. Gli studi per

la quantificazione del rinforzo biomeccanico del suolo operato dalle radici e più in generale dalla vegetazione sono ancora ad uno stadio embrionale, soprattutto se messi in relazione con l'esigenza di inserire le azioni stabilizzanti della vegetazione negli schemi di calcolo per la progettazione degli interventi di sistemazione montana.

Allo stesso tempo una lunga strada deve ancora essere percorsa per giungere ad avere maggiori elementi per la tutela e la gestione dei boschi che esercitano azioni protettive, siano esse di tipo diretto o indiretto. Nel primo caso, lo sviluppo di indicazioni tecniche volte a perseguire una gestione in grado di salvaguardare e valorizzare l'efficacia protettiva dei popolamenti è una sfida tuttora aperta. Sebbene molto sia stato fatto sul fronte selvicolturale, attraverso anche l'individuazione delle cure minime per i boschi di protezione diretta, non è ancora possibile conoscere le ripercussioni che le pratiche selvicolturali hanno sull'azione protettiva delle foreste.

Si è invece prossimi ad avere maggiori strumenti per una razionale gestione delle aree sottoposte a vincolo idrogeologico e per un più accorto rilascio delle autorizzazioni alla trasformazioni di coltura. In quest'ottica, i risultati presentati in questo lavoro già si prestano ad essere utilizzati in modelli di tipo geomeccanico a parametri spazialmente distribuiti, che consentono di ottenere il fattore di sicurezza dei versanti sulla base anche del rinforzo radicale del suolo.

5 Bibliografia

- Abdi E., Majnounian B., Rahimi H., Zobeiri M., (2009). Distribution and tensile strength of Hornbeam (*Carpinus betulus*) roots growing on slopes of Caspian Forests, Iran. *Journal of Forestry Research* (2009) 20(2): 105–110.
- Abe, K., Ziemer, R.R., (1991). Effect of tree roots on shallow-seated landslides, USDA Forest Service *Gen. Tech. report PSW-GRT*.
- Abernethy B., (1999). *On the role of woody vegetation in riverbank stability*. Ph.D. Thesis, Monash University, Melbourne.
- Abernethy B., Rutherford I.D., (2001). The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrol. Processes* 15, 63–79.
- Achat D.L., Bakker M.R., Trichet P., (2008). Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods. *Journal of Forest Research* 13: 165–175.
- Babu J., Pandey H.N., Tripathi R.S., (2001). Vertical distribution and seasonal changes of fine and coarse root mass in *Pinus kesiya* Royle Ex. Gordon forest of three different ages. *Acta Oecologica* 22: 293–300.
- Bache D.H., Mac Askill I.A., (1984). *Vegetation in Civil and Landscape Engineering*. Granada Publishing, London.
- Bamber R. K., (2001). A general theory for the origin of growth stresses in reaction wood: How trees stay upright, *IAWA J.*, 22, 205–212.
- Beaudoin J. J., (1990). *Handbook of Fiber-Reinforced Concrete*, Noyes, Park Ridge, N. J.
- Bedeneau M., Auclair D., (1989). The study of tree fine root distribution and dynamics using a combined trench and observation window method. *Annals Science Forests* 46: 283–290
- Bernetti G., (1995). *Selvicoltura speciale*. UTET (TO), pp. 150-155
- Bepi P., Grêt-Regamey A., Rhyner J., Ammann W.J., (2005). Den Schutzwald nach Risikokriterien bewirtschaften. - *Wald Holz* 86, 4: 53-56.
- Bilan M.V., (1960). *Root development of loblolly pine seedlings in modified environments*, Dep. For. Stephen F Austin State Coll. Nacogdoches, Texas, USA, Bulletin n°4, 31p.
- Bischetti G.B., Greppi M., Apuani T., Cancelli A., (2000). Sperimentazioni sulla valutazione dell'incremento di resistenza al taglio indotta dalla presenza di apparati radicali, Atti del XXVII Conv. di Idraulica e Costr. Idrauliche, Genova, 12-15 settembre 2000, 313-320.
- Bischetti G.B., (2001). *Effetto stabilizzante della vegetazione sui versanti: caso di studio di due specie alpine ai versanti della Val Dorena (Valcamonica)*. AII 2001: Ingegneria Agraria per lo sviluppo dei paesi del Mediterraneo, Vieste (FG) (in Italian).

- Bischetti G.B., Speziali B., Zocco A., (2002). *Effetto di un bosco di faggio sulla stabilità dei versanti*. Convegno Nazionale La Difesa della Montagna, Assisi (PG) (in Italian).
- Bischetti G.B., Chiaradia E., Simonato T., (2002). *Il ruolo della vegetazione nell'analisi di stabilità dei fenomeni franosi superficiali: l'esempio di Varano (VA) del 3 maggio 2002*. Convegno Nazionale La Difesa della Montagna, Assisi, 11-12 dicembre 2002
- Bischetti G. B., Speziali B., Zocco A., (2002c) Effetto di un bosco di faggio sulla stabilità dei versanti. Convegno Nazionale La Difesa della Montagna, Assisi, 11 – 12 dicembre 2002.
- Bischetti G.B., (2003). *Il ruolo della vegetazione nella stabilità dei versanti*. Quaderni della scuola d'Ingegneria Naturalistica. Consorzio Parco Monte Barro. Lecco. (in Italian)
- Bischetti G.B., Bonfanti F., Greppi M., (2003b). *Misura della resistenza alla trazione delle radici: apparato sperimentale e metodologia d'analisi*. Quaderni Idronomia Montana 241(1)
- Bischetti, G., Chiaradia E.A., (2004). *Evaluation of the effect of root cohesion on slope failures in St. Giulio creek catchment*. International Conference on Eco-Engineering: the use of vegetation to improve slope stability, Thessaloniki, 13-17 Sep. 2004.
- Bischetti G.B., Chiaradia E.A., Simonato T., Speziali B., Vitali B., Vullo P, Zocco A., (2005) *Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy)*. Plant Soil 278:11–22 doi:10.1007/s11104-005-0605-4.
- Bischetti G.B., Chiaradia E., Epis T., Morlotti E., (2009). *Root Cohesion of forest species in the Italian Alps*. Plant and Soil. DOI 10.1007/s11104-009-9941-0
- Bischetti G.B., D'Agostino V., (2010). *Sistemazioni Idraulico Forestali: Indirizzi per gli interventi*. Regione Lombardia. Quaderni della Ricerca n. 116 – giugno 2010, 66 pp..
- Bischetti G.B., Chiaradia E.A., Morlotti E., Stropeni M., Spelta E., Vergani C., (2010). *Progetto SISIFO*. Rapporto finale, Università degli Studi di Milano
- Bishop D.M., Stevens M.E., (1964). *Landslides on logged areas in southeast Alaska*. Research Paper NOR-1, Northern Forest Experiment Station, U.S. Forest Service.
- Böhm W., (1979). *Methods of Studying Root systems*, Ecological Series No. 33. Springer-Verlag, Berlin
- Borja I., De Wit H.A., Steffenrem A., Majdi H., (2008). *Stand age and fine root biomass, distribution and morphology in a Norway spruce chronosequence in southeast Norway*. Tree Physiology 28: 773–784.
- Brang, P., Schönenberger W., Ott E., Gardner B., (2001). *Forests as Protection from Natural Hazards*. In: EVANS, J. (ed) *Applying Forest Science for Sustainable Management*. Osney Mead, Oxford, Blackwell Science. 53–81.
- Brinkgrieve R.B.J., Vermeer P.A., (1998). *Plaxis, Finite element code for soil and rock analysis*. Professional Version 7.2, Usage Manuel.
- Brisson J., Reynolds J.F., (1994). *The effect of neighbors on root distribution in a Creosotebush (Larrea tridentate) population*. Ecology 75: 1693–1702

Brun F., Giau B., Magnani C., Blanc S., a cura di, (2009). Guida alla stesura della stima del prezzo di macchiatico. Dipartimento di economia e ingegneria agraria-forestale e ambientale - Sezione di Economia Agraria. Appunti per la stima del prezzo di macchiatico – Maggio 2009. Disponibile su <http://www.personalweb.unito.it/filippo.brun/annex/macchia09.pdf> (Data di accesso: 23/10/2010).

Burroughs E.R., Thomas B.R., (1977). *Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability*. USDA Forest Service Research Paper INT-190, 27 p.

Calvo E., (1995). *Piano di assestamento delle proprietà dei consorzi ubicati sul versante sinistro del torrente Meda*. Periodo di validità 1995-2004. Non pubblicato.

Casper B.B., Schenk H.J., Jackson R.B., (2003). *Defining a plant's belowground zone of influence*. Ecology 84: 2313–2321.

Castelli S., (2008). *Progetto integrativo di taglio di utilizzazione di un bosco di proprietà comunale in loc. Dasa-Val Granda-Béss-Le Gronde*. Inedito.

Ceriani M., Carelli M., (2000). *Carte delle precipitazioni medie annue del territorio alpino lombardo (registrate nel periodo 1891-1990)*. Servizio Geologico – Ufficio Rischi Geologici Regione Lombardia.

Cheng J.D., Lin L.L., Lu H.S., (2002). *Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan*. For. Ecol. Manage. 165, 1/3: 11–28.

Chiaradia E.A., Bischetti G.B., (2004). *Estimation of the effect of forest on soil slip phenomena by means of a spatially distributed model*. Conference “The use of vegetation to improve slope stability, Thessaloniki, Greece, 13–17 September 2004.

Chiatante D., Scippa S. G., Di Iorio A., Sarnataro M., (2003a). *The influence of steep slopes on root system development*. J. Plant Growth Regul. 21, 247–260.

Chiatante D., Sarnataro M., Fusco S., Di Iorio A., Scippa G.S., (2003b). *Modification of root morphological parameters and root architecture in seedlings of Fraxinus ornus L. und Spartium junceum L. growing on slopes*. Plant Biosystems 137(1): 47–56.

Collet C., Löff M., Pages L., (2006). *Root system development of oak seedlings analysed using an architectural model: effects of competition with grass*. Plant and Soil 279: 367–383.

Comino E., Druetta A., (2009). *In situ Shear Tests of Soil Samples with Grass Roots in Alpine Environment*. American Journal of Environmental Sciences.

Comino E., Druetta A., (2010). *The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment*. Soil & Tillage Research.

Commandeur P.R., Pyles M.R., (1991). *Modulus of elasticity and tensile strength of Douglas-fir roots*. Canadian Journal of Forest Research 21: 48–52.

Coppin N.J., Richards I.G., (1990). *Use of vegetation in Civil Engineering*. Butterworths. London. 292 pp.

- Coutts M.P., (1989). Factors affecting the direction of growth of tree roots. *Annals Science Forests* 46: 277–287.
- Daniels H.E., (1945). The statistical theory of the strength of bundles of threads. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci* 183:405 doi:10.1098/rspa.1945.0011
- Danjon F., Bert D., Godin C., Trichet P., (1999). Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod. *Plant Soil* 217, 49–63.
- Danjon F., Fourcaud T., Bert D., (2005). Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist* (2005) 168: 387–400.
- Davidson D.W., Kapustka L.A., Koch R.G., (1991). The role of plant root distribution and strength in moderating erosion of red clay in the Lake Superior watershed. *Trans Wis Acad Sci Arts Lett* 77:51–63
- Davis J.P., Haines B., Coleman D., Hendrick R., (2004). Fine root dynamics along an elevational gradient in the southern Appalachian Mountains, USA, *For. Ecol. Manage.*, 187, 19 – 34, doi:10.1016/S0378-1127(03)00226-3.
- De Baets S., Poesen J., Knapen A., Barberá G.G., Navarro J.A., (2007). Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. *Plant Soil* 294:169–183
- De Baets S., Poesen J., Reubens B. et al, (2008). Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant Soil* 305:207–226
- Del Favero R., a cura di (2002). *I tipi forestali della Lombardia. Inquadramento ecologico per la gestione dei boschi lombardi*. CIERRE edizioni.
- Demontzey P., (1882). *Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes*, Paris, J. Rothschild, Editeur, 1882, Deuxième édition, revue et augmentée Rothschild, Parigi, 528 pp.
- De Ploely J., (1981). The ambivalent effects of some factors of erosion, *Mem. Inst. Geol. Univ. Louvain*, 31, 171-181.
- Di Fidio M., (2007). *I boschi protettivi in Austria – Relazione introduttiva*, Istituto di Idraulica Agraria – Università degli Studi di Milano. Inedito.
- Di Fidio M., (2008). *Considerazioni sullo sviluppo storico dell'ingegneria naturalistica in Germania e Austria*, Istituto di Idraulica Agraria – Università degli Studi di Milano. Inedito.
- Diggle A.J., (1988). ROOTMAP – a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems. *Plant and Soil* 105: 169–178.
- Docker B.B., (2003). *Biotechnical engineering on alluvial riverbanks of southeastern Australia: A quantified model of the earth-reinforcing properties of some native riparian trees*. A PhD thesis of the School of Geosciences of University of Sydney.

- Dotta A., Motta R., (2000). *Boschi di conifere montani. Indirizzi Selvicolturali*. Regione Piemonte. Blu Edizioni. San Mauro (TO).
- Douglas G. B., McIvor I.R., Potter F.J., Foote L.G., (2010). Root distribution of poplar at varying densities on pastoral hill country. *Plant Soil*.
- Duflot H., (1995). *Le frene in liberté*. I.D.F., Paris, 192 pp.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A., (2005). A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage, *Plant Soil*, 278, 119–134, doi:10.1007/s11104-005-7577-2.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A., Danjon F., (2005). A density-based approach for the modelling of root architecture: application to Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) root systems. *Journal of Theoretical Biology* 236 (2005) 323–334
- Ekanayake J.C., Phillips C.J., (1999). A method for stability analysis of vegetated hillslopes: an energy approach. *Can Geotech J* 36:1172–1184 doi:10.1139/cgj-36-6-1172
- Ennos A. R., (1990). The anchorage of leek seedlings: The effect of root length and soil strength, *Ann. Bot.*, 65, 409–416.
- Endo T., Tsuruta T., (1969). *Effect of tree's roots upon the shearing strength of soils*. Annual Report No. 18 of the Hokkaido Branch Government Forest Experiment Station, Tokyo, 1968. pp. 167-182.
- Epis T., (2007). *Valutazione del rinforzo esercitato dalle radici in ambito forestale e suo decadimento dopo un incendio. Il caso di Cerete (Val Seriana – BG)*. Tesi di laurea, facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Milano
- Eterovich A., Bernetti F., (2007). *Piano di Assestamento Forestale del Comune di Castione della Presolana*. Periodo di validità 2007-2011. Consorzio Forestale Presolana. Inedito.
- Fan C.C., Su C.F., (2008). Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content. *Ecological Engineering*.
- Faser E.C., Liefvers V.J., Landhäusser S.M., (2005). Age, stand density, and tree size as factor in root and basal grafting of lodgepole pine. *Canadian Journal of Botany* 83: 983–988.
- Fischer M., (2009). Bosco di protezione – parte importante del management integrale dei rischi. Bosco di protezione Svizzera. Newsletter 03 (2009). Disponibile su www.bosco-di-protezione.ch. (Data di accesso: 03/10/2010).
- Fordham R., (1972). Observation on the growth of roots and shoots of tea (*Camellia sinensis* L.) in southern Malawi, *J. Hortic. Sci.* 47, 221-229
- Frehner, M., Wasser, B., Schwitter R., (2005). *Continuità nel bosco di protezione e controllo dell'efficacia. Istruzioni per le cure nei boschi con funzione protettiva*. Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio (UFAFP), CH-3003 Berna.
- Frydman S., Operstein V., (2001). Numerical simulation of direct shear of root-reinforced soil. *Ground Improv* 5:41–48 doi:10.1680/grim.5.1.41.39437

- Ganatsas P., Spanos I., (2005). Root system asymmetry of Mediterranean pines. *Plant and Soil*.
- Gellini R., Grossoni P., (1996). *Botanica forestale, Volume I – Gimnosperme*. CEDAM. Padova 267 pp.
- Gellini R., Grossoni P., (1997). *Botanica forestale, Volume II - Angiosperme*. CEDAM. Padova 373 pp.
- Genet M., Stokes A., Salin F. et al, (2005). The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant Soil*. 278:1–9 doi:10.1007/s11104-005-8768-6.
- Genet M., Stokes A., Fourcaud T. et al, (2006). Effect of altitude on root mechanical and chemical properties of *Abies georgei* in Tibet, 5th Plant Biomech Conf—Stockholm, August 28–September 1 2006
- Genet M., Kokutse N., Stokes A., Fourcaud T., Cai X., Ji J., Mickovski S., (2008). Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. *Forest Ecology and Management*.
- Genet M., Stokes A., Fourcaud T., Norris J.E., (2010). The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest. *Ecological Engineering* 36 (2010) 265–275
- Giulietti V., (2009). L'acero montano. *Sherwood – Foreste ed alberi oggi* 150 (2009) pp 33-37.
- Glatzel, K., (1964). Boden und Wurzelfotografie, *Allg. Forstz.* 19, 437-439.
- Glinski J., Lipiec J., (1990). Soil Physical Conditions and Plant Roots. *CRC Press Inc.*, Boca Ranton 250 pp.
- Gravano E., (2003). Il frassino maggiore *Fraxinus excelsior* L. *Sherwood – Alberi e foreste oggi*. Anno 9 (10): 27-31.
- Gray D.H., (1977). *Creep movement and soil moisture stress in forested versus cut over slopes: results of field studies*, Final Report ENG 74-02427, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Gray, D.H., Megahan, W.F., (1981). *Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith*. Research Paper, INT-271, 23 pp. Forest Service. U.S. Dept. of Agriculture, Ogden, Utah.
- Gray D.H., Laiser A.J., (1982). *Biotechnical slope protection and erosion control*. Van Nostrand Reinhold, New York. USA
- Gray D.H., Ohashi, H., (1983). Mechanics of fiber reinforcement in sand. *J. Geotech. Eng., ASCE* 109 (3), 335–353.
- Gray D.H., Sotir R.B., (1996). *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilisation: A Practical Guide for Erosion Control*. John Wiley & Sons, New York, 378 pp.

Gray D.H., Barker D., (2004). Root-Soil Mechanics and Interactions, in Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology, *Water Science and Application* 8, American Geophysical Union, Washington, DC, 125÷139.

Greenway D.R., (1987). Vegetation and slope stability. In: *Slope Stability*. Eds: M.G. Anderson and K.S. Richards. John Wiley & Sons Ltd, Chichester. pp: 187-230.

Greenwood J.R., (2004), SLIP4EX - Analysing the effects of vegetation on slope stability, International Conference on Eco-Engineering: The use of vegetation to improve slope stability, Thessaloniki, 13-17 Sep. 2004 or Greenwood, JR, 2004 SLIP4EX - Analysing the effects of vegetation on slope stability, John Greenwood, Nottingham Trent University

Greenwood J.R., (2006). SLIP4EX - a program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes. *Geotech Geol Eng* 24:193–2

Guo D.L., Mitchell R. J., Hendricks J. J., (2004). Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a Loblolly Pine forest, *Oecologia*, 140, 450 – 457, doi:10.1007/s00442-004-1596-1.

Hacke U.G., Sperry J.S., Pockman W.T., Davis S.D., McCulloch K.A., (2001), Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure, *Oecologia*, 126, 457 – 461, doi:10.1007/s004420100628.

Hales T. C., Ford C. R., Hwang T., Vose J. M., Band L. E., (2009). Topographic and ecologic controls on root reinforcement. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 114, F03013, doi:10.1029/2008JF001168

Hammond C., Hall D., Miller S., Swetik P., (1992). Level I, stability analysis (LISA) documentation for version 2.0. *General Technical Report INT-285*. USDA For Serv Intermt Res Stn

Hanna T.H., (1982). *Foundations in Tension: Ground Anchors*. Trans Tech Publications. Clausthal. 573 pp.

Hathaway R.L., Penny D., (1975). Root strength in some Populus and Salix clones. *New Zealand Journal of Botany*, 13, 333-344.

Hausmann M.R., (1976). Strength of reinforced soil. *Proceedings of the 8th Australian Road Research Conference* Volume 8(13): 1-8.

Hecker U., (1992). *Latifoglie. Piante legnose spontanee dell'Europa continentale*. Zanichelli (BO), pp 212-213.

Hemmer P.C., Hansen A., Pradhan S., (2007). Rupture processes in Fiber Bundle Models. In: Bhattacharyya P, Chakrabarti BK (eds) *Modeling Critical and Catastrophic Phenomena in Geoscience, Lecture Notes in Physics No. 705*. Springer, Berlin, pp 27–55

Hidalgo R.C., Kun F., Herrmann H.J., (2001). Bursts in a fiber bundle model with continuous damage. *Phys. Rev. E* 64 (6), 066122, doi:10.1103/PhysRevE.64.066122.

- Hubble T.C.T., Docker B.B., Rutherford I.D., (2010). The role of riparian trees in maintaining riverbank stability: A review of Australian experience and practice. *Ecological Engineering*
- IPLA, a cura di, (2000a). *Cedui di castagno. Indirizzi per la gestione e la valorizzazione*. Regione Piemonte. Blu Edizioni, Peveragno. Cuneo.
- IPLA, a cura di, (2000b). *La robinia. Indirizzi per la gestione e la valorizzazione*. Regione Piemonte. Blu Edizioni, Peveragno. Cuneo.
- IPLA, a cura di, (2002). *Alberi e Arbusti – guida alle specie spontanee del Piemonte*. Regione Piemonte. Blu Edizioni, Peveragno. Cuneo.
- Istanbulluoglu E., Tarboton D.G., Pack R.T., Luce C.H., (2004). Modeling of the interactions between forest vegetation, disturbances, and sediment yields. *J. Geophys. Res.*, 109.
- Jackson R. B., Canadell J., Ehleringer J. R., Mooney H. A., Sala O. E., Schulze E. D., (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108, 389–411.
- Johnsen K., Maier C., Kress L., (2005). Quantifying root lateral distribution and turnover using pine trees with a distinct stable carbon isotope signature. *Functional Ecology* 19: 81–87.
- Joslin J. D., Wolfe M. H., (1998). Impacts of water input manipulations on fine root production and mortality in a mature hardwood forest, *Plant Soil*, 204, 165–174, doi:10.1023/A:1004352008490.
- Joslin J. D., Wolfe M. H., Hanson P. J., (2000). Effects of altered water regimes on forest root systems, *New Phytol.*, 147, 117– 129, doi:10.1046/j.1469-8137.2000.00692.x.
- Karizumi N., (1968). Estimation of root biomass in forests by soilblock sampling, in: *Methods of Productivity studies in Root System and Rhizosphere Organisms*. Int. Symp. USSR
- Keyes M. R., Grier C. C., (1981). Above and below ground net production in 40-year-old Douglas-fir stands on low and high productivity sites. *Can. J. For. Res.* 11, 599–605.
- Kokutse N., Fourcaud T., Kokou K., Neglo, K., Lac, P., (2006). 3D Numerical Modelling and Analysis of the Influence of Forest Structure on Hill Slopes Stability, INTERPRAEVENT *Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*, Japan 2006, pp. 561–567, 2006 by Universal Academy Press, Inc. / Tokyo, Japan.
- Kozlowski T., (1971). Growth and development of trees. Vol. 2, Academic Press, New York.
- Kramer J. P., Boyer S.J., (1995). *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press, San Diego, USA.
- Krogstad F., (1995). *A physiology and ecology based model of lateral root reinforcement of unstable hillslopes*. Master thesis, University of Washington
- Kun F., Raischel F., Hidalgo R.C., Herrmann H.J., (2007). Extension of Fiber Bundle Models. In: Bhattacharyya P, Chakrabarti BK (eds) Modeling Critical and Catastrophic Phenomena. in *Geoscience, Lecture Notes in Physics No. 705*. Springer, Berlin, pp 57–92
- Libundgut H., (1981). Untersuchungen u"ber das Verhalten von Jungpflanzen einiger Baumarten bei verschiedenem Grundwasserstand. *Schweiz. Zeitschr. Forstw.* 132, 291–318.

- Lingua E., Collatin A., Haudemand J.C., (2003). Individuazione ed analisi delle foreste di protezione diretta (FPD) nel comune di Cogne (Valle d'Aosta). *Atti della 7a Conferenza Nazionale ASITA: "L'informazione territoriale e la dimensione tempo"*. Verona, pp. 1325-1330
- Loades K.W., Bengough A.G., Bransby M.F., Hallett P.D. (2010). Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. *Ecological Engineering*.
- Long, N.T., Guegan Y., Legeay G., (1972). *Étude de la terre armée a l'appareil triaxial*. Rapp. De Recherche. No. 17, LCPC.
- Lynch J.P., Nielsen K.L., Davis R.D., Jablókow A.G., (1997). SimRoot: modelling and visualisation of root systems. *Plant and Soil* 188: 139–151.
- Macinnis-Ng C., Fuentes S., O'Grady A., Palmer A., Taylor D., Whitley R., Yunusa I., Zeppel M., Eamus D., (2010). Root biomass distribution and soil properties of an open woodland on a duplex soil. *Plant Soil*. 327:377-388, DOI 10.1007/s11104-009-0061-7.
- Maffeis L., Gregorini G., (2005). *Piano di Assestamento delle proprietà silvopastorali dei Comuni di Gianico e Artogne*. Periodo di validità 2005-2019. Inedito.
- Maher M., Gray D.H., (1990). Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)*, 116(11), 1661-1677.
- Majdi H., Pregitzer K., Moren A.S., Nylund J.E., Agren G.I., (2005). Measuring fine root turnover in forest ecosystems. *Plant and Soil* 276: 1–8.
- Marden M., Rowan D., Phillips C., (2005). Stabilising characteristics of New Zealand indigenous riparian colonising plants. *Plant and Soil*.
- Mattia C., Bischetti G.B., Gentile F., (2005). Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. *Plant and Soil*, Volume 278, 23–32
- McIvor I. R., Douglas G. B., Hurst S. E., Hussain Z., Foote A. G., (2008). Structural root growth of young Veronese poplars on erodible slopes in the southern North Island, New Zealand. *Agroforest Syst* (2008) 72:75–86
- McIvor I. R., Douglas G. B., Benavides R., (2009). Coarse root growth of Veronese poplar trees varies with position on an erodible slope in New Zealand. *Agroforest Syst* (2009) 76:251–264
- McMinn R. G., (1963). Characteristics of Douglas-fir root systems. *Can. J. Bot.* 41, 105–122.
- Meloni F., Lingua E., Motta R., (2005). Utilizzo di strumenti GIS per l'individuazione automatica delle foreste di protezione diretta in Valle d'Aosta. *Atti della 9a Conferenza Nazionale ASITA*. Catania, 15-18 Novembre, pp.1499-1504
- Meloni, F., Lingua, E., Motta R., (2006). Analisi della funzione protettiva delle foreste: l'esempio della "Carta delle foreste di protezione diretta della Valle d'Aosta". *Forest@* 3:420-425.
- Meyer F.H., Göttsche D., (1971). Distribution of root tips and tender roots of beech. In: Ellenberg H (ed) *Ecological studies. Analysis and synthesis*, vol. 2. Springer-Verlag, Berlin, pp 47–52

- Mickovski S.B., Bengough A.G., Bransby M.F., Davies M.C.R., Hallet P.D., Sonnenberg R., (2007). Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems. *European Journal of Soil Science* 58: 1471–1481
- Mickovski S.B., Van Beek L.P.H., (2009). Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. *Plant Soil* (2009) 324:43–56.
- Mickovski S B., Hallett P.D., Bransby M.F., Davies M.C.R., Sonnenberg R., Bengough A.G., (2010). Mechanical Reinforcement of Soil by Willow Roots: Impacts of Root Properties and Root Failure Mechanism. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1276-1285
- Moore I.D., Grayson R.B., e Landson A.R., (1991), Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrol. Processes*, 5, 3– 30, doi:10.1002/hyp.3360050103.
- Montgomery D.R., Schmidt K., Greenburg H.M., Dietrich W.E., (2000). Forest clearing and regional landsliding, *Geology*, 28(4), 311–314, doi:10.1130/00917613(2000)28<311:FCARL>2.0.CO;2.
- Morgan R.P.C., Rickson R.J., (1995). *Slope stabilization and erosion control — a bioengineering approach*. Chapman & Hall, Univ Press, Cambridge, pp 221–264
- Motta R., Haudemann J.C., (2000). *Protective Forests and Silvicultural Stability: An Example of Planning in the Aosta Valley*. Mt. Res. Dev. 20, 2: 180–187.
- Müller K.H., Wagner S., (2003). Fine root dynamics in gaps of Norway spruce stands in the German Ore Mountains. *Forestry* 76: 149–158.
- Nakamura H., Nghiem Q.M., Iwasa N., (2005). Reinforcement of tree roots in slope stability: A case study from the Ozawa slope in Iwate Prefecture, Japan. *Plant Soil*.
- Nicoll B.C., Ray D., (1996). Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site condition. *Tree Physiology* 16: 891–898.
- Nicoll B.C., Berthier S., Achim A., Gouskou K., Danjon F., van Beek L.P.H., (2006). The architecture of *Picea sitchensis* structural root systems on horizontal and sloping terrain. *Trees* 20: 701–712.
- Nilaweera N.S., Nutalaya P., (1999). Role of tree roots in slope stabilisation. *Bull Eng Geol Environ* 57:337–342 doi:10.1007/s100640050056.
- Neilson J.A., (1964). Autoradiography form studying individual root systems in mixed herbaceous described stands, *Ecology*, 45, 644-646
- Normaniza O.H., Faisal A., Barakbah S.S., (2008). Engineering properties of *Leucaena leucocephala* for prevention of slope failure. *Ecol Eng* 32:215–221 doi:10.1016/j.ecoleng.2007.11.004
- Norris J.E., (2005). Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England. *Plant Soil* 278:43–53 doi:10.1007/s11104-005-1301-0.

- Norris J.E., Stokes A., Mickowski S.B. et al, (2008a). Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions, *Springer*.
- O'Loughlin C.L., (1974a). The effects of timber removal on stability of forest soils. *Journal of Hydrology*, New Zealand. 13: 121-134.
- O'Loughlin C.L., (1974b). A study of tree root strength deterioration following clear-felling. *Canadian Journal of Forest Research*. 4 (1): 107-113.
- O'Loughlin C.L., Watson A., (1979). Root-wood strength deterioration in radiata pine after clearfelling. *New Zealand Journal of Forest Science*, 9(3): 284-293.
- O'Loughlin C.L., Ziemer R.L., (1982). The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests. In: *Ecology of Subalpine Zones*, Oregon State University. Corvallis. Proceedings of the International Union of Forestry Research Organisations Workshop. Ed: R.H. Waring. pp. 70-78.
- Operstein V., Frydman S., (2000). *The influence of vegetation on soil strength*. Ground Improv 4:81–89
- Ozier-Lafontaine H., Lecompte F., Sillon J.F., (1999). Fractal analysis of the root architecture of *Gliricidia sepium* for the spatial prediction of root branching, size and mass: model development and evaluation in agroforestry. *Plant and Soil* 209: 167–180.
- Paar U., (1994). Untersuchungen zum einfluß von ammonium und nitrat auf wurzelphysiologische reaktionsmuster der buche. Ber. Forsch. Zentr., Waldökosysteme göttingen A115.
- Pack R.T., Tarboton D.G., Goodwin C.N., (1997). SINMAP – A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping – Users Manual Available at <http://www.engineering.usu.edu/dtarb>.
- Pack R. T., Tarboton D. G., Goodwin C. N., (1998). The SINMAP approach to terrain stability mapping, paper presented at 8th Congress, *Int. Assoc. of Eng. Geol. and the Environ.*, Vancouver, B. C., Canada.
- Pages L., Vercambre G., Drouet J.L., Lecompte F., Collet C., Le Bot J. (2004). Root Typ: a generic model to predict and analyse the root system architecture. *Plant and Soil* 258: 103–119.
- Pasini A., (1994). *Piano di assestamento forestale delle proprietà dei Comuni di Rovetta e Fino del Monte*. Periodo di validità 1994-2005. Inedito.
- Pelleri F., (2009). Frassino maggiore. *Fraxinus excelsior* L. – Fam. Oleaceae. Sherwood. Foreste ed alberi oggi 159 (2009). 37-42 pp.
- Phillips C. J., Watson A. J., (1994). Structural Tree Root Research in New Zealand, A Review. *Landcare Research Science Series 7*. Manaaki Whenua Press, Lincoln.
- Pizzotti Cassallia M., (1997). *Piano di assestamento forestale del Comune di Piuro. Periodo di validità 1997-2011*. Non pubblicato.

- Pollen N., Collison J. C., Simon A., (2002). *Advances in assessing the mechanical contribution of riparian vegetation to streambank stability*, paper presented at the Earth and Water Resources Institute 2002 Conference, Roanoke, Va.
- Pollen N., Simon A., Collison A., (2004). Advances in Assessing the Mechanical and Hydrologic Effects of Riparian Vegetation on Streambank Stability, in *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology, Water Science and Application 8*, American Geophysical Union, Washington, DC, 113–123.
- Pollen N., Simon A., (2005). Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on streambank stability using a fiber bundle model. *Water Resour Res* 41:W07025 doi:10.1029/2004WR003801
- Pollen N., (2007). Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *Catena* 69 (2007) 197–205
- Pollen-Bankhead N., Simon A., (2009). Enhanced application of root-reinforcement algorithms for bank-stability modelling. *Earth Surf. Process. Landforms* 34, 471–480 (2009)
- Pregitzer K.S., DeForest J.L., Burton A.J., Allen M.F., Ruess R.W., Hendrick R.L., (2002). Fine root architecture of nine north American trees. *Ecological Monographs* 72: 293–309.
- Preti, F., (2006). Stabilità dei versanti vegetati Cap. 10. *Manuale di Ingegneria Naturalistica*, vol. 3. Versanti, Regione Lazio, Roma (in Italian).
- Preti F., Dani A., (2009). Sulla parametrizzazione del rinforzo radicale per l'analisi di stabilità dei versanti vegetati: sperimentazioni e applicabilità G.I.S. *IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria*. Ischia Porto, 12-16 settembre 2009.
- Preti F., Giadrossich F., (2009). Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 1713–1726, 2009.
- Puglisi S., (2003). Attualità delle sistemazioni idraulico-forestali in un mondo che cambia, *Annali della Accademia Italiana di Scienze Forestali*, Vol. LI.
- Puhe J., (2003). Growth and development of the root system of Norway spruce in forest stands – a review. *Forest Ecology and Management* 175: 253–273.
- Raischel F., Kun F., Herrmann H.J. (2008). Continuous damage fiber bundle model for strongly disordered materials. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 77:046102 doi:10.1103/PhysRevE.77.046102.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta e Regione Piemonte, (2006). *Selvicoltura nelle foreste di protezione – esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e in Valle d'Aosta*. Compagnia delle Foreste, Arezzo, pp. 224.
- Regione Lombardia, (2006). *Carta dei tipi forestali della Regione Lombardia*, Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste, Dipartimento ai Servizi del Territorio Rurale e delle Foreste Struttura Suoli, Pianificazione e Sviluppo Sostenibile. Regione Lombardia. Milano

- Regione Lombardia, (2006). *Inventario dei fenomeni franosi in Lombardia*. Protezione Civile, Prevenzione e Polizia Locale. Regione Lombardia.
- Reneau S.L., Dietrich W.E., (1987). Size and location of colluvial landslides in a steep forested landscape. In *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, Proceedings of the Corvallis Symposium*, August 1987. IAHS Publication 165; 39–48.
- Reubens B., Poesen J., Danjon F., Geudens G., Muys B., (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees* 21: 385–402.
- Riestenberg M.M., Sovonik-Dunford S., (1983). *The role of woody vegetation in stabilizing slopes in the Cincinnati area*. Ohio. Geol. Soc. Am. Bull. 94, 506–518.
- Riestenberg M.M., (1987). *Anchoring of thin colluvium on hillslope by roots of sugar maple and white ash*, PhD Dissertation, University of Cincinnati, Cincinnati, USA.
- Riestenberg M.M., (1994). Anchoring of thin colluvium by roots of sugar maple and white ash on hillslopes in Cincinnati. *U.S. Geological Survey Bulletin* 2059-E.
- Roering J.J., Schmidt K.M., Stock J.D. et al., (2003). Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range. *Can Geotech J.* 40:237–253 doi:10.1139/t02-113
- Safford L.O., (1976). Seasonal variation in the growth and nutrient content of yellow-birch replacement roots, *Plant Soil* 44, 439-444.
- Sainju U. M., Good R. E., (1993). Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey pinelands forests. *Plant Soil* 150, 87–97.
- Sakals M.E., Sidle R.C., (2004). *A spatial and temporal model of root cohesion in forest soils*. *Can J Res* 34:950–958 doi:10.1139/x03-268
- Sakals M. E., Innes J. L., Wilford D. J., Sidle R. C., Grant G.E. et al., (2006). *The role of forests in reducing hydrogeomorphic hazards*. *Forest Snow Landscape Research*. 80(1): 11-22.
- Santantonio D., (1990). Modeling growth and production of tree roots. In *Process Modeling of Forest Growth response to Environmental stress*. Dixon: Portland; 124–135.
- Schiechtel H., (1980). *Bioengineering for Land Reclamation and Conservation*, 404 pp., University of Alberta Press, Edmonton, Canada
- Schiechtel H.M., Stern R., (1992). *Manuale delle opere in terra*, (Naturaher Erdbau mit ingenieurbiologischen Bauweisen, Osterreichischer Agrarverlag, Wien), a cura di Lorenzo Dibona, Tipografia Castaldi, Feltre.
- Schiechtel H.M., Stern R., (1994). *Ingegneria naturalistica – manuale delle costruzioni idrauliche*, (Handbuch fur naturnahen Wasserbau, Osterreichischer Agrarverlag, Wien), a cura di Lorenzo Dibona, ed Arca, Trento.

Schlosser, F., Long, N., (1973). *Étude du compartement du materiau terre armée*. Annles de l'Inst. Techq. du Batmend et des Tran. Publ. Suppl. No. 304. Sér. Matér. No. 45.

Schmidt I., Kazda M., (2001). Vertical distribution and radial growth of coarse roots in pure and mixed stands of *Fagus Sylvatica* and *Picea Abies*. *Canadian Journal of Forest Research*, 31,3,pp. 539-548.

Schmidt K.M., Roering J.J., Stock J.D., Dietrich W.E., Montgomery D.R., Schaub T., (2001). The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnolgy Journal* 38: 995–1024

Schmdt I., Kazda M., (2002). Root distribution of Norway spruce in monospecific and mixed stands on different soil, *Forest Ecology and Management*, 159, 37-47.

Schönenberger W., (1998). Adapted Silviculture in Mountain Forests in Switzerland, in IUFRO Inter-Divisional Seoul Conference, Seoul 1998, 142-147.

Schönenberger W., (2000). Silvicultural problems in subalpine forests in the Alps. In: Price M.F., Butt N., (Eds.), *Forest in sustainable Mountain development: a state of knowledge report for 2000*. CABI, Wallinford, 197-203.

Schönenberger W., Brang P., (2004). Silviculture in mountain forests. In: BURLEY, J.; EVANS, J.; YOUNQUIST, J. (eds) *Encyclopedia of Forest Sciences*. Amsterdam, Elsevier. 1085–1094.

Schwarz M., Preti F., Giadrossich F., Lehmann P., Or D., (2010a). Quantifying the role of vegetation in slope stability: a case study in Tuscany (Italy). *Ecological Engineering* 36 (2010) 285–291.

Schwarz M., Lehmann P., Or D., (2010b). Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 354–367 (2010)

Shields, F.D., Gray D.H., (1992). Effects of woody vegetation on sandy levee integrity. *Water Resources Bulletin*, 28(5): 917-931

Sidle R.C., Pearce A.J., O'Loughlin C.L., (1985). Hillslope stability and land use. *Water Resources Monograph* 11: 140 pp.

Sidle R.C., (1992). A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. *Water Resour. Res.* 28, 1897– 1910.

Sidle R.C., Ochiai H., (2006). Landslides: processes, prediction, and land use. American Geophysical Union, Water Resour. Monogr. 18: 350 pp.

Simon A. , Pollen N., Langendoen E., (2006). Influence of two woody riparian species on critical conditions for steambank stability: upper truckee river, California. *Journal of the American Water Resources Association*.

Soliani F., (2005). Manuale di statistica per la ricerca e la professione. Disponibile su: <<http://www.dsa.unipr.it/soliani/soliani.html>> [Data di accesso: 02/10/2010].

Spelta E., Chiaradia E.A., Bischetti G.B., (2009). Il contributo della vegetazione riparia alla stabilità delle sponde nei canali agricoli della pianura lombarda. IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria. Ischia Porto, 12-16 settembre 2009 memoria n. 3-28.

Steel S.J., Gower S.T., Vogel J.G., Norman J.M., (1997). Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiology* 17: 577–587.

Stober C., George E., Persson H., (2000). Root growth and response to nitrogen. In *Carbon and Nitrogen Cycling in European Forest Ecosystems*. Ecological Studies 142; 99–121

Stoekeler J.H. e Kluender W.A., (1938). The hydraulic method of excavating the root system of plants, *Ecology* 19, 335-369

Stone, E.L., Kalisz, P.J., (1991). On the maximum extent of tree roots. *Forest Ecology and Management*. 46: 59-102.

Styczen M.E., Morgan R.P.C., (1995). Engineering properties of vegetation. In: *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*. Eds: R.P.C. Morgan and R.J. Rickson. E & FN Spon, London. pp: 5-58.

Stokes A., Atger C., Bengough A.G., Fourcaud .T, Sidle R.C., (2009). Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant Soil* 324:1–30

Sudmeyer R., (2002). Tree Root morphology in alley systems. *RIRDC Publication* 02/024.

Sun H.L., Li S.H., Xiong W.L. et al., (2008). Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis*. *Ecol Eng* 32:60–67 doi:10.1016/j.ecoleng.2007.09.002

Susmel L., (1988). Principi di ecologia. Fattori ecologici – ecosistemica – applicazioni. CLEUP Editore. Padova.

Swanston D.N., (1970). *Mechanics of debris avalanching in shallow till soils of southeast Alaska*. Research Paper PNW-103. 17 pp. Forest Service. U.S. Dept. of Agriculture, Portland, Oregon.

Swanston D.N., Dyrness C.T., (1973). Stability of steepland. *Journal of Forestry*. 71 (5): 264-269.

Tague C. L., Band L.E., (2004). RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System—An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling, *Earth Interact.*, 8, 1– 42, doi:10.1175/1087-3562(2004)8<1:RRHSSO>2.0.CO;2.

Tarboton D., (2004). TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models). <http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/taudem4.0>.

Taylor, J.R. 2000. *Introduzione all'analisi degli errori – Lo studio delle incertezze nelle misure fisiche*. Zanichelli. Tipostampa Bolognese. Bologna

Timell T. E., (1967). Recent progress in the chemistry of wood hemicelluloses, *Wood Sci. Technol.*, 1, 45– 70, doi:10.1007/BF00592255.

- Thomas R. E., Pollen-Bankhead N., (2010). Modeling root-reinforcement with a fiber-bundle model and Monte Carlo simulation. *Ecological Engineering* 36 (2010) 47–61.
- Thorne, C.R. 1990. Effects of vegetation on riverbank erosion and stability. In: *Vegetation and Erosion*. Ed: J.B. Thornes. John Wiley & Sons, Chichester. pp. 125-43.
- Tobin B., Cermak J., Chiatante D., Danjon F., Di Orio A., Dupuy L., Eshel A., Jourdan C., Kalliokoski T., Laiho R., Nadezhdina N., Nicoll B., Pages L., Silva J., Spanos I., (2007). Towards developmental modelling of tree root systems. *Plant Biosystems* 141: 481–501
- Tonezzer E., Castelli S., (1991a). *Piano di Assestamento Forestale dei Comuni di Casargo, Cortenova, Crandola, Dervio, Margno, Parlasco, Taceno e Vendrognò*. Periodo di validità 1991-2000. Non pubblicato.
- Tonezzer E., Castelli S., (1991b). *Piano di Assestamento Forestale dei Comuni di Barzio, Cassina, Cremano, Introbio, Moggio, Morterone*. Periodo di validità 1991-2000. Non pubblicato.
- Tornani I., Sanjust di Teulada E., Pasini P., D'Urso F., (1895). *Sulla correzione dei torrenti nella Svizzera, nella Francia, e nella Carinzia, Biblioteca di Idronomia*, ristampa anastatica ed. Nuova BIOS, Cosenza, 2007.
- Tosi M., (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorph* 87:268–283 doi:10.1016/j.geomorph.2006.09.019.
- Tosi M., (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology* 87 (2007) 268–283.
- Tsukamoto Y., Kusakabe O., (1984). Vegetation influences on debris slide occurrence on steep slopes in Japan. In: *Proceedings of a Symposium on the effects of forest land use on erosion and slope stability*, Environment & Policy Institute, Honolulu, Hawaii.
- Van Beek L.P., Wint H., Cammeraat L.H., Edwards J.P., (2005). Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. *Plant Soil* 278:55–74 doi:10.1007/s11104-005-7247-4.
- Van Breda N.G., (1937). An improved method in the study of root bisects, *Soc. Afr. J. Sci.*, 34, 260-264
- Van Noordwijk S. L.Y., de Willigen P., (1994). Proximal root diameter as predictor of total root size for fractal branching models. *Plant and Soil* 164: 107–117.
- Vergani C., Bischetti G.B., Chiaradia E.A., (2010). Valutazione a scala locale e regionale del contributo della vegetazione alla stabilità dei versanti. Come mettere in sicurezza il territorio. *Quaderni di idronomia montana*. Nuova Bios.
- Vidal H., (1969). The principle of reinforced earth. *Highway Research Record* No. 282. pp. 1-16.
- Viviani V., Discorso al serenissimo Cosimo III Granduca di Toscana intorno al difendersi da' riempimenti e corrosioni dei Fiumi, Firenze, 1687, Italia.

- Vullo P., (2003). *Valutazione dell'effetto di rinforzo esercitato dalle radici di tre specie forestali in ambito alpino*, tesi di laurea, facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Milano. A.A. 2002/2003.
- Waldron L.J., (1977). The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Sci Soc Am J* 41:843–849.
- Waldron L.J., Dakessian S., (1981). Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties. *Soil Science*. 132 (6): 427-435.
- Wasser B., Frehner M., Frey H.U., Ott E., (1996). *Cure minime per boschi con funzione protettiva*, Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio, Berna.
- Wang W.L., Yen B.C., (1974). Soil arching in slopes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 100(GT1): 61-78.
- Wang Z., Guo D., Wang X., Gu J., Mei L., (2006). Fine root architecture, morphology, and biomass of different branch orders of two Chinese temperate tree species. *Plant and Soil* 288: 155–171.
- Watson A. J., O'Loughlin C. L., (1990). Structural roots morphology and biomass of three age classes of *Pinus radiata*. *NZ J. For. Sci.* 20(1), 97–110.
- Weaver J.E., (1926). *Root Development of Field Crops*, New York-London: McGraw-Hill Book Co. 291 p.
- Wu T.H., (1976). Investigation on landslides on Prince of Wales Island. *Alaska Geotech Rpt No 5* Dpt Civ Eng Ohio State Univ Columbus, USA
- Wu T.H., McKinnel W.P., Swanston D.N., (1979). Strength of tree roots on Prince of Wales Island, Alaska. *Can. Geotech. J.* 16(1), 19–33.
- Wu T.H., (1984a). *Effect of vegetation on slope stability*. In *Soil Reinforcement and Moisture Effects on Stability*. Transportation Research Record 965, Transportation Research Board, Washington, USA, 37–46.
- Wu T.H., (1984b). Soil movement on permafrost slopes near Fairbanks, Alaska. *Can. Geotech. J.* 21, 699–709.
- Wu T.H., Sidle R.C., (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resour. Res.* 31, 2097–2110.
- Wu T.H., (2005). Root reinforcement: analyses and experiments. *Plant and Soil*.
- Yanai R.D., Park B.B., Hamburg S.P., (2006). The vertical and horizontal distribution of roots in northern hardwood stands of varying age. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 450–459
- Zhang C.B, Chen L.H., Liu Y.P., Ji X.D., Liu X.P., (2010). Triaxial compression test of soil–root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength. *Ecological Engineering* 36 (2010) 19–26
- Zhou Y., Watts D., Li Y., Cheng, X., (1998). A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement. *Forest Ecology and Management*, 103, 107-120.

Ziemer R. R., Swanston D. N., (1997). Root strength changes after logging in southeast Alaska. USDA Forest Service Research Note. U.S. Department of agriculture – Portland – Oregon.

Ziemer R.R., (1981). Roots and stability of forested slopes. In Davies T.R.H., Pearce A.J. (eds) Erosion and sediment transport in Pacific Rim steeplands. Int Assoc Hydrol Sci Pub 132:343–361

Zobel R.W., (2005). Primary and secondary root systems. Root and soil management: interaction between roots and the soil. *Agronomy Monograph* 48: 3–14.