



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea magistrale in Scienze forestali e ambientali

Uno studio sull'ecologia e i contaminanti del
suolo nelle formazioni arboree ferroviarie

Relatore:
Tommaso Sitzia
Correlatore:
Flora Giulia Simonelli

Laureando:
Mirco Zappa
Matricola n. 2063064

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

SOMMARIO

RIASSUNTO.....	5
SUMMARY.....	7
1. INTRODUZIONE	9
1.1. Le emissioni del trasporto ferroviario.....	9
1.2. La vegetazione lungo le linee ferroviarie.....	13
1.2.1. Introduzione di specie alloctone.....	15
1.2.2. Il fitorisanamento.....	17
1.3. La robinia (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.).....	21
1.3.1. Habitat ed ecologia.....	21
1.3.2. Impatti sulla vegetazione nativa.....	23
1.3.3. Ripristino ecologico mediante la robinia.....	24
2. OBIETTIVI DELLA RICERCA.....	27
3. MATERIALI E METODI.....	29
3.1. Area di studio.....	29
3.2. Metodo di campionamento delle aree di saggio.....	31
3.3. Protocollo dei rilievi in campo per la raccolta dati.....	33
3.3.1. Campionamenti preliminari del suolo.....	33
3.3.2. Parametri e informazioni generali.....	34
3.3.3. Classificazione delle formazioni lineari.....	35
3.3.4. Composizione della flora vascolare.....	36
3.3.5. Parametri dendrometrici.....	37
3.3.6. Necromassa legnosa.....	38
3.3.7. Campionamento del suolo.....	39
3.4. Analisi di laboratorio.....	41
3.4.1. Analisi del suolo.....	41
3.5. Analisi dei dati.....	43
4. RISULTATI E DISCUSSIONE.....	47
4.1. Campionamenti del suolo preliminari.....	47
4.2. Caratteristiche generali delle formazioni lineari.....	50
4.3. Composizione flora vascolare.....	56
4.4. Struttura delle formazioni arboree.....	59
4.5. Necromassa.....	62

4.6. Concentrazione metalli pesanti nel suolo	64
5. CONCLUSIONI	75
BIBLIOGRAFIA	79
SITOGRAFIA	85
ALLEGATO 1	87
ALLEGATO 2	91
ALLEGATO 3	103
ALLEGATO 4	105

RIASSUNTO

Il trasporto ferroviario riveste un ruolo importante nel settore dei trasporti terrestri, permettendo a persone e aziende di spostarsi e scambiare beni nel mondo grazie ai suoi vantaggi economici, ambientali e di tempo. In Italia le linee ferroviarie in esercizio corrispondono a 16.829 km, ricoprendo gran parte del territorio nazionale. Ne consegue che risulta di fondamentale importanza studiare l'effetto che queste infrastrutture hanno sull'ambiente, sugli ecosistemi e sulla salute umana. I principali inquinanti legati al trasporto ferroviario sono: i metalli pesanti, gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), le sostanze derivate dal petrolio e i policlorobifenili (PCB). I metalli pesanti derivano principalmente dai processi di abrasione che si verificano durante la marcia dei treni rilasciando questi composti nel terreno e nell'ambiente circostante. L'obiettivo della ricerca è quello di analizzare gli impatti del trasporto ferroviario attraverso lo studio delle formazioni arboree lineari adiacenti alle linee ferroviarie. Lo studio è condotto nella regione Veneto nell'anno 2023 e prende in considerazione un totale di 42 aree di saggio dislocate lungo le linee ferroviarie caratterizzate da diversa tipologia e frequenza di traffico ferroviario. Le aree di saggio sono state oggetto di analisi della struttura e composizione floristica delle formazioni arboree e di analisi del suolo per classificare e quantificare i metalli pesanti presenti connessi all'attività ferroviaria. In particolare, sono state analizzate formazioni arboree a prevalenza di *Robinia pseudoacacia* L. e, data la sua diffusione lungo le linee ferroviarie, si indagano le potenzialità fitorimedianti di questa specie.

SUMMARY

A study on the ecology and soil pollutants in tree stands along railways

Railway transport has an important role in the transport sector, it gives to people and companies the possibility to move and ship goods around the world thanks to its advantages in terms of money, environment and time. In Italy, the railway lines correspond to 16.829 km and they connect the majority of the national territory. This concept means that is very important to study the effect this infrastructure have on the environment, ecosystem and health. The main pollutants linked to the rail transport are: heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), petroleum-derived substances and the polychlorinated biphenyls (PCBs). Heavy metal, mostly, come from the abrasion processes while trains are running by releasing these compounds to the ground and the surrounding environment. The goal of the research is to analyse the rail transports impact throw the study of the tree linear systems adjacent the railway lines. The study is done in the Veneto Region in 2023 and it takes in consideration 42 sample areas along railway lines with different types and frequency of rail traffic. The sample areas were the subject of analyses of the structure and floristic composition of the tree linear systems and soil analyses to classify and quantify heavy metals associated with railway activity. The study was focused on tree linear systems with *Robinia pseudoacacia* L., the most widespread tree species along the railway lines in Veneto Region, and its phytoremediation capacity were investigated.

1. INTRODUZIONE

1.1. Le emissioni del trasporto ferroviario

Il settore dei trasporti offre la possibilità a persone e aziende di spostarsi e scambiare beni e servizi nel mondo. In Europa, il settore del trasporto terrestre ha avuto un notevole sviluppo a seguito delle nuove fonti di energia e alle innovazioni portate dalla rivoluzione industriale. Questo settore è costituito principalmente dal trasporto su strada e da quello ferroviario. Nel 1825 in Inghilterra venne aperta la Stockton and Darlington Railway, la prima ferrovia passeggeri al mondo ad abbonamento pubblico, da quel momento il trasporto ferroviario ha iniziato a svilupparsi rapidamente (Wilkomirski et al., 2012).

Oggigiorno le ferrovie svolgono un ruolo sempre più importante nel sistema di trasporto globale di merci e persone, grazie ai loro vantaggi economici, ambientali e di tempo, risultando più efficiente rispetto ad altri mezzi di trasporto.

La lunghezza totale della rete ferroviaria mondiale corrisponde a 1,2 milioni di km (Bosak et al., 2023), in Italia le linee ferroviarie in esercizio corrispondono a 16.829 km (RFI, 2023), che corrisponde circa all'1,4 % della lunghezza delle linee ferroviarie mondiali.

Le ferrovie presentano chiari vantaggi, ma non sono esenti da problemi ambientali che spesso vengono trascurati; pertanto, risulta fondamentale una valutazione dal punto di vista scientifico (in quanto meno studiate rispetto al trasporto su strada) dell'impatto che queste infrastrutture hanno sull'ecosistema, sull'ambiente circostante e sulla salute umana (Brtnický et al., 2022).

I principali contaminanti associati al trasporto ferroviario risultano essere gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), i metalli pesanti, le sostanze derivate dal petrolio e i policlorobifenili (PCB) (Brtnický et al., 2022). Fanno parte degli elementi potenzialmente tossici (PTE) i metalli pesanti, caratterizzati da tossicità, persistenza e bassa degradabilità.

I metalli pesanti possono migrare attraverso le piante e gli organismi animali lungo le catene trofiche fino al corpo umano. Vengono suddivisi in due classi di pericolo in base al grado di influenza sugli organismi viventi. Rientrano nella prima classe di pericolo (I) il Pb, Zn e Cd che hanno un effetto neurotossico e nella seconda (II) Cu, Cr e Ni, elementi con un effetto mutageno e che aumentano la permeabilità cellulare (Bosak et al., 2023).

Il rilascio di metalli pesanti nell'ambiente, da parte delle linee ferroviarie elettrificate, è dovuto principalmente ai processi di abrasione che si verificano principalmente in due modi:

- durante le operazioni di frenata, a causa dell'attrito tra le pastiglie dei freni e le ruote del treno (Burkhardt et al., 2008);
- durante la marcia a causa dell'attrito tra le ruote del treno e le rotaie e tra il pantografo e la linea aerea di contatto (costituita dal 99,8% di rame e dallo 0,2% di argento) (Burkhardt et al., 2008).

L'elemento principale che viene rilasciato durante la frenata di un treno è il ferro, seguito da manganese, rame e cromo, mentre l'abrasione tra le ruote e le rotaie, che sono composti per il 96% di ferro, genera l'emissione di rame, nichel, molibdeno e vanadio (Burkhardt et al., 2008).

Secondo un resoconto rilasciato nel 2003 dalle Ferrovie Federali Svizzere (SBB), in un anno sono state rilasciate complessivamente 1912 t di materiale frenante, il contatto tra le ruote e le rotaie ha generato in media 124 t di materiale abrasivo sulle ruote e 460 t sulle rotaie, e il contatto con i pantografi ha portato all'emissione di 38 t di rame e 80 kg di argento emessi come particolato (Burkhardt et al., 2008). Si aggiungono alle emissioni appena citate la perdita di lubrificanti, oli, vernici e grassi utilizzati per il corretto funzionamento degli ingranaggi di motori, ammortizzatori, cuscinetti e scambi che vengono dispersi nel terreno (Meřrak et al., 2015) e rilasciano nell'ambiente metalli pesanti come zinco, cadmio e piombo (Chen et al., 2014). Sulle linee non elettrificate vengono ancora utilizzate locomotive a motore diesel che immettono nell'aria gas di scarico esausti influenzando sul rilascio di Zn e Pb nell'ambiente e nel terreno circostante (Chen et al., 2014). In Italia, le linee non elettrificate, dove vengono utilizzate locomotive a motore diesel, si estendono per 4.645 km (RFI, 2023).

Uno studio condotto da Stančić et al. (2022) mostra come le concentrazioni totali di antimonio variano da 0,98 a 52,0 mg/kg e quelle di stagno da 3,04 mg/kg a 97,6 mg/kg in prossimità delle linee ferroviarie, valori maggiori della media dei suoli europei rispettivamente fino a 87 e 33 volte. L'origine dell'arricchimento di Sb e Sn nei suoli è causata dall'abrasione di freni, rotaie, ruote, perdite di merci e gas di scarico (Stančić et al., 2022). Non indifferente risulta essere la fuoriuscita di materiale, l'emissione di polveri e l'evaporazione dei materiali trasportati lungo le linee ferroviarie dai treni merci, oltre alla dispersione di rifiuti domestici derivanti dal trasporto di persone. I materiali trasportati contenenti Zn e Pb vengono assorbiti dalle particelle di grosse dimensioni o cadono direttamente dai treni merci, depositandosi rapidamente sulle massicciate

ferroviarie (Chen et al., 2014). L'emissione di tutti questi composti risulta dipendente dalla frequenza dei trasporti e dal modello di treno utilizzato, incrementando all'aumentare del traffico ferroviario; la quantità di metalli pesanti rilasciati aumenta nelle aree di frenata in prossimità di aree urbane, stazioni ferroviarie e scambi ferroviari. Diversi inquinanti vengono emessi indipendentemente dalla frequenza del traffico ferroviario come le sostanze rilasciate dalle infrastrutture ferroviarie, quali pali, binari, traversine e scambi. I pali che costituiscono la linea aerea di tensione sono costituiti da zinco (99%) e cadmio che negli anni vengono dilavati e rilasciati nel terreno, così come i binari rivestiti di piombo. Rilevanti dal punto di vista ambientale risultano le perdite di idrocarburi derivanti dal creosoto, materiale utilizzato come impregnate per le traversine di legno dei binari ferroviari laddove non sono state sostituite con quelle in cemento. Il creosoto viene disperso tramite volatilizzazione, essudazione, abrasione e lisciviazione nell'ambiente circostante le linee ferroviarie (Burkhardt et al., 2008).

Studi condotti in Polonia da Brtnický et al. (2022) hanno mostrato come i contenuti di PTE sono risultati poco dipendenti dalla presenza di stazioni ferroviarie; tuttavia, il loro contenuto è diminuito significativamente con l'aumentare della distanza dai binari, anche se in modo non lineare fino a una distanza di 25 m, dimostrando come il trasporto ferroviario sia una fonte di Cu, Ni e Zn. L'effetto risulta essere maggiore andando avanti nel tempo a causa della bassa degradabilità dei PTE e del loro aumento con il tempo di utilizzo della ferrovia. A differenza degli altri composti si è visto come il piombo potrebbe essere distribuito in modo differente con la capacità di accumularsi fino a una distanza di 50 m. I gas di scarico dei motori diesel delle locomotive sono la fonte principale di piombo e sono, quindi, in grado di arrivare a una distanza maggiore dalla linea ferroviaria a differenza di Cu, Ni e Zn che sono rilasciati principalmente per abrasione e si distribuiscono principalmente in prossimità dei binari (Brtnický et al., 2022). Diversi studi hanno mostrato come il contenuto di PTE nel terreno viene influenzato dal lato del binario; la concentrazione di metalli pesanti è in media più elevata, dal 2,6% al 29,9%, nelle zone sopravvento rispetto a quelle sottovento, questo è probabilmente causato dalla direzione dei venti prevalenti che favoriscono un accumulo nelle zone sopravvento (Brtnický et al., 2022).

1.2. La vegetazione lungo le linee ferroviarie

La vegetazione presente lungo le linee ferroviarie viene influenzata dalla qualità del suolo, dai metalli pesanti contenuti nel terreno e dall'impatto antropico. Le sostanze potenzialmente tossiche possono essere accumulate nel suolo lungo le ferrovie e quindi essere assorbite dalle piante che crescono in prossimità dei binari.

Gli elementi potenzialmente tossici (PTE) possono causare danni alle radici, inibizione della fotosintesi e danni all'apparato fotosintetico con conseguenti ritardi nello sviluppo e morte della pianta; inoltre, questi elementi causano la diminuzione delle attività enzimatiche del suolo che possono portare al degrado di ecosistemi sensibili (Meng et al., 2018).

La vegetazione presente lungo le linee ferroviarie risulta un problema per la viabilità del traffico ferroviario e per la sua sicurezza, perciò, viene gestita sia a livello meccanico, attraverso sfalci e potature, sia a livello chimico attraverso il diserbo (Brtnický et al., 2022). L'erbicida maggiormente utilizzato è il glifosato. In Svizzera si è stimato che, in un anno, siano state utilizzate 3,9 t di principio attivo per gestire le malerbe lungo le linee ferroviarie del paese (Burkhardt et al., 2008).

L'inquinamento ferroviario può essere visto positivamente in quanto ha un effetto inibitore sulla vegetazione in prossimità dei binari fino a 50 m, senza una differenza significativa al variare della distanza (Brtnický et al., 2022). In prossimità dei binari, a causa dei ripetuti trattamenti chimici e della presenza della massicciata ferroviaria, riescono a crescere principalmente specie erbacee a ciclo annuale (terofite). All'aumentare della distanza dalla ferrovia si incontrano erbe e arbusti e successivamente erbe, arbusti e alberi che costituiscono le formazioni lineari lungo le ferrovie. Le formazioni lineari presenti lungo i binari ferroviari sono un'importante misura per la riduzione degli impatti negativi del trasporto ferroviario sull'ambiente. Queste formazioni risultano fondamentali per diversi aspetti:

- fungono da corridoi ecologici per flora, fauna e invertebrati (Corona et al., 2009);
- assorbono i contaminanti dal suolo e dalle acque stoccandoli nei tessuti epigei e ipogeici (Chen et al., 2018);
- consolidano le scarpate ferroviarie grazie alla riduzione del deflusso e dell'erosione (Chen et al., 2018);

- immobilizzano i metalli pesanti andando a ridurre l'erosione del suolo, grazie all'apparato radicale delle piante (Chen et al., 2018);
- migliorano il paesaggio e mitigano le infrastrutture e le strutture (Corona et al.,2009);
- riducono il rumore (Bosak et al., 2023);
- producono legname da energia commerciabile (Corona et al.,2009);
- partecipano al sequestro di carbonio (Corona et al.,2009).

Uno studio condotto in Cina da Chen et al. (2018) ha mostrato che l'erosione del suolo sulle scarpate ferroviarie ha svolto un ruolo primario nella migrazione di Cd e Pb. È stato stimato che l'87–91% di Cd e l'85–89% di Pb siano andati persi nei sedimenti. Sono state confrontate tre tipi di vegetazioni lungo le ferrovie: erbe, erbe e arbusti ed erbe, arbusti e alberi. Quest'ultima formazione si è dimostrata più efficace nel ridurre la migrazione di Cd e Pb verso i terreni vicini e nel ridurre il rischio ambientale grazie all'intercettazione della pioggia, aumentandone l'infiltrazione e proteggendo il terreno dall'erosione diretta. I livelli di inquinamento di Cd e Pb aumentano con l'aumentare del tempo di esercizio delle ferrovie e diminuiscono con l'aumentare della distanza dal bordo ferroviario (Chen et al., 2014).

Le diverse condizioni microclimatiche (luminosità e temperatura), la composizione chimica e fisica del substrato (massicciate con pietrisco grossolano, aree pavimentate e aree con stabilizzato), l'uso frequente di erbicidi e gli interventi antropici determinano la formazioni di particolari habitat lungo le linee ferroviarie, molto importanti dal punto di vista ecologico e biologico (Alessandrini, 2018).

Diversi studi condotti in Europa centrale e settentrionale hanno messo in evidenza come i margini ferroviari e stradali, in ambienti naturali, costituiscano frammentazione degli habitat e delle popolazioni; mentre, in aree già fortemente trasformate dall'uomo, rappresentino una fonte e un'opportunità per la biodiversità floristica autoctona e possano fungere da habitat per specie rare o in via d'estinzione, in quanto meno disturbate delle aree circostanti (Filibeck et al, 2012).

L'acqua a disposizione delle specie presenti lungo le linee ferroviarie è limitata agli eventi meteorologici, inoltre, le scarpate ferroviarie sono fortemente drenanti per garantire la sicurezza del traffico ferroviario, questo determina che la vegetazione in prossimità dei binari si sviluppi in condizioni fortemente xeriche. Le diverse condizioni ambientali

presenti lungo le linee ferroviarie formano un insieme complesso di habitat utilizzabili da diverse specie.

Le stazioni ferroviarie, soprattutto nella parte dedicata ai passeggeri e al traffico ferroviario, risultano povere di specie, sia per l'utilizzo di erbicidi che per le condizioni ambientali difficili, e sono dominate da specie a ciclo breve, con produzione di seme molto elevata ed elevata germinabilità. Si è visto come la collocazione territoriale influenzi lo sviluppo della flora: nel caso di piccole stazioni ubicate in zone agricole si rileva la presenza di specie di questi ambienti, mentre in ambiente urbano predomina vegetazione di tipo ruderale di ambienti urbani (Alessandrini et al., 2011). Nelle aree meno disturbate si può sviluppare vegetazione erbacea dominata principalmente da specie perenni ed emicriptofite, che costituiscono prati di bassa statura con *Cynodon dactylon* (L.) Pers. o con statura più elevata con *Elymus repens* (L.) Gould dominante. Se le condizioni migliorano le praterie sono caratterizzate da leguminose, come l'erba medica (*Medicago sativa* L.) e il ginestrino (*Lotus corniculatus* L.) (Alessandrini et al., 2011). Nelle aree perimetrali meno disturbate si sviluppano specie arboree e arbustive che spesso possono derivare da impianti artificiali (con lo scopo di consolidare le scarpate e migliorare l'impatto paesaggistico dell'infrastruttura ferroviaria) o dalla dispersione da parte degli uccelli (soprattutto per le specie arbustive). All'interno di questa struttura si insediano facilmente, grazie alla dispersione anemocora e zoocora, specie lianose come la vitalba (*Clematis vitalba* L.), la vite (*Vitis* sp.), il luppolo (*Humulus lupulus* L.) e la lonicera giapponese (*Lonicera japonica* Thunb.). Queste formazioni lineari, disposte lungo le linee ferroviarie, hanno una certa somiglianza sia fisionomica che funzionale con gli ambienti fluviali; la granulometria del terreno risulta prevalentemente costituita da ghiaia e sabbia e le diverse forme vegetazionali, continuamente sottoposte a disturbi, assumono una forma lineare, stretta e allungata come per la vegetazione ripariale lungo i corsi d'acqua (Alessandrini et al., 2011).

1.2.1. Introduzione di specie alloctone

L'introduzione di specie aliene è tra le principali minacce alla biodiversità naturale e ai processi ecosistemici a livello globale, influenzando la struttura e la composizione degli ecosistemi naturali (Benesperi et al., 2012).

A livello europeo è stato emanato il Regolamento (UE) 22 ottobre 2014, n.1143 “recante disposizioni volte a prevenire e gestire l’introduzione e la diffusione delle specie esotiche invasive” (Reg. n. 1143/2014), dove per specie esotica invasiva si intende “una specie esotica per cui si è rilevato che l’introduzione o la diffusione minaccia la biodiversità e i servizi ecosistemici collegati, o ha effetti negativi su di essi” (Reg. n. 1143/2014). Tale Regolamento ha lo scopo di definire le norme atte a ridurre al minimo l’impatto di queste specie sulla biodiversità, in particolar modo all’interno delle aree protette che sono tra le più minacciate a livello mondiale (Campagnaro et al., 2018). A causa delle particolari caratteristiche stazionali le ferrovie si sono dimostrate particolarmente favorevoli all’ingresso e alla diffusione di specie esotiche invasive. La presenza delle specie alloctone è favorita dall’attività umana e dall’urbanizzazione; maggiore è la viabilità all’interno di un’area urbana, maggiore è la possibilità di diffusione di queste specie, in quanto si diffondono lungo i corridoi lineari, in particolare strade e linee ferroviarie (Denisow et al., 2017). Uno studio condotto da Schermann e Czóbel (2021), in Ungheria nel 2017, sembra evidenziare che la presenza di specie arboree non autoctone diminuisca con l’aumentare della distanza dalla linea ferroviaria, mentre per quanto riguarda le specie erbacee alloctone non si evidenzia questa tendenza.

Per la presenza di ambienti prevalentemente xerici lo studio condotto da Alessandrini et al. (2011) ha mostrato un numero elevato di specie termofile lungo le linee ferroviarie nella regione dell’Emilia-Romagna; infatti, il 25% delle specie rinvenute hanno un areale mediterraneo e il 17% delle specie erano alloctone, valore superiore a quello della flora regionale che corrisponde al 12%.

La diffusione delle piante lungo le linee ferroviarie avviene in diversi modi. La dispersione anemocora è la più frequente lungo le ferrovie ed è favorita dal passaggio dei treni che creano un vortice d’aria che disperde i semi parallelamente alla linea ferroviaria. Questo fattore è incentivato dal dislivello della scarpata ferroviaria che rende l’azione di dispersione dei vortici d’aria più efficiente (Alessandrini et al., 2011). Una specie che si diffonde in questo modo è il *Senecio inaequidens* DC, specie alloctona caratterizzata da una crescita rapida e dalla capacità di crescere in zone ruderali calde, secche e disturbate come le linee ferroviarie (Regione Lombardia, 2023). Un altro importante metodo di diffusione delle specie che costituiscono le formazioni lineari lungo le ferrovie, è mediante la diffusione zoocora che si suddivide in: epizoocoria quando i frutti o semi

vengono trasportati all'esterno degli animali, endozoocoria quando i frutti o semi vengono ingeriti e poi espulsi attraverso le feci. La diffusione dei semi in questi ambienti avviene anche grazie alla diffusione da parte delle formiche (mirmecocoria) e alla dispersione bolocora (Alessandrini et al., 2011). Attualmente la diffusione di specie alloctone attraverso il trasporto di cereali e bestiame lungo le linee ferroviarie è in diminuzione, motivo per il quale è presente una biodiversità di specie esotiche inferiore rispetto alla prima metà del XX secolo (Filibeck et al., 2012).

Le specie esotiche invasive possono avere impatto sull'ecosistema forestale in quanto possono modificare le condizioni dell'habitat tramite, ad esempio, alterazione del substrato della composizione floristica, della fauna, del microbiota del suolo, ecc. I processi di invasione possono portare alla sostituzione delle comunità native con comunità omogenee e poco diversificate; inoltre, si prevede che questa situazione possa aggravarsi nei futuri scenari di cambiamenti climatici (Benesperi et al., 2012).

A livello europeo, destano particolare attenzione le specie arboree esotiche invasive che hanno effetti negativi sulla conservazione delle specie autoctone e sullo stato di ecosistemi naturali e seminaturali; le più diffuse e gestite all'interno delle aree protette sono: *Robinia pseudoacacia* L., *Acer negundo* L., *Prunus serotina* Ehrh. e *Quercus rubra* L.. L'invasione di specie neofite è fortemente legata agli ambienti umidi e a quelli disturbati, sia da eventi naturali che causati dall'uomo, in quanto vengono alterate le condizioni ambientali favorendo l'introduzione e diffusione di queste specie (Campagnaro et al., 2018).

1.2.2. Il fitorisanamento

I metalli pesanti rilasciati nell'ambiente non sono biodegradabili, pertanto, si accumulano nel suolo e nelle acque rappresentando un rischio per la salute umana e per l'ambiente. La bonifica dei suoli contaminati è fondamentale per ridurre al minimo il loro impatto sugli ecosistemi. I metodi di bonifica possono essere fisici, chimici o biologici. In generale i metodi fisici e chimici causano cambiamenti irreversibili delle proprietà del suolo e disturbi alla microflora nativa del terreno, con una richiesta elevata di manodopera ed elevati costi. Una soluzione a questo problema è il fitorisanamento, una tecnica che prevede l'utilizzo di piante e microrganismi del suolo al fine di ridurre le concentrazioni e gli effetti tossici dei contaminanti sull'ambiente (Ali et al., 2013).

Le tecniche di fitorisanamento comprendono (Ghosh e Singh, 2005):

- fitoestrazione: processo attraverso il quale le piante assorbono i contaminanti dal suolo o dall'acqua mediante le radici e li traslocano nella loro biomassa (principalmente germogli o foglie);
- rizofiltrazione: captazione degli inquinanti da parte delle piante sia terrestri che acquatiche da acque superficiali o reflue;
- fitostabilizzazione: utilizzo di alcune specie di piante al fine di immobilizzare gli inquinanti riducendo la loro mobilità e biodisponibilità nel suolo;
- fitovolatilizzazione: capacità delle piante di assorbire sostanze inquinanti dal terreno e di rilasciarle nell'atmosfera tramite la traspirazione fogliare;
- fitodegradazione: processo di degradazione dei contaminanti organici che avviene all'interno delle piante attraverso processi metabolici ed enzimatici;
- rizodegradazione: degradazione degli inquinanti organici da parte dei microrganismi presenti nella rizosfera;
- fitodesalinizzazione: utilizzo di piante alofite per la rimozione di sali dal terreno.

La fitoestrazione è la tecnica più efficace e usata per la rimozione dei metalli pesanti e dei metalloidi.

L'utilizzo di piante iperaccumulatrici si è rivelato più efficiente, in quanto, queste specie, sono in grado di accumulare elevate quantità di metalli pesanti e produrre meno biomassa fuori terra delle altre specie; in questo modo si otterrà un volume minore di biomassa ma ricca di inquinanti, facilitandone lo smaltimento (Ali et al., 2013). Vengono definite piante iperaccumulatrici le specie in grado di accumulare più di 100 mg/kg s.s. di Cd, più di 1000 mg/kg s.s. per il Cu, Co, Cr, Ni e Pb e più di 10000 mg/kg s.s. per Zn e Mn nei tessuti secchi della pianta che si è sviluppata nel suo habitat naturale (Baker et al., 2000). L'assorbimento di metalli pesanti dal suolo varia da specie a specie, le piante iperaccumulatrici sono circa 400 specie e appartengono a 22 famiglie diverse, la più numerosa è la famiglia delle Brassicaceae che conta 87 piante in grado di assorbire elevate concentrazioni di metalli pesanti (Ghosh e Singh, 2005).

Le piante utilizzate per la fitoestrazione devono essere in grado di crescere al di fuori del loro areale con una rapida crescita, un'abbondante produzione di biomassa e un apparato radicale ben sviluppato e ramificato. Queste specie, oltre ad avere un'elevata tolleranza alle alte concentrazioni di metalli pesanti presenti nel terreno e un'ottima resistenza ai

patogeni e parassiti, devono essere in grado di assorbire metalli pesanti in grandi quantità e accumularli nei loro organi epigei. Di fondamentale importanza risulta la non appetibilità di queste specie da parte di animali erbivori per evitare contaminazione della catena alimentare (Padmavathiamma e Li, 2007).

I metalli pesanti devono essere mobilizzati nella soluzione del suolo affinché le piante possano assorbirli; la composizione chimica e fisica del suolo influenza la loro mobilità e biodisponibilità. La fitoestrazione può essere applicata attraverso due tecniche: naturale o indotta. La tecnica naturale avviene grazie a meccanismi sviluppati dalle piante per la solubilizzazione di metalli pesanti, come la secrezione di sostanze dalle radici (fitosiderofori) e di ioni H^+ acidificando la rizosfera. Nella fitoestrazione indotta diversi agenti chelanti vengono aggiunti al terreno per aumentare la biodisponibilità dei metalli pesanti nel suolo per l'assorbimento da parte delle piante (Ali et al., 2013). È stato osservato come l'inoculazione di batteri e funghi micorrizici nel terreno, che entrano in simbiosi con le radici delle piante, possono migliorare l'assorbimento dei metalli pesanti presenti nel suolo (Muthusaravanan et al., 2018). La fitoestrazione risulta applicabile solamente nei siti inquinati con livelli di metalli pesanti da bassi a moderati, in quanto la crescita delle piante non avviene in terreni fortemente inquinati. L'efficacia di questa tecnica è limitata al tasso di crescita della pianta e all'area di esplorazione degli apparati radicali delle piante, se l'inquinamento e le acque contaminate si trovano sotto di essi la bonifica non può avvenire (Ghosh e Singh, 2005).

1.3.La robinia (*Robinia pseudoacacia* L.)

1.3.1. Habitat ed ecologia

La robinia è una specie originaria del Nord America, è stata introdotta in Europa nel 1601 dall'erborista francese Jean Robin come pianta ornamentale e in Italia nel 1662 nell'Orto botanico di Padova. Attualmente la robinia è presente in quarantadue paesi europei ed è naturalizzata in trentadue ed è la specie di latifoglie più diffusa nel continente, in Italia ricopre 233.533 ha (Nicolescu et al., 2020).

La robinia è la specie esotica più diffusa all'interno delle Regioni alpine italiane, essa forma soprassuoli puri o partecipa come specie principale o minoritaria in molte formazioni forestali. La sua diffusione in Italia ha raggiunto l'apice tra la Prima e la Seconda guerra mondiale a causa della necessità di ricostruire i boschi sovrasfruttati e distrutti dalla guerra. Fu introdotta principalmente nei boschi degradati su versanti ripidi e a rischio di dissesto e lungo le scarpate e i margini delle linee ferroviarie in quanto, grazie al suo ampio apparato radicale e alle caratteristiche ecologiche da specie pioniera, è in grado di consolidare i versanti franosi (Del Favero, 2004). Tuttora la sua diffusione in Italia è favorita dall'urbanizzazione e dalla gestione forestale intensiva delle foreste native. La forma di governo a ceduo con turni brevi, per la produzione di legna da ardere, favorisce la formazione di popolamenti puri di robinia. In questa condizione le specie autoctone hanno difficoltà a rinnovarsi, in particolare in ambienti aridi e poveri di nutrienti e nelle pianure, dove questa gestione va ad alterare la struttura dell'ecosistema e le dinamiche dei boschi autoctoni composti da querce e castagni (Benesperi et al., 2012). La robinia è una specie multiuso, viene utilizzata principalmente per la produzione di legna da ardere (elevato potere calorifico) grazie ai suoi accrescimenti veloci e abbondanti (10–16 m³/ha/anno). Il suo legno viene anche utilizzato come legname da paleria (legno durevole e resistente all'umidità) e da opera (per parquet e mobili), nonché per la produzione di biomassa; è la specie mellifera più importante in Italia (Del Favero, 2004). La robinia, appartenente alla famiglia delle Fabaceae, è una specie fortemente eliofila e termofila che predilige climi da submediterranei a continentali caldi e terreni a tessitura grossolana ben drenati e areati. Questa specie è in grado di tollerare un'ampia gamma di condizioni edafiche, come terreni salini o inquinati da metalli pesanti e resistere a condizioni di siccità e di inquinamento atmosferico. Essa si sviluppa fino a 800 m.s.l.m. nei Carpazi e fino a 1200–1300 m.s.l.m. nelle Alpi meridionali e in Svizzera (Cierjacks

et al., 2013). La dispersione dei semi di robinia è elevata, ma la loro crescita è ostacolata dallo spessore e dall'impermeabilità del tegumento del seme, per questo si riproduce principalmente per via agamica. La sua rapida crescita nella fase giovanile, unita all'elevata capacità di riproduzione vegetativa e al suo apparato radicale dimorfico che si sviluppa sia orizzontalmente che verticalmente, ne fanno un'ottima specie per il consolidamento di pendii e zone dissestate soggette a erosione eolica e idrica (Enescu e Dănescu, 2013).

Questa specie partecipa al processo di formazione del suolo, migliorandone la qualità; è in grado di aumentare il contenuto totale di azoto, in quanto è una specie azotofissatrice e di aumentare il carbonio organico del suolo grazie alla sua elevata produzione annuale di foglie velocemente degradabili che generano quantità elevate di sostanza organica. Questo porta a una diminuzione della reazione del suolo (pH) e della densità apparente e a un aumento della capacità di scambio cationica e di ritenzione idrica del suolo (Enescu e Dănescu, 2013).

Le caratteristiche ecologiche e biologiche della robinia le permettono di svilupparsi velocemente e in maniera dominante negli ambienti degradati e antropizzati dove trova le condizioni ideali per il suo sviluppo, come sulle scarpate e lungo le linee ferroviarie. In Europa, la robinia ha un'elevata resistenza ai parassiti e alle malattie, tuttavia, negli ultimi decenni, sono stati segnalati alcuni insetti e funghi lignivori che colpiscono alberi maturi, semi e piantine, come un moscerino (*Obolodiplosis robiniae* Haldeman) e due falene (*Phyllonorycter robiniae* Clemens e *Parectopa robiniella* Clemens) (Nicolescu et al., 2020).

I popolamenti dominati da robinia sono classificati nella classe fitosociologica *Robinietaea*; le principali associazioni presenti in Europa centrale sono (Sitzia et al., 2016):

- *Balloto-Robinetum*: le specie diagnostiche includono *Ballota nigra* L., *Bromus sterilis* L., *Dactylis glomerata* L., caratteristico di suoli poveri e terreni sabbiosi;
- *Solidagino-Robinetum*: le specie diagnostiche includono *Solidago gigantea* Aiton, caratteristico di suoli fluviali;
- *Chelidonio-Robinetum*: caratterizzati da un sottobosco di *Chelidonium majus* L. e altre specie come *Sambucus nigra* L., *Galium aparine* L., *Urtica dioica* L., *Geranium robertianum* L., caratteristico di suoli leggermente umidi e ricchi di sostanza organica;

- *Poo nemoralis-Robinetum*: con lo strato di erbe dominato da *Poa nemoralis* L., caratteristico di pendii con substrato roccioso acido.

1.3.2. Impatti sulla vegetazione nativa

La robinia è una delle specie esotiche più problematiche e diffuse in Europa, grazie al suo elevato tasso di crescita, alla forte capacità pollonifera caulinare e radicale e alla sua ampiezza ecologica. Questa specie non è inclusa nella lista delle specie esotiche invasive di rilevanza comunitaria riportata nel Regolamento (UE) 2016/1141, tuttavia, soddisfa la definizione di “specie esotica invasiva ampiamente diffusa” prevista dall’art. 3 del medesimo Regolamento e può quindi essere inserita negli elenchi nazionali degli Stati membri (Campagnaro et al., 2018). Una volta insediatasi, la robinia, aumenta la quantità di nutrienti nel suolo influenzando le piante vascolari autoctone presenti, può quindi comportare la variazione della composizione delle specie, favorendo la diffusione di specie nitrofile, ruderali e alloctone. L’attività di azotofissazione può fissare ogni anno tra i 23 e i 300 kg di azoto per ettaro (Sitzia et al., 2016) ed è massima nei popolamenti di età intermedia, mentre in quelli maturi la fissazione diminuisce favorendo nuovamente l’insediamento di specie oligotrofiche e di flora autoctona. Questo processo è ostacolato dalla gestione forestale della robinia che è basata su un governo a ceduo con turni brevi (10–15 anni) che favorisce la sua crescita e la sua attività fisiologica, compresa la fissazione dell’azoto impendendo una successione vegetale con specie autoctone, motivo per il quale la maggior parte delle specie rinvenute nei robinieti appartengano a specie nitrofile (Benesperi et al., 2012).

I boschi di latifoglie decidue, tra cui quelli di castagno (*Castanea sativa* Mill.), cerro (*Quercus cerris* L.) e carpino nero (*Ostrya carpinifolia* Scop.) sono vulnerabili alla diffusione di *Robinia pseudoacacia* L. a causa della sua elevata competizione (Benesperi et al., 2012). L’invasione da parte della robinia in questi boschi ha portato a un cambiamento delle caratteristiche ambientali e di habitat, con conseguente degrado dell’habitat forestale esistente (Campagnaro et al., 2023). Studi condotti in Italia da Benesperi et al. (2012) e Campagnaro et al. (2023) hanno valutato la ricchezza di specie all’interno di popolamenti puri di robinia e in formazioni di latifoglie decidue gestite a ceduo. Questi studi hanno mostrando come la diffusione di questa specie all’interno dei

boschi di latifoglie e lo sviluppo di popolamenti puri di robinia comporti un cambiamento della ricchezza e della composizione delle specie vegetali all'interno di quell'habitat.

L'elevata adattabilità di questa specie e il suo valore economico e sociale, piuttosto che il suo comportamento invasivo, è il motivo per cui è stata ampiamente utilizzata, portando alla sua naturalizzazione. Tuttavia, la presenza di questa specie dovrebbe essere attentamente monitorata nelle aree in cui la conservazione della biodiversità è tra le priorità di gestione, come nei siti natura 2000 (Direttiva 92/43/CEE "Habitat"), nei boschi aridi e poveri di nutrienti e nei boschi ripariali, poiché ha un grande potenziale dannoso (Enescu e Dănescu, 2013).

La sospensione delle attività di gestione nei popolamenti di robinia o il prolungamento del ciclo di rotazione rappresentano una tra le pratiche più affidabili per il suo contenimento, consentendo ai popolamenti di robinia di diventare senescenti ed essere sostituiti da foreste autoctone (Benesperi et al., 2012).

1.3.3. Ripristino ecologico mediante la robinia

Il ripristino ecologico come definito dalla Society for Ecological Restoration (SER), è il processo di assistenza al recupero di un ecosistema che è stato degradato, danneggiato o distrutto e ha lo scopo di migliorare lo stato di un'area degradata dall'uomo e di riportarla nelle condizioni precedenti il disturbo, avviando o accelerando il recupero dell'ecosistema e dei servizi socioeconomici che fornisce alla società (SER, 2023). Tra i metodi per il ripristino degli ambienti degradati, la copertura con vegetazione è il metodo più economico ed ecologico, consentendo la stabilizzazione e il biorisanamento dei soprassuoli degradati (Băbău et al., 2021).

Diverse piante sono in grado di resistere a concentrazioni relativamente elevate di metalli pesanti senza apparenti effetti tossici visivi. Queste specie possono essere utilizzate per accumulare metalli pesanti nella loro biomassa, per limitare la mobilità e la biodisponibilità di questi elementi nel suolo e per limitarne il trasporto causato dall'erosione dell'acqua e del vento (Băbău et al., 2021).

La robinia è una specie che tollera i metalli pesanti ed è in grado di accumularli all'interno delle sue foglie e delle sue radici. Per questo motivo può essere utilizzata per la fitodepurazione di materiale sterile proveniente da discariche o da siti industriali

inquinati, inoltre può essere impiegata con successo nella stabilizzazione di versanti, dune sabbiose e discariche abbandonate (Băbău et al., 2021).

Uno studio condotto da Băbău et al. (2021) ha mostrato come la *Robinia pseudoacacia* L. può essere utilizzata con successo per la bonifica di siti contaminati da metalli pesanti grazie alle sue capacità di fitorisanamento. Sono stati condotti degli studi in laboratorio sulla germinazione dei semi e sull'assorbimento di metalli pesanti in un substrato di crescita sterile contaminato con metalli pesanti. I risultati hanno mostrato come i semi sono germinati in più del 60% dei casi e in tempi relativamente brevi (4 giorni) e il 92,31% di Cu e il 46,64% di Pb sono stati rimossi dal materiale sterile in 3 mesi, mentre non è stata in grado di rimuovere il Cd dal terreno. Inoltre, è stato evidenziato come più del 44% della quantità di Cu iniziale presente nel terreno sia stata accumulata all'interno degli organi fogliari, mostrando come sia necessario provvedere alla rimozione delle foglie cadute a terra per evitare nuovamente la diffusione di rame nel terreno.

La robinia, come dimostrato dagli studi condotti da Palowski et al. (2016), può essere utilizzata come bioindicatore della contaminazione dei metalli dell'aria. Sono stati analizzati diversi organi vegetali della pianta e, quelli che risultano essere più utili come bioindicatori, sono la corteccia e le foglie, mentre il pericarpo, i semi e i germogli sembravano meno efficaci. Questa caratteristica della robinia permette di studiare la contaminazione di metalli dell'aria nelle città, il trasporto a lungo raggio delle emissioni industriali e l'effetto del trasporto stradale e ferroviario. Lo studio ha evidenziato come le più alte concentrazioni di Fe e Cu siano state rinvenute in prossimità dei binari ferroviari a causa dell'attrito dei treni con binari ferroviari e le linee di tensione.

2. OBIETTIVI DELLA RICERCA

L'obiettivo di questa ricerca è quello di analizzare gli impatti del traffico ferroviario sull'ambiente circostante, analizzando le formazioni lineari presenti lungo le linee ferroviarie.

- I. Analisi della struttura e composizione delle formazioni lineari lungo le ferrovie
 - a. Composizione floristica
 - b. Ricchezza e varietà della necromassa legnosa
- II. Analisi delle concentrazioni dei metalli pesanti nel suolo adiacente alle linee ferroviarie
- III. Analisi delle potenzialità fitorimedianti della robinia nei contesti ferroviari

3. MATERIALI E METODI

3.1. Area di studio

Le aree oggetto di studio sono localizzate sul territorio regionale veneto lungo la rete ferroviaria della regione che si estende per 1188 km, come evidenziato dalla Figura 3.1.

Le linee ferroviarie nazionali italiane sono classificate in (RFI, 2023):

- linee fondamentali (collegano le principali città italiane, hanno un'elevata densità di traffico e sono costituite da infrastrutture più evolute);
- linee complementari (collegano tra loro le direttrici primarie all'interno delle regioni e risultano meno trafficate delle linee fondamentali);
- linee nodo (in prossimità delle grandi stazioni ferroviarie italiane).

A loro volta le linee ferroviarie vengono suddivise in base alla tipologia (linee a doppio binario e linee a semplice binario) e in base all'alimentazione (linee elettrificate o linee non elettrificate (diesel)) (RFI, 2023). Le linee ferroviarie lungo le quali sono state individuate le formazioni lineari oggetto di studio sono:

- Linea Padova - Pontelagoscuro: linea fondamentale elettrificata a doppio binario, inaugurata nel 1866, interamente a doppio binario elettrificato dal 2006 (Wikipedia, 2023c);
- Linea Treviso - Pordenone: linea fondamentale elettrificata a doppio binario, inaugurata nel 1855, elettrificata dal 1960 (Wikipedia, 2023d);
- Linea Padova - Castelfranco Veneto: linea complementare elettrificata a doppio binario, inaugurata nel 1877, la linea dal 2020 è interamente a circolazione elettrica (Wikipedia, 2023b);
- Linea Monselice - Montagnana: linea complementare elettrificata a singolo binario, inaugurata nel 1885, elettrificata dal 1997 (Wikipedia, 2023a).

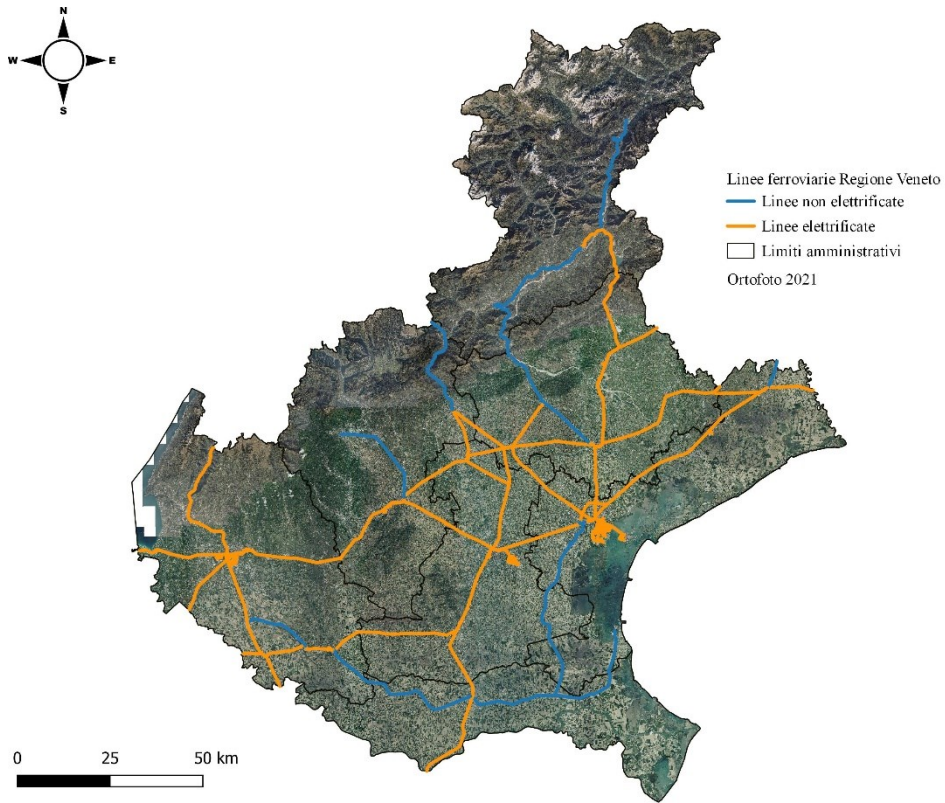


Figura 3.1: la rete ferroviaria regionale veneta



Figura 3.2: area di saggio lungo la tratta ferroviaria Padova - Pontelagoscuro (linea complementare elettrificata a doppio binario). ¹ Fotografia di FGS

3.2. Metodo di campionamento delle aree di saggio

Per l'individuazione delle aree campione, necessarie per lo studio delle formazioni lineari lungo le linee ferroviarie, sono state individuate le aree con formazioni lineari che si estendono lungo la ferrovia per almeno 50 m. Al fine della scelta delle aree di saggio sono state scartate le formazioni lineari in prossimità di fonti di inquinamento puntuali, come strade altamente trafficate, industrie o discariche. Inoltre, risulta di fondamentale importanza, la contiguità tra le linee ferroviarie e la fascia boscata, senza elementi di separazione, come scoline o pavimentazioni, e una topografia che non ostacoli la diffusione degli inquinanti.

L'individuazione delle aree è avvenuta in due fasi:

- individuazione delle possibili aree campione attraverso l'uso del software QGIS® utilizzando come base cartografica Google Satellite e l'ortofoto del 2021 della regione Veneto scaricata dal Geoportale della Regione del Veneto;
- sopralluogo in campo per valutare l'effettiva presenza delle formazioni lineari nelle possibili aree individuate, della loro accessibilità e della loro conformità al criterio di selezione.

Sono state individuate 42 aree di studio, la Figura 3.3 mostra la loro localizzazione lungo le linee ferroviarie del Veneto e la Figura 3.4 mostra un esempio di area campione.

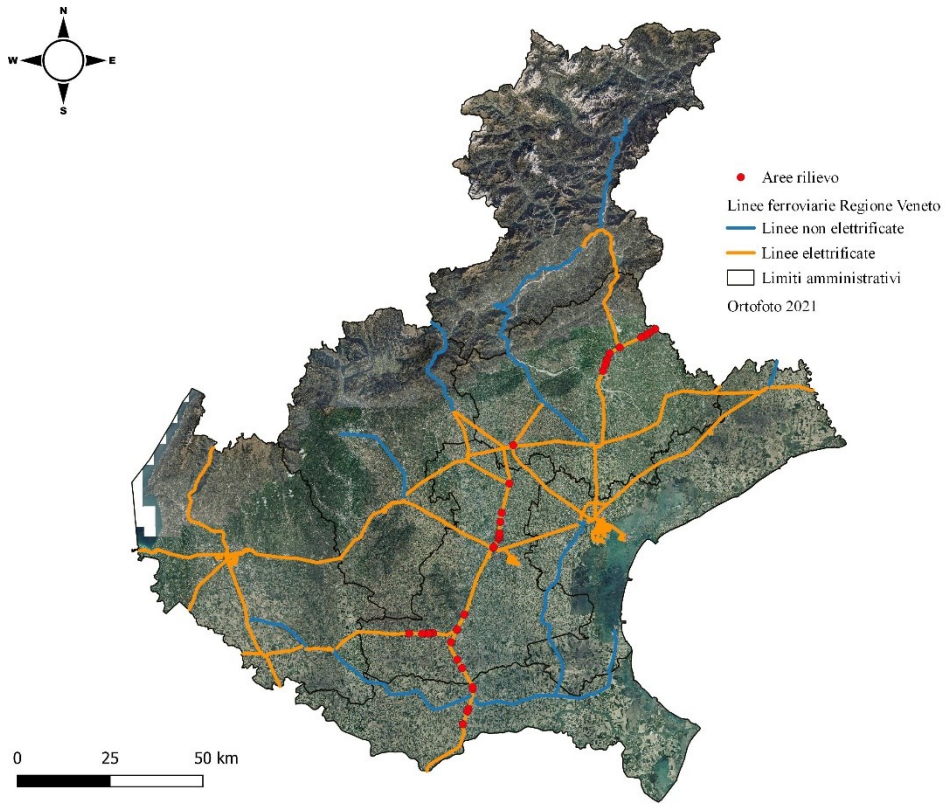


Figura 3.3: localizzazione delle aree di studio



Figura 3.4: esempio di area campione

3.3. Protocollo dei rilievi in campo per la raccolta dati

3.3.1. Campionamenti preliminari del suolo

- Campionamenti del suolo.

I rilievi preliminari sui campioni di suolo sono stati eseguiti nel mese di giugno 2023. È stata necessaria un'analisi preliminare per verificare la distribuzione di contaminati legati all'attività ferroviaria lungo le linee ferroviarie e le aree contermini.

Sono stati selezionati due siti:

- Nel comune di Monselice (PD) lungo la linea Padova – Pontelagoscuro → Ex vivaio abbandonato da circa dieci anni di specie arboree allevate in pieno campo, con fitto sottobosco caratterizzato da specie arbustive tipiche dei boschi dell'areale a testimonianza dell'abbandono della gestione dell'area e in particolare di arature negli ultimi anni. La fascia arborata a ridosso della linea ferroviaria è costituita da robinia spontanea. Nessun elemento di discontinuità (canali, rogge, strade poderali, ecc.) tra massicciata ferroviaria e terreno.
- Nel comune di Este (PD) lungo la linea Monselice – Montagnana → Impianto arboreo policiclico di arboricoltura da legno di circa vent'anni. La fascia arborata a ridosso della linea ferroviaria è costituita da robinia spontanea. L'impianto è gestito unicamente con periodici sfalci. Nessun elemento di discontinuità (canali, rogge, strade poderali, ecc.) tra massicciata ferroviaria e terreno.

Sono stati effettuati nel complesso due transetti trasversali all'asse della linea ferroviaria per sito, lungo i quali sono stati raccolti campioni di suolo a diverse distanze dall'infrastruttura così da valutare la sua influenza sull'intorno. Sono stati pertanto prelevati un bulk di tre sottocampioni a due profondità (0-10 cm e 10-20 cm, considerato come 0 cm l'orizzonte dopo aver rimosso la lettiera), a distanza progressivamente maggiore dal sedime delle rotaie (a 3, 8, 13, 18, 25 e 40 metri).



Figura 3.5: transetto trasversale alla linea ferroviaria e scavi per prelievo di suolo a varie distanze dalla linea ferroviaria. ¹ Fotografie di FGS

3.3.2. Parametri e informazioni generali

- Individuazione dell'area di saggio e sua delimitazione;
- misura dell'esposizione della scarpata ferroviaria;
- profilo planimetrico della scarpata ferroviaria;
- giacitura, accidentalità, raggiungibilità dell'area ed elementi d'interazione.

I rilievi sono stati eseguiti nel 2023 nel mese di luglio. Le aree definite in cartografia e verificate in campo sono state raggiunte tramite l'utilizzo di un GPS inserendo le coordinate. È stata scelta un'area di saggio rettangolare con il lato parallelo alla linea ferroviaria di 10 m e il lato perpendicolare alla linea ferroviaria delle dimensioni della fascia arborata (profondità al piede e alla proiezione delle chiome). L'area è stata delimitata tramite l'utilizzo della cordella metrica e mettendo un nastro rosso biodegradabile ai quattro vertici per delimitare l'area. La misurazione delle pendenze e dell'esposizione della scarpata ferroviaria è stata effettuata tramite un ipsometro di Suunto (Suunto tandem). Il profilo della scarpata è stato ricavato dalla misurazione delle distanze e delle pendenze dal bordo della linea ferroviaria sino alla fine della proiezione della chioma. La giacitura, l'accidentalità, la raggiungibilità dell'area di studio e gli elementi d'interazione sono stati definiti in campo in base alle condizioni riscontrate.

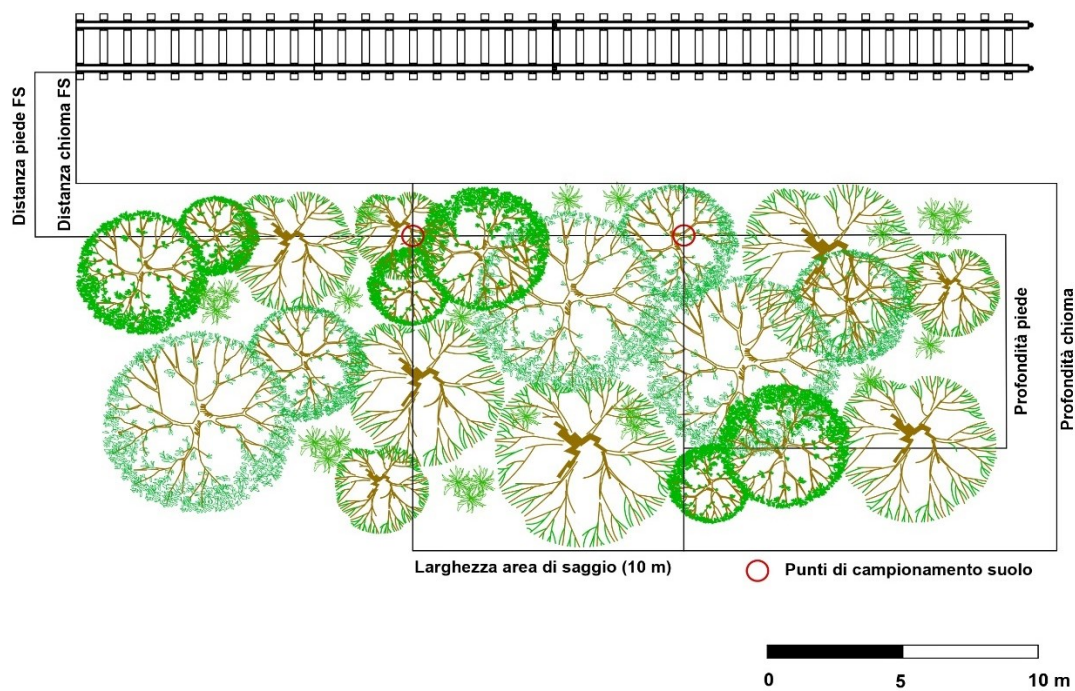


Figura 3.6: planimetria esemplificativa area di saggio



Figura 3.7: delimitazione area di saggio. ¹ Fotografie di FGS

3.3.3. Classificazione delle formazioni lineari

- Struttura, origine e tipo di popolamento;
- copertura arborea, arbustiva ed erbacea;
- classi di distanza e profondità della fascia arborata.

Le formazioni lineari presenti all'interno delle aree di saggio sono state classificate in base alla loro struttura (monoplana bassa, monoplana, biplana o multiplana), alla loro origine (spontanea, mista o artificiale) e in base al tipo di popolamento presente (robinieto

puro o robinieto misto). La distinzione in base all'origine delle formazioni lineari analizzate, si è basata sulla presenza o meno di un sesto d'impianto regolare e sulla base delle specie rinvenute all'interno dell'area di saggio. È stata assegnata la percentuale di copertura distintamente per i tre strati vegetazionali: strato arboreo (sopra i cinque metri di altezza), strato arbustivo (tra uno e cinque metri di altezza) e strato erbaceo (sotto un metro di altezza). Per quanto riguarda le distanze dalla linea ferroviaria è stata rilevata la distanza della proiezione della chioma dalla linea ferroviaria e la distanza del piede dell'ultima pianta della fascia dalla linea ferroviaria. Mentre, per la profondità della fascia arborata è stata rilevata la profondità da piede a piede e la profondità della proiezione della chioma.



Figura 3.8: formazione lineare area di saggio ID 17. ¹ Fotografia di FGS

3.3.4. Composizione della flora vascolare

- Rilievo floristico;
- copertura delle specie rilevate all'interno dei tre strati vegetazionali.

Sono stati analizzati separatamente i tre strati vegetazionali (arboreo, arbustivo ed erbaceo). Il riconoscimento floristico è stato eseguito in campo tramite chiavi dicotomiche e manuali di riconoscimento online, le specie che non sono state riconosciute

in campo sono state fotografate e successivamente riconosciute per mezzo di manuali di riconoscimento o da parte degli esperti consultati. Una volta effettuato il riconoscimento della specie veniva assegnato l'indice di copertura di Braun-Blanquet (Tab. 3.1) a tutte le specie rilevate all'interno dell'area di saggio.

Copertura (%)	Indice di Braun-Blanquet
1 unico individuo	r
Massimo 3 individui	+
1-5	1
5-25	2
25-50	3
50-75	4
>75	5

Tabella 3.1: indici di copertura di Braun-Blanquet



Figura 3.9: strati vegetazionali (erbaceo, arbustivo e arboreo) della formazione lineare ID 16. ¹ Fotografia di FGS

3.3.5. Parametri dendrometrici

- Cavallettamento (degli individui con un diametro maggiore o uguale a 5 cm);
- misura delle altezze degli individui cavallettati.

Al fine di analizzare la struttura, il volume e la densità del soprassuolo sono stati misurati diametro e altezza di tutti gli esemplari con un diametro maggiore o uguale a 5 centimetri. Per la misura del diametro a petto d'uomo (1,3 metri di altezza dal suolo) è stato utilizzato il ceduometro o la cordella diametrica, mentre per l'altezza è stato utilizzato il telemetro ipsometro laser TruPulse 200.



Figura 3.10: esemplari arborei cavallettati. ¹ Fotografia di FGS

3.3.6. Necromassa legnosa

- Misura delle dimensioni della necromassa legnosa;
- assegnazione della classe di decomposizione della necromassa rinvenuta.

Per analizzare la necromassa presente, le piante morte sono state classificate in:

- pianta morte in piedi o a terra;
- pianta intera o stroncata.

Sono stati misurati diametro e lunghezza della necromassa rinvenuta avente diametro maggiore o uguale a 5 centimetri e lunghezza maggiore o uguale a 1 metro. Per la misura del diametro è stato utilizzato il ceduometro, la misurazione è stata effettuata a petto d'uomo (1,3 metri di altezza dal suolo) per le piante morte in piedi, mentre per le piante a terra è stato preso il diametro medio. La lunghezza è stata calcolata con il telemetro ipsometro laser TruPulse 200 per le piante morte in piedi e con la cordella metrica per le piante schiantate o stroncate a terra. Infine, per ciascun elemento è stato assegnato un

indice dello stato di degradazione e decomposizione con un sistema di cinque classi (Tab. 3.2), dove i valori bassi indicano legno ancora integro, mentre valori alti indicano legno quasi completamente decomposto.

Classi	Descrizione
1	Corteccia integra, maggior parte delle branche integre, legno duro
2	Tracce di corteccia, poche branche residue, legno duro
3	Senza corteccia, senza rami, legno duro
4	Senza corteccia, senza rami, legno parzialmente morbido (<70% dell'alburno morbido)
5	Senza corteccia, senza rami, legno tendenzialmente morbido (>70% dell'alburno morbido)

Tabella 3.2: classi di degradazione e decomposizione della necromassa legnosa (riadattate da Motta et al., 2006)

3.3.7. Campionamento del suolo

- Campionamenti del suolo.

Per quanto riguarda i campionamenti del suolo effettuati in tutte le 42 aree di saggio, sono stati effettuati due campionamenti in ogni area, uno al margine destro e uno al margine sinistro dell'area di saggio entrambi alla stessa distanza dalla linea ferroviaria, alla distanza del piede, ovvero il punto più prossimo di radicazione verso la ferrovia (vedasi schema di campionamento di Figura 3.6). Ogni campionamento è stato effettuato prelevando un bulk di tre sottocampioni, presi in punti vicini a una profondità di 0-10 cm, dopo aver rimosso accuratamente la lettiera presente. Laddove non fosse possibile il prelievo del campione al margine estremo dell'area (per presenza di rocce, alberi o altri ostacoli) il campione è stato preso alla stessa distanza dalla linea ferroviaria, muovendosi in direzione dell'area di saggio. È stata quindi rilevata con la cordella metrica la distanza dal margine sinistro dei due campionamenti.

3.4. Analisi di laboratorio

3.4.1. Analisi del suolo

I campioni del suolo, una volta raccolti, sono stati fatti essiccare all'aria a temperatura ambiente (necessariamente inferiore ai 40°C per evitare la volatilizzazione di alcuni dei composti oggetto di analisi), pestellati e setacciati con maglia da 2 mm. Si è ottenuta così una frazione fine dalla quale sono stati estratti 50 ml per ogni campione. Le analisi per l'individuazione e quantificazione dei metalli pesanti sono state svolte presso i laboratori CNR/IRET (Consiglio Nazionale delle Ricerche) di Pisa. Per ciascun campione sono stati prelevati 0,30 g di suolo, digeriti a microonde (ETHOS 900, FKV, Torre Boldone, BG, Italia) tramite miscelazione di acido nitrico e perossido di idrogeno ($\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2$ - 5:2 v/v) seguendo il protocollo EPA 3051. Sono state quindi misurate le concentrazioni di As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V, Zn, Hg, Sb, Sn, Al, Ti con la spettrometria di massa a plasma accoppiato induttivamente (ICP-OES 5900 Agilent, Santa Clara, CA, USA) espressa in mg/kg (peso secco).

Per quanto riguarda i campionamenti preliminari del suolo sono state misurate le concentrazioni di As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V, Zn, Hg, Sb, Sn, Al, Ti di un solo transetto lineare per area del campione prelevato a una profondità di 0-10 cm.

Per i campionamenti del suolo delle aree di saggio nel primo lotto di analisi (costituito di un campione di suolo per ciascuna area) sono state misurate le concentrazioni di As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V, Zn, Hg, Sb, Sn. Successivamente, vedendo che per alcuni metalli secondo i risultati ottenuti delle analisi sul primo lotto avevano riportato valori sotto la soglia di lettura dello strumento o concentrazioni molto basse in tutti i campioni, per il secondo lotto (costituito dal secondo campione di suolo per ciascuna area) sono state misurate solamente le concentrazioni di Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Sn.



Figura 3.11: preparazione dei campioni di suolo (pestellamento e setacciatura). ¹ Fotografia di FGS

3.5. Analisi dei dati

Le specie rinvenute nelle aree di saggio sono state classificate quali specie native (Bartolucci et al., 2018) ed esotiche (Galasso et al., 2018). Sono state individuate anche le specie nitrofile secondo il valore di bioindicazione di ElleMBERG (Pignatti, 2005, Domina et al., 2018) riguardante i nutrienti, considerando nitrofile le specie con un valore compreso tra 7 e 9 (Allegato 1).

Per ogni area di saggio è stato calcolato il volume di ogni pianta cavallettata attraverso le formule di Tabacchi et al. (2011) per la cubatura delle piante in piedi, al fine di ottenere il volume per specie e totale di ogni area di saggio. Il calcolo del volume è stato effettuato anche per la necromassa legnosa.

I profili delle scarpate ferroviarie delle 42 aree di saggio, con i dati delle distanze e delle pendenze dalla linea ferroviaria, sono stati riportati e disegnati attraverso il software AutoCAD® (Allegato 2).

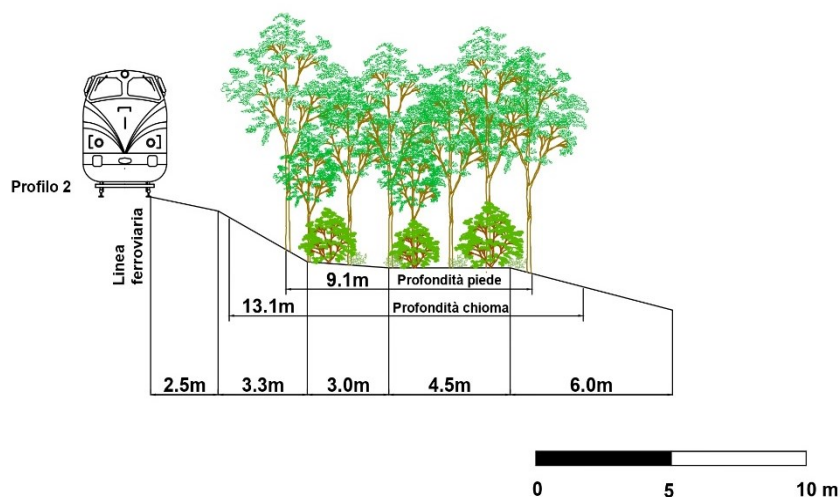


Figura 3.12: profilo scarpata ferroviaria area di saggio n. 2

Le aree di saggio sono state classificate in base alla distanza dalle aree di frenata, come stazioni e cambi di binario, al fine di indagare se in queste aree ci sia una maggior presenza di metalli pesanti derivante dall'abrasione dei freni con le ruote. Sono state classificate in tre classi di distanza:

- 1: minima (inferiore a 0,8 km di distanza);
- 2: media (compresa tra 0,8 km e 2 km di distanza);
- 3: massima (superiore a 2 km di distanza).

Inoltre, ogni area di saggio è stata classificata in base alla litologia del terreno presente, attraverso la carta litologica della regione Veneto scaricata dal Geoportale della Regione del Veneto.

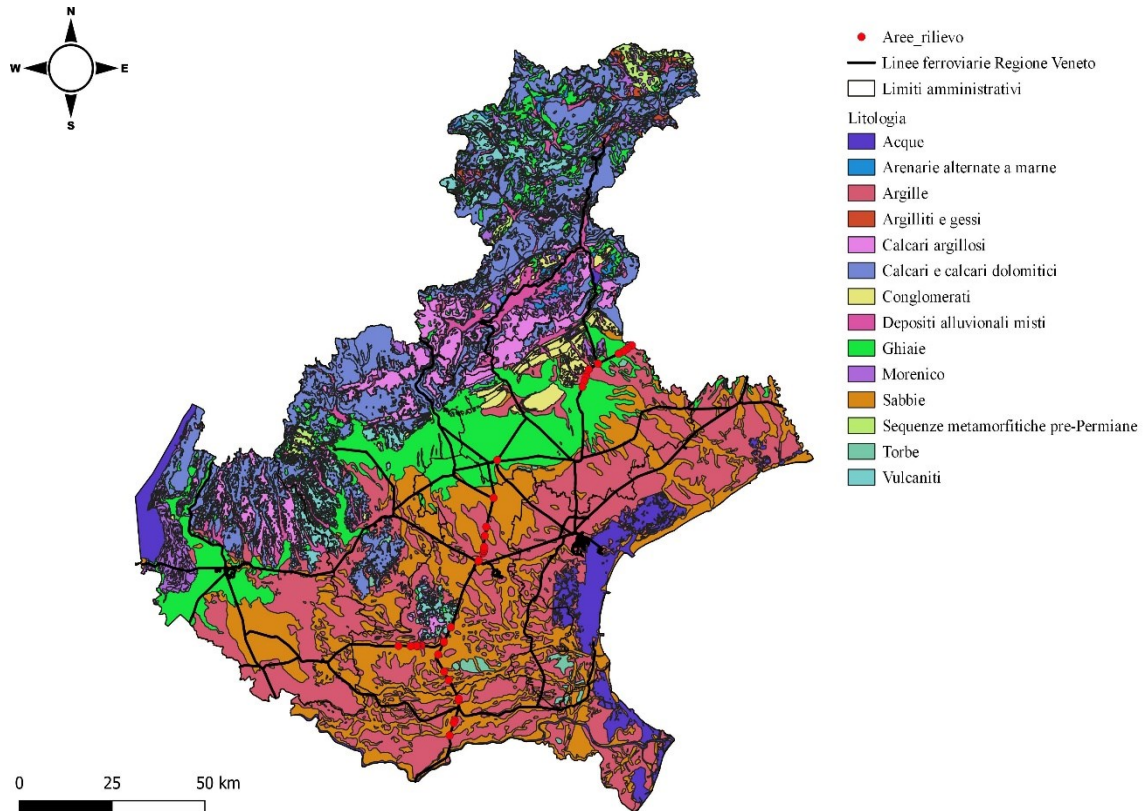


Figura 3.13: carta litologica della regione Veneto

Per quanto riguarda le concentrazioni soglia del livello di contaminazione del suolo da metalli pesanti, sono stati utilizzati i valori indicati dal D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 “Norme in materia ambientale” che vengono riportati nella Tabella 3.3.

Composti inorganici	Siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale (mg/kg espressi come s.s.)	Siti ad uso commerciale e industriale (mg/kg espressi come s.s.)
Antimonio	10	30
Arsenico	20	50
Berillio	2	10
Cadmio	2	15
Cobalto	20	250
Cromo totale	150	800
Cromo VI	2	15
Mercurio	1	5
Nichel	120	500
Piombo	100	1000
Rame	120	600
Selenio	3	15
Stagno	1	350
Tallio	1	10
Vanadio	90	250
Zinco	150	1500

Tabella 3.3: concentrazione soglia di contaminazione nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee in relazione alla specifica destinazione d'uso dei siti. Per le sostanze non esplicitamente indicate in Tabella i valori di concentrazione limite accettabili sono ricavati adottando quelli indicati per la sostanza tossicologicamente più affine (D.Lgs. n. 152/2006)

Le analisi statistiche sono state eseguite attraverso l'uso del software Excel e attraverso l'uso del software statistico R. I pacchetti di R utilizzati per le varie analisi sono: *vegan*, *ggplot2*, *psych* e *tr8*.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1. Campionamenti del suolo preliminari

I rilievi preliminari sui campioni di suolo hanno messo in evidenza la presenza di alcuni contaminanti lungo le linee ferroviarie analizzate. In particolare, sono state misurate le concentrazioni di As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V, Zn, Hg, Sb, Sn, Al, Ti. I dati ottenuti mostrano valori sotto la soglia di lettura della strumentazione utilizzata (ICP-OES 5900 Agilent, Santa Clara, CA, USA) per tutti i campioni preliminari di suolo delle concentrazioni di As, Cd, Sb e Sn. Nella Figura 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 si possono osservare le concentrazioni massime (mg/kg) dei contaminanti rinvenuti nei campioni di suolo prelevati a diverse distanze dalla linea ferroviaria (3, 8, 13, 18, 25 e 40 metri) nei due siti di studio preliminari. Come si può osservare la concentrazione dei contaminanti è maggiore alla distanza di 3 metri dalla linea ferroviaria rispetto alle altre distanze, questo sta ad indicare come una parte degli inquinanti analizzati provengano dal trasporto ferroviario e si depositino in prossimità della linea ferroviaria.

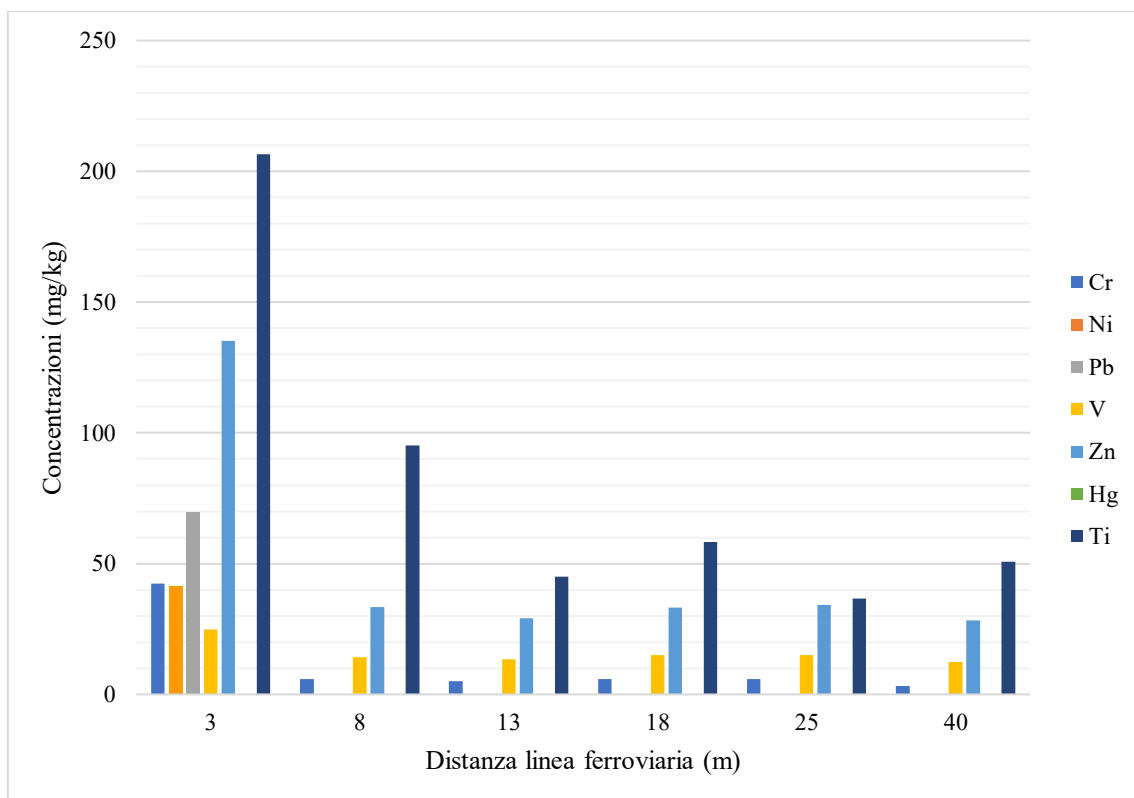


Figura 4.1: concentrazioni massime (mg/kg) dei contaminanti (Cr, Ni, Pb, V, Zn, Hg, Ti) a diverse distanze dalla linea ferroviaria (3, 8, 13, 18, 25 e 40 metri) rinvenute nell'area di saggio preliminare 1

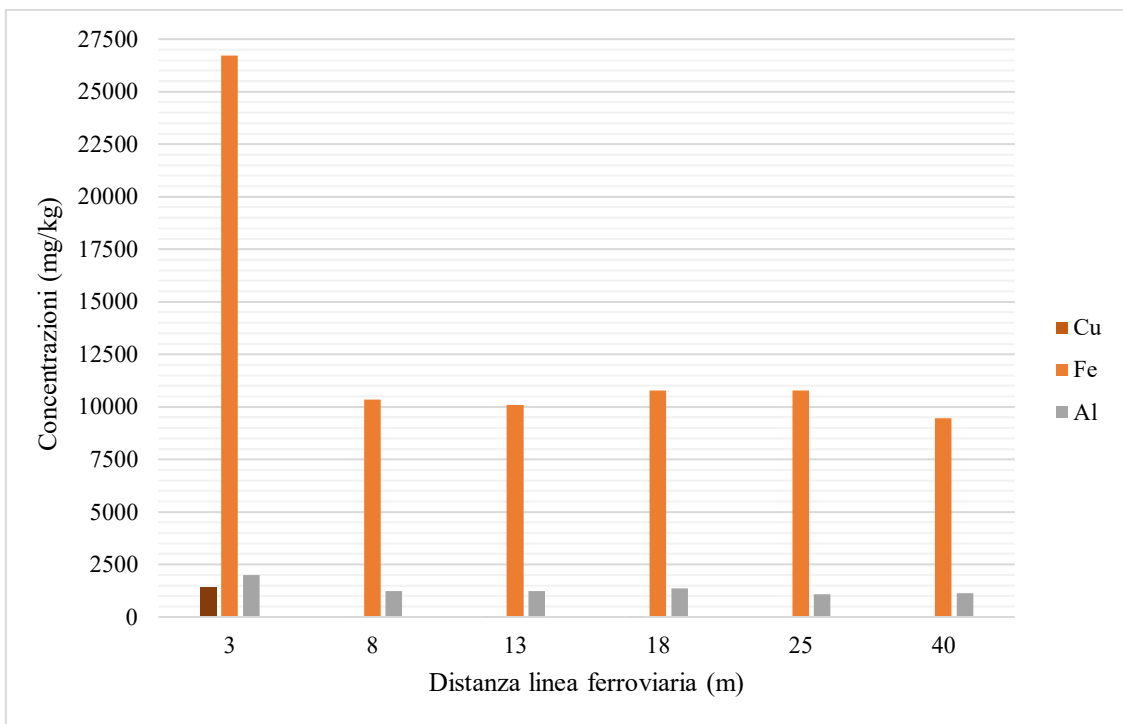


Figura 4.2: concentrazioni massime (mg/kg) dei contaminanti (Cu, Fe, Al) a diverse distanze dalla linea ferroviaria (3, 8, 13, 18, 25 e 40 metri) nell'area di saggio preliminare 1

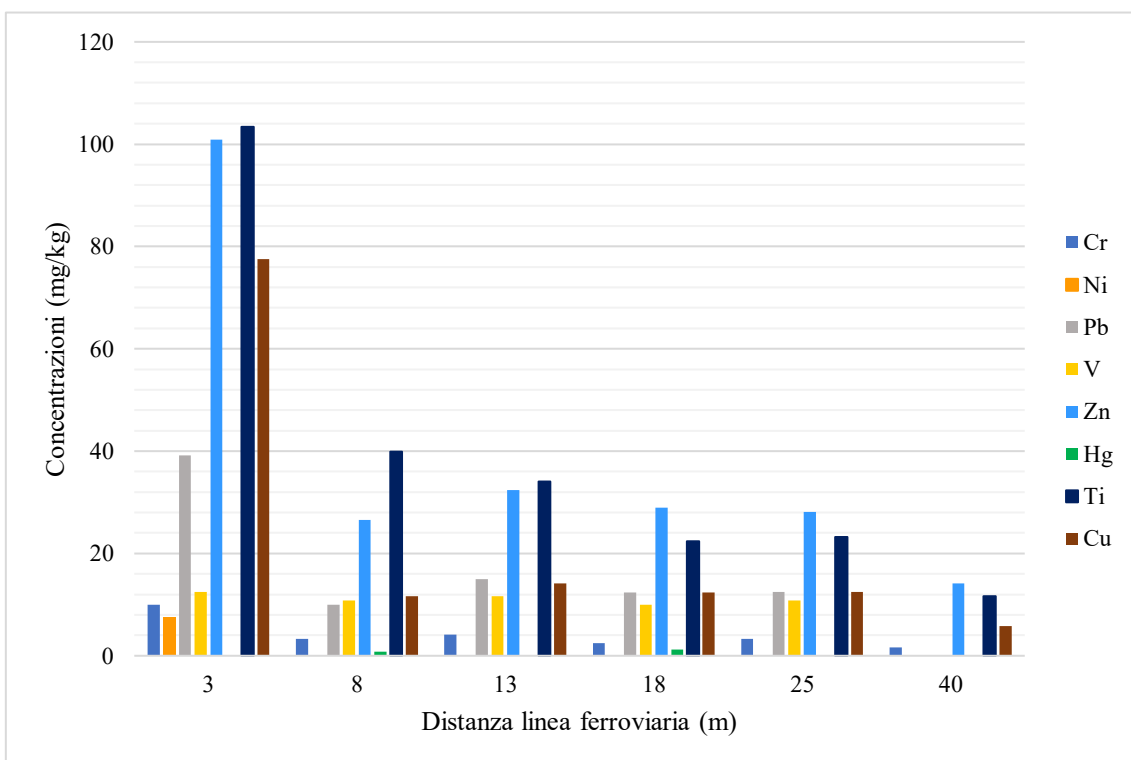


Figura 4.3: concentrazioni massime (mg/kg) dei contaminanti (Cr, Ni, Pb, V, Zn, Hg, Ti, Cu) a diverse distanze dalla linea ferroviaria (3, 8, 13, 18, 25 e 40 metri) rinvenute nell'area di saggio preliminare 2

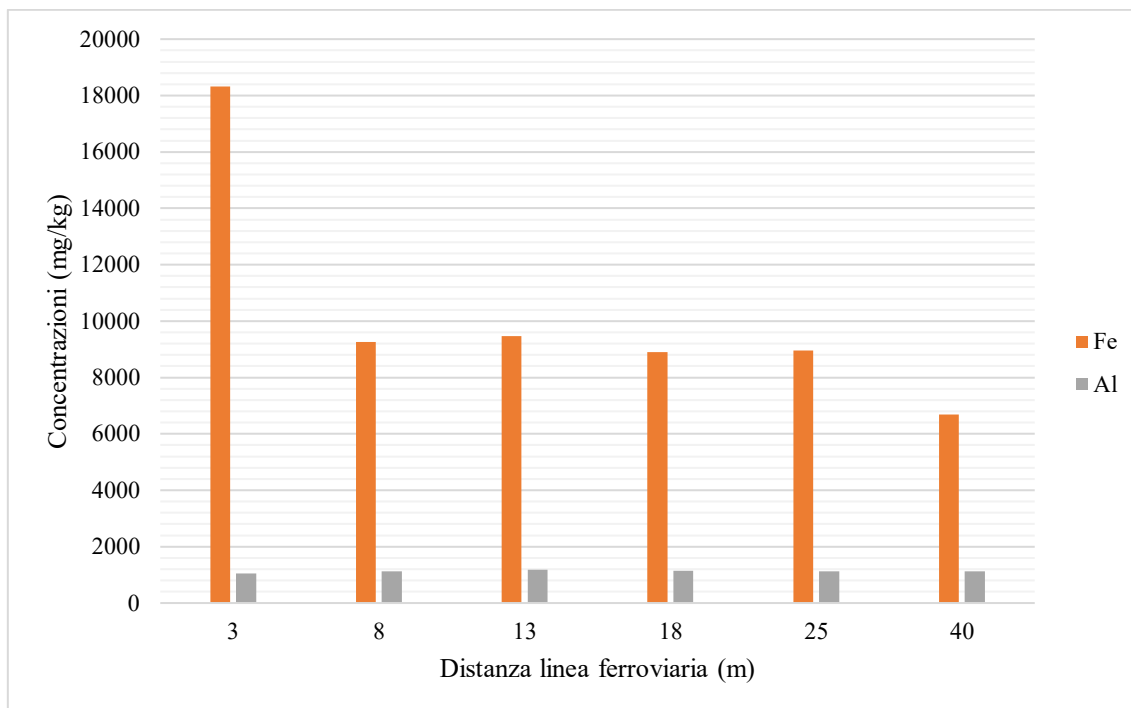


Figura 4.4: concentrazioni massime (mg/kg) dei contaminanti (Fe, Al) a diverse distanze dalla linea ferroviaria (3, 8, 13, 18, 25 e 40 metri) nell'area di saggio preliminare 2

La distribuzione dei contaminanti a varie distanze (3, 8, 13, 18, 25 e 40 metri) dalla linea ferroviaria tende a diminuire allontanandosi dalla ferrovia, questa tendenza è evidente in prossimità della linea ferroviaria alla distanza di 3 metri. Successivamente, i valori di concentrazione rimangono pressoché costanti alle varie distanze dalla linea ferroviaria. Solo due valori di concentrazione superano i limiti di legge per i siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale (D.Lgs. n. 152/2006) e corrispondono alla concentrazione di rame (Cu) rinvenuta alla distanza di 3 m dalla linea ferroviaria (Fig. 4.1) nella prima area di saggio preliminare, andando a confermare l'elevata quantità di rame in prossimità dei binari. Mentre il secondo valore sopra soglia è il mercurio (Hg), rinvenuto nella seconda area di saggio preliminare alla distanza dalla linea ferroviaria di 18 metri (Fig. 4.3). L'area di saggio preliminare n.2 si trova lungo la linea Monselice – Montagnana, una linea complementare a singolo binario elettrificato che risulta meno trafficata rispetto a quella dell'area di saggio n.1 sulla linea fondamentale elettrificata a doppio binario Padova – Pontelagoscuro. Per questo motivo, come è possibile osservare dai valori dei contaminanti (Fig. 4.3 e Fig. 4.4), si hanno concentrazioni dei metalli pesanti tendenzialmente più basse.

4.2. Caratteristiche generali delle formazioni lineari

Le aree di studio indagate sono inserite in un contesto a giacitura pianeggiante, una buona raggiungibilità e un terreno non accidentato. L'esposizione predominante delle scarpate ferroviarie è in direzione Sud-Ovest (160°), come si nota nella Figura 4.5.

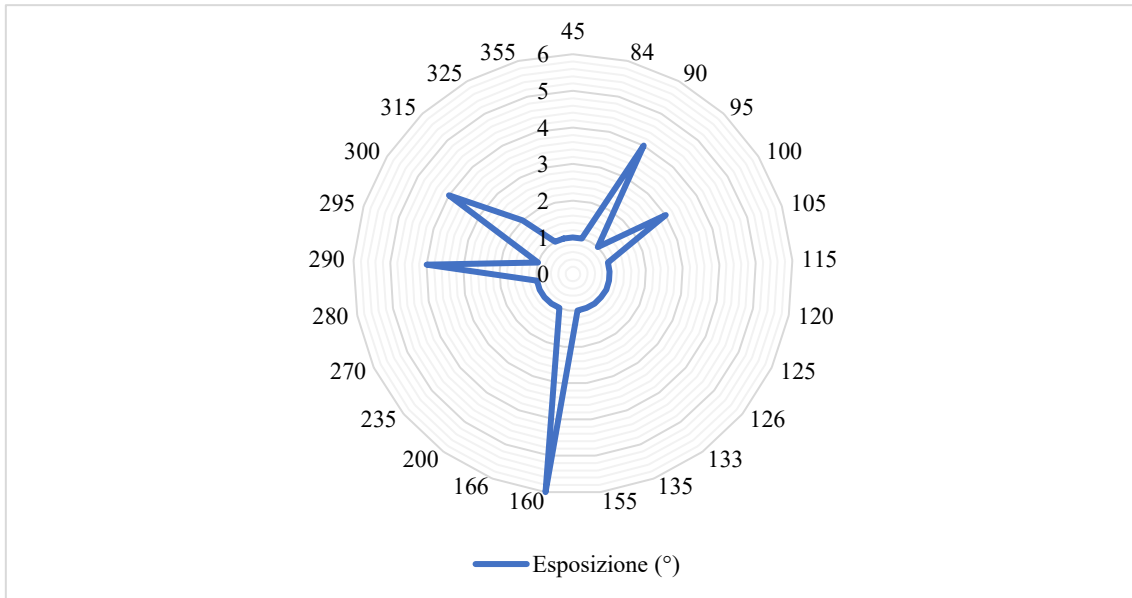


Figura 4.5: esposizione delle scarpate ferroviarie delle aree di studio

La litologia del terreno predominante delle aree di saggio è quella delle sabbie (18), seguita dalle argille (13), dalle ghiaie (9) e dalle torbe (2).

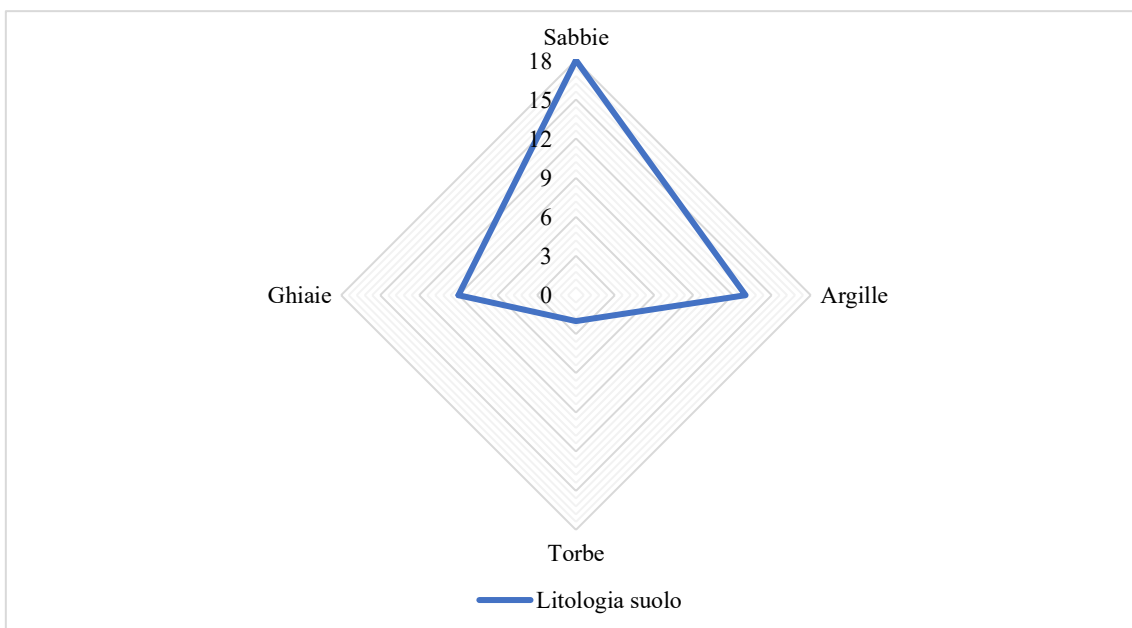


Figura 4.6: litologia suolo aree di saggio

Le formazioni lineari rinvenute nelle aree di saggio sono per lo più di origine spontanea (30) rispetto a quelle di origine mista (12) e appartengono al tipo forestale robinieto. Il numero maggiore di aree (24) è costituito da robinieto misto mentre il resto è un robinieto puro (18). La struttura delle formazioni lineari è principalmente monopiana (23), seguita da multiplana (9), monopiana bassa (8) e biplana (2).

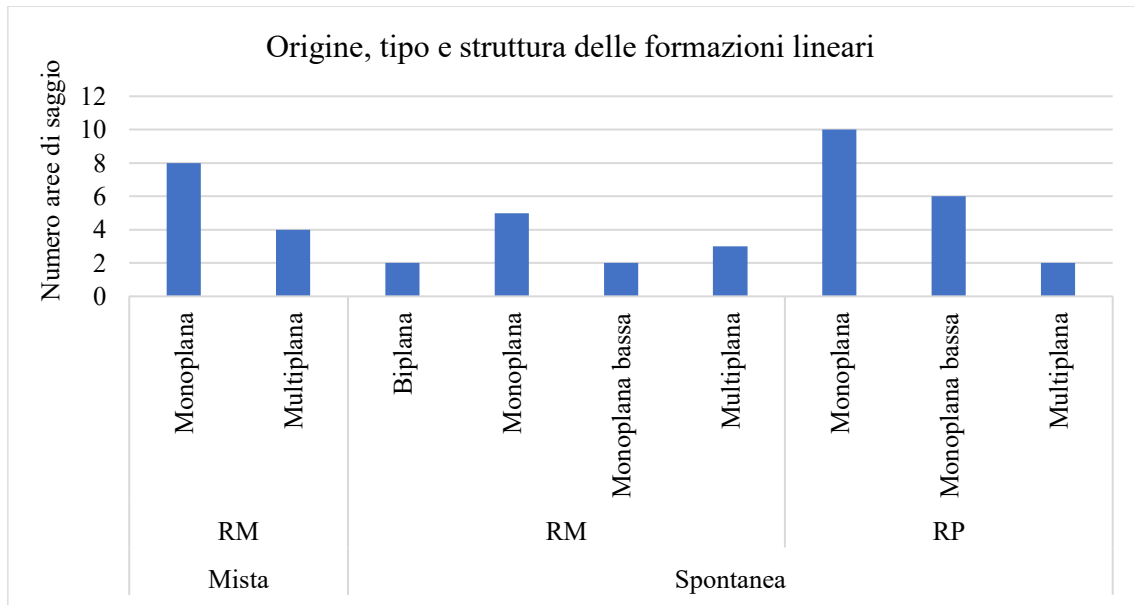


Figura 4.7: origine, tipo forestale e struttura delle formazioni lineari oggetto di studio

La relazione tra l'origine delle formazioni lineari analizzate e la profondità della chioma e del piede, mostra che nelle formazioni di origine mista la fascia arborea abbia più frequentemente dimensioni maggiori sia per quanto riguarda la profondità della chioma sia per la profondità del piede (Fig. 4.8). La relazione tra il tipo forestale delle formazioni lineari e la profondità della chioma mostra una mediana simile per i due tipi forestali analizzati con valori maggiori nelle formazioni di tipo misto (Fig. 4.9). Per quanto riguarda la relazione tra il tipo forestale delle formazioni lineari e la profondità del piede, risulta maggiore la mediana dei valori di robinieti puri, ma risulta avere valori puntuali maggiori le formazioni di robinieto misto (Fig. 4.9). Non si è verificata una correlazione tra l'origine e il tipo forestale con la profondità del piede e della chioma. Il campione risulta piuttosto omogeneo per quanto riguarda la varietà all'interno dell'origine e della tipologia forestale.

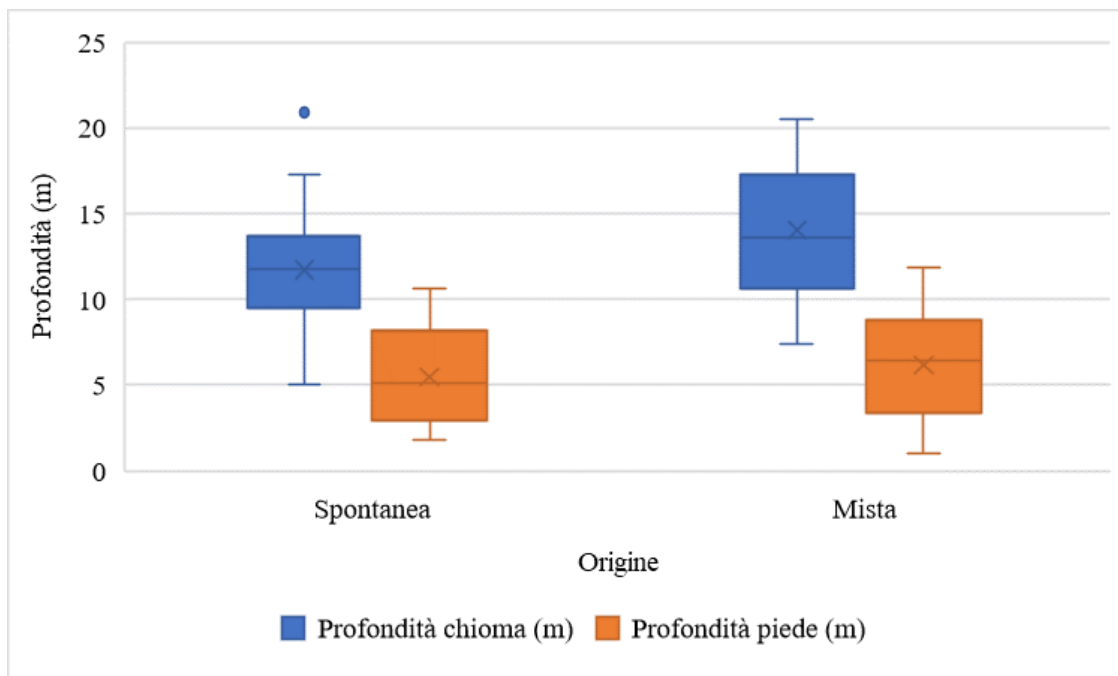


Figura 4.8: box-plot rappresentante la profondità della formazione lineare da chioma a chioma espressa in metri in relazione con l'origine delle formazioni lineari. (Gruppo 1, n=30; gruppo 2, n=12)

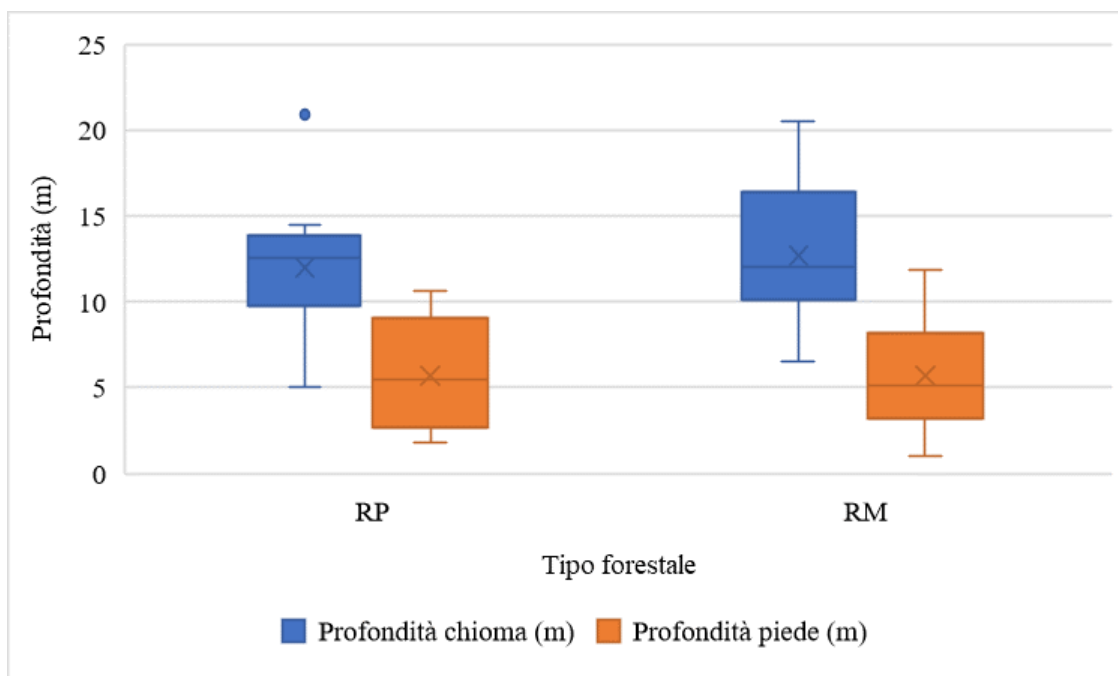


Figura 4.9: box-plot rappresentante la profondità del piede e della chioma espressa in metri in relazione con il tipo forestale delle formazioni lineari. (Gruppo 1, n=18; gruppo 2, n=24)

La Figura 4.10 mostra l'uso del suolo delle aree di saggio in relazione con la profondità della chioma e del piede delle formazioni lineari. La profondità della chioma e del piede delle formazioni lineari presenta dimensioni maggiori nelle aree con uso del suolo destinato a impianto di arboricoltura, mentre le formazioni lineari con una profondità minore sono state rinvenute in ex-cave e in vigneti. Nel complesso la profondità della fascia boscata risulta piuttosto omogenea al variare dell'uso del suolo in prossimità della linea ferroviaria.

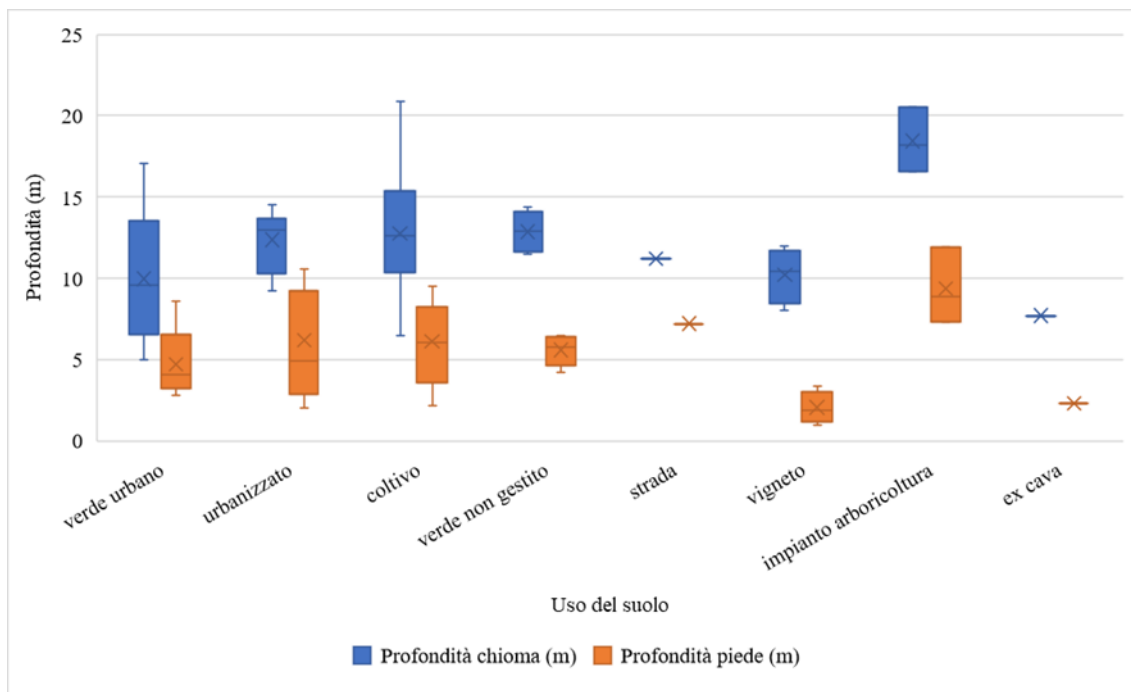


Figura 4.10: box-plot rappresentante la profondità del piede e della chioma espressa in metri in relazione con l'uso del suolo limitrofo. (Gruppo 1, n=5; gruppo 2, n=7; gruppo 3, n=16; gruppo 4, n=5; gruppo 5, n=1; gruppo 6, n=4; gruppo 7, n=3; gruppo 8, n=1;).

In ogni area di saggio è stata rilevata la copertura percentuale dei tre strati vegetazionali (arboreo, arbustivo ed erbaceo). La relazione tra la copertura degli strati vegetazionali e l'origine delle formazioni lineari mostra valori simili per quanto riguarda la copertura arborea, valori maggiori nella copertura arbustiva nelle formazioni di origine spontanea e un range di valori più ampio nella copertura erbacea per le formazioni di origine spontanea, mantenendo comunque rapporti analoghi tra i tre strati (Fig. 4.11).

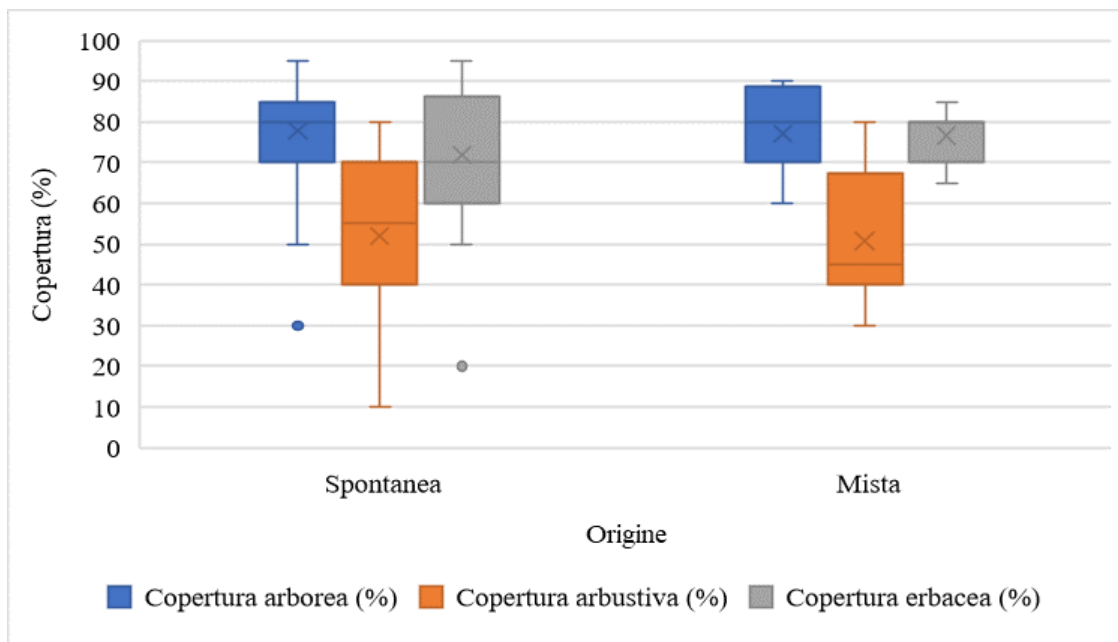


Figura 4.11: box-plot rappresentante la copertura dei tre strati vegetazionali (arboreo, arbustivo ed erbaceo) in relazione con l'origine delle formazioni lineari. (Gruppo 1, n=30; gruppo 2, n=12)

La relazione tra la copertura degli strati vegetazionali e il tipo forestale delle formazioni lineari mostra valori simili per quanto riguarda la copertura arborea, valori maggiori nella copertura arbustiva nel tipo forestale robiniето misto (Fig. 4.12).

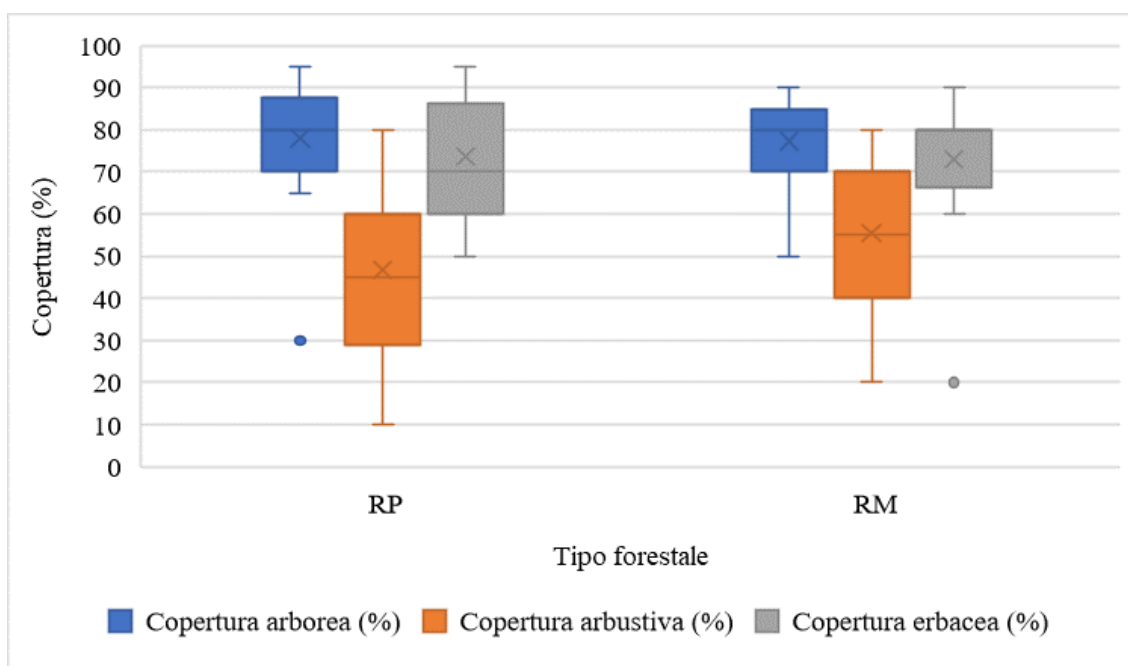


Figura 4.12: box-plot rappresentante la copertura dei tre strati vegetazionali (arboreo, arbustivo ed erbaceo) in relazione con il tipo forestale delle formazioni lineari. (Gruppo 1, n=18; gruppo 2, n=24)

La suddivisione delle 42 aree di saggio nelle classi di distanza dalle aree di frenata mostra che il 40,48% delle aree ricade a una distanza inferiore a 0,8 km (1: minima), il 26,19% delle aree ricade a una distanza compresa tra 0,8 km e 2 km (2: media) e il 33,33% delle aree ricade a una distanza superiore a 2 km (3: massima). La correlazione tra le classi di distanza dalle aree di frenata e le coperture arboree dei tre strati vegetazionali non ha evidenziato relazioni (Fig. 4.13), così come con la correlazione con la profondità del piede e della chioma della formazione lineari. Questo mostra come la struttura delle formazioni lineari non vari in base alla vicinanza o meno alle aree di frenata in prossimità delle stazioni (principali e secondarie) e nei punti di scambi dei binari.

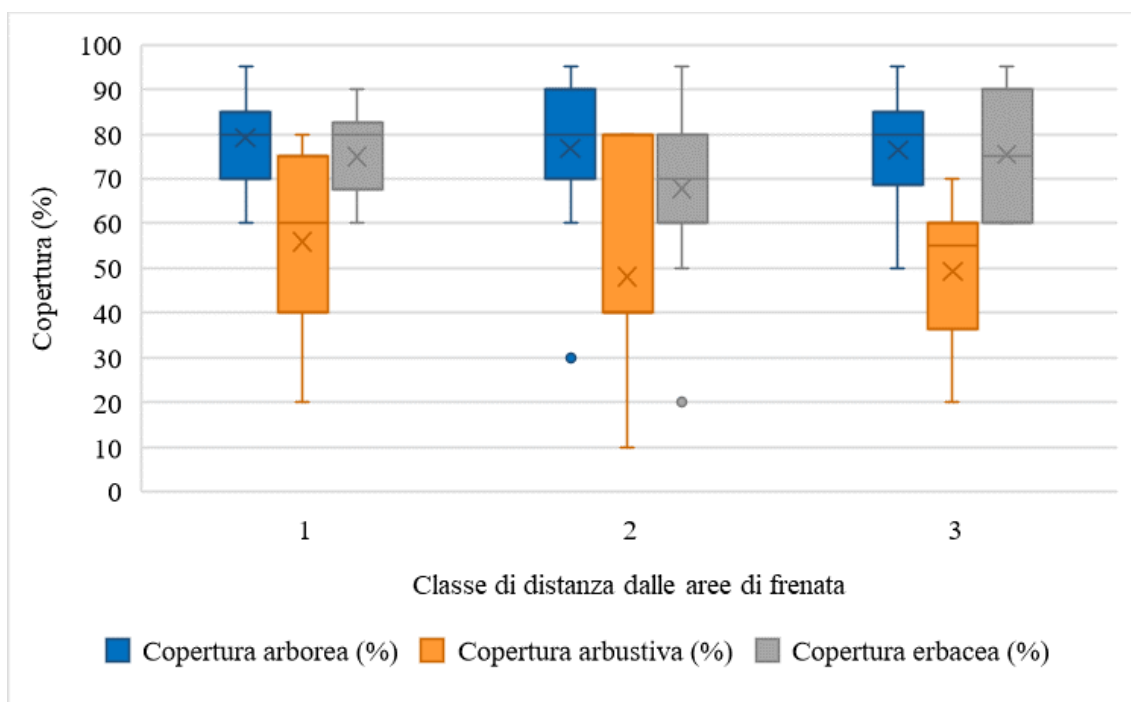


Figura 4.13: box-plot rappresentante la copertura dei tre strati vegetazionali (arboreo, arbustivo ed erbaceo) in relazione con la distanza dalle aree di frenata (1: minima, 2: media, 3: massima). (Gruppo 1, n=17; gruppo 2, n=11; gruppo 3, n=14)

4.3. Composizione flora vascolare

Nelle 42 aree di saggio sono state rinvenute 117 specie differenti, di queste, come si può osservare dalla Figura 4.14, il 32,48% sono specie esotiche. Le specie nitrofile rinvenute corrispondono al 27,35%, mentre le specie ad ampio spettro costituiscono il 9,40%.

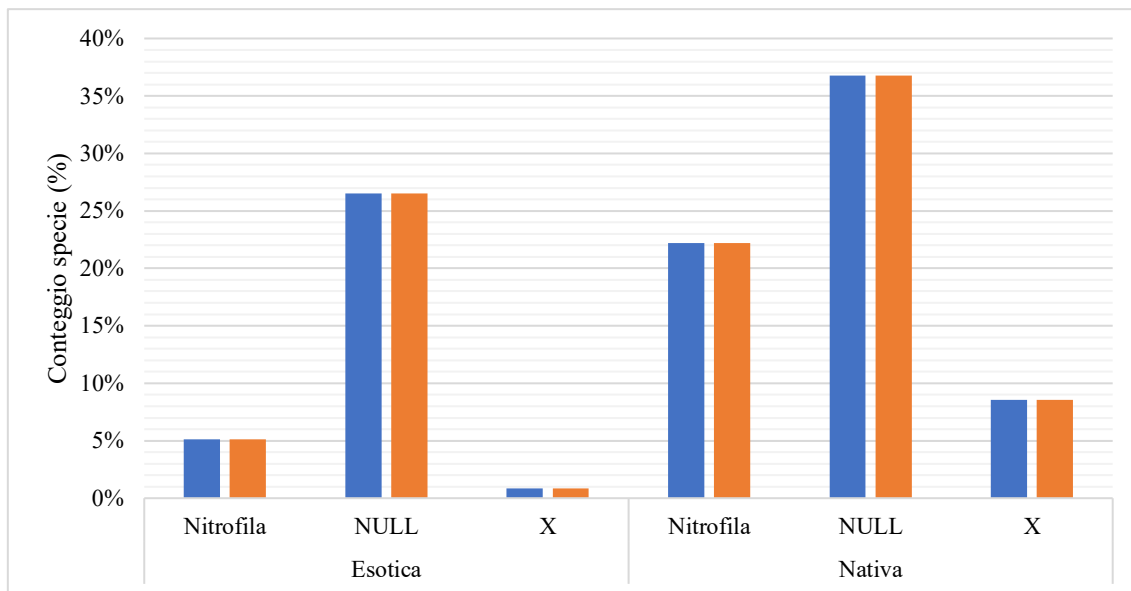


Figura 4.14: conteggio percentuale delle specie esotiche e native e della loro classificazione in specie nitrofile, non nitrofile (NULL) e in specie ad ampio spettro (X)

Come si può osservare dalla Figura 4.15, dove vengono rappresentati il numero di specie per i diversi strati vegetazionali, il numero maggiore di specie si presenta nello strato erbaceo con un valore medio di 14 specie per area di saggio, rispetto alle specie arbustive con un valore medio di 4 specie per area e alle arboree con un valore medio di 2 specie per area. La ricchezza di specie totali è strettamente legata alla ricchezza di specie erbacee in quanto costituisce lo strato vegetazionale più abbondante come numerosità di specie. La componente arborea è tendenzialmente monospecifica, costituita principalmente dalla specie esotica e nitrofila *Robinia pseudoacacia* L. in quanto facente parte del criterio di selezione delle aree di studio.

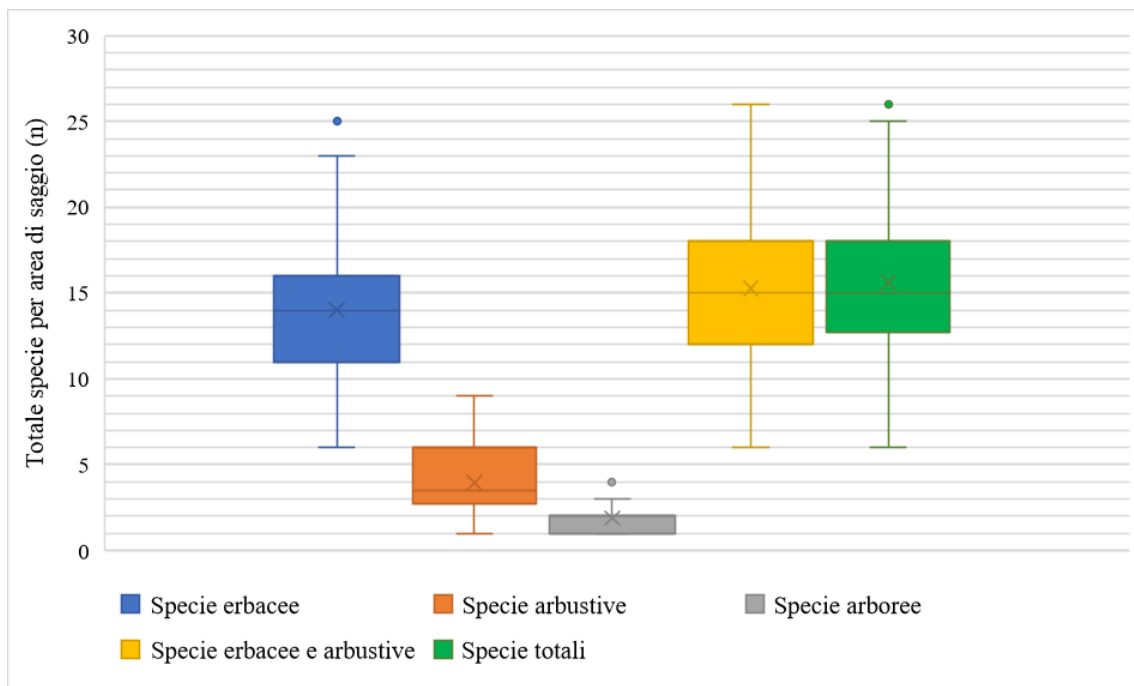


Figura 4.15: box-plot rappresentante il numero di specie dei tre strati vegetazionali (erbaceo, arbustivo ed arboreo) e il numero totale di specie. (Gruppo 1,2,3,4,5, n=42)

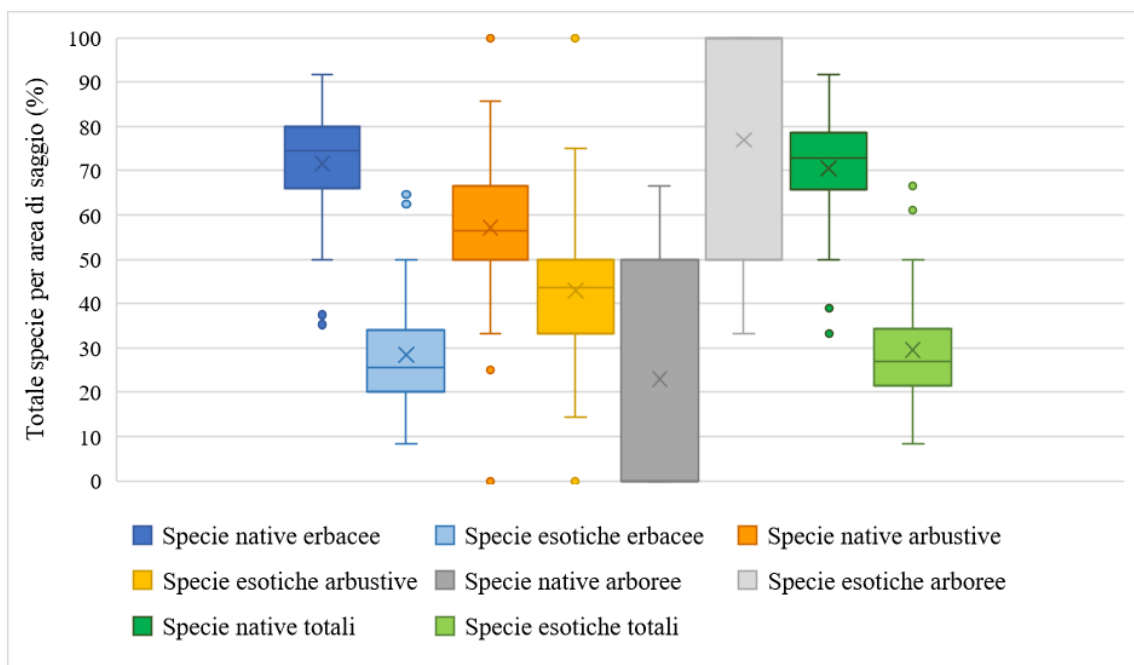


Figura 4.16: box-plot rappresentante la copertura percentuale di specie native ed esotiche dei tre strati vegetazionali (erbaceo, arbustivo ed arboreo) e del totale delle specie. (Gruppo 1,2,3,4,5,6,7,8, n=42)

Le specie rilevate sono state classificate quali native ed esotiche. La Figura 4.16 mostra la percentuale di specie esotiche e native presenti in ogni area di saggio per i tre strati vegetazionali e per le specie totali rinvenute. Le specie erbacee costituiscono lo strato più

ricco di specie e risulta costituito dal 26% di specie esotiche e dal 74% di specie native, lo strato arbustivo è composto dal 44% di specie esotiche e dal 56% di specie native, mentre lo stato arboreo risulta costituito prevalentemente da specie esotiche (77%) in quanto questo strato è dominato dalla specie arborea esotica *Robinia pseudoacacia* L.. Sono state individuate anche le specie nitrofile secondo il valore di bioindicazione di Ellemberg. La Figura 4.17 mostra la percentuale di specie nitrofile presenti in ogni area di saggio per i tre strati vegetazionali e per le specie totali rinvenute. Lo strato erbaceo è composto per il 33,33% di specie nitrofile, lo strato arbustivo dal 33% di specie nitrofile e lo strato arboreo dal 68% di specie nitrofile, in quanto la *Robinia pseudoacacia* L., specie dominante delle formazioni lineari analizzate è una specie nitrofila. Come si può osservare dalle due Figure appena analizzate (Fig. 4.16 e 4.17) la percentuale di specie totali risulta strettamente correlata con lo strato vegetazionale erbaceo in quanto costituisce la classe maggiore per ricchezza di specie, a differenza dello strato vegetazionale arboreo che è costituito in prevalenza da una sola specie dominante (*Robinia pseudoacacia* L.).

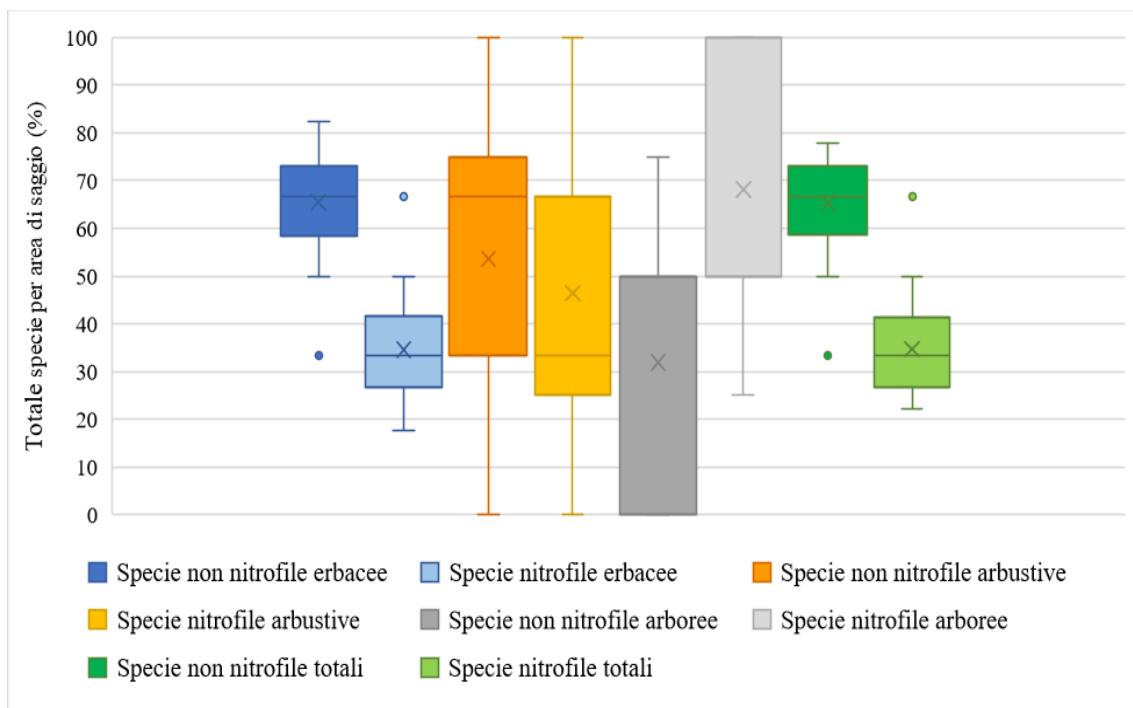


Figura 4.17: box-plot rappresentante la percentuale di specie nitrofile e non nitrofile dei tre strati vegetazionali (erbaceo, arbustivo ed arboreo) e del totale delle specie. (Gruppo 1,2,3,4,5,6,7,8, n=42)

4.4. Struttura delle formazioni arboree

Il volume di ogni area di saggio calcolato attraverso le formule di Tabacchi et al. (2011) è stato rapportato all'ettaro. La correlazione tra il volume a ettaro e le classi di distanza dalle aree di frenata non ha mostrato risultati significativi, così come la correlazione tra il volume a ettaro e la densità (numero di piante ad ha) e la correlazione tra il volume a ettaro e la superficie delle aree di saggio (m^2).

Come si può osservare dalla Figura 4.18, che mette in relazione il volume a ettaro delle aree di saggio con l'origine delle formazioni lineari, il volume risulta pressoché omogeneo in funzione dell'origine delle formazioni, con un volume medio più alto per le formazioni ad origine mista, mostrando come il campione risulti omogeneo in funzione dell'origine delle formazioni lineari analizzate.

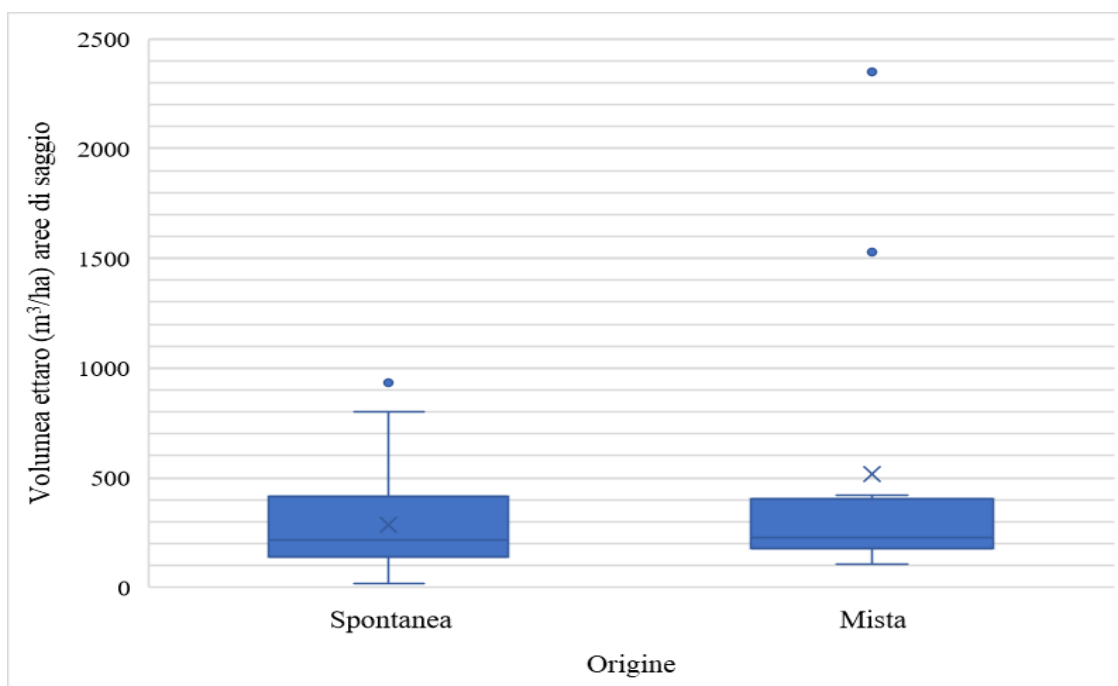


Figura 4.18: box-plot rappresentante il volume a ettaro delle formazioni lineari di ogni area di saggio in relazione con l'origine delle formazioni lineari. (Gruppo 1, n=30; gruppo 2, n=12)

La Figura 4.19 mostra la relazione tra il volume a ettaro e il tipo forestale della formazione lineare mostrando anche in questo caso un'omogeneità dei dati all'interno del tipo forestale. I due dati outlier corrispondono a una formazione lineare con uno strato arboreo dominato da esemplari di salice bianco (outlier maggiore) e a una formazione con

esemplari di *Acer campestre* L. e *Robinia pseudoacacia* L. con diametri elevati rispetto alle altre formazioni arboree (diametro medio 19 cm).

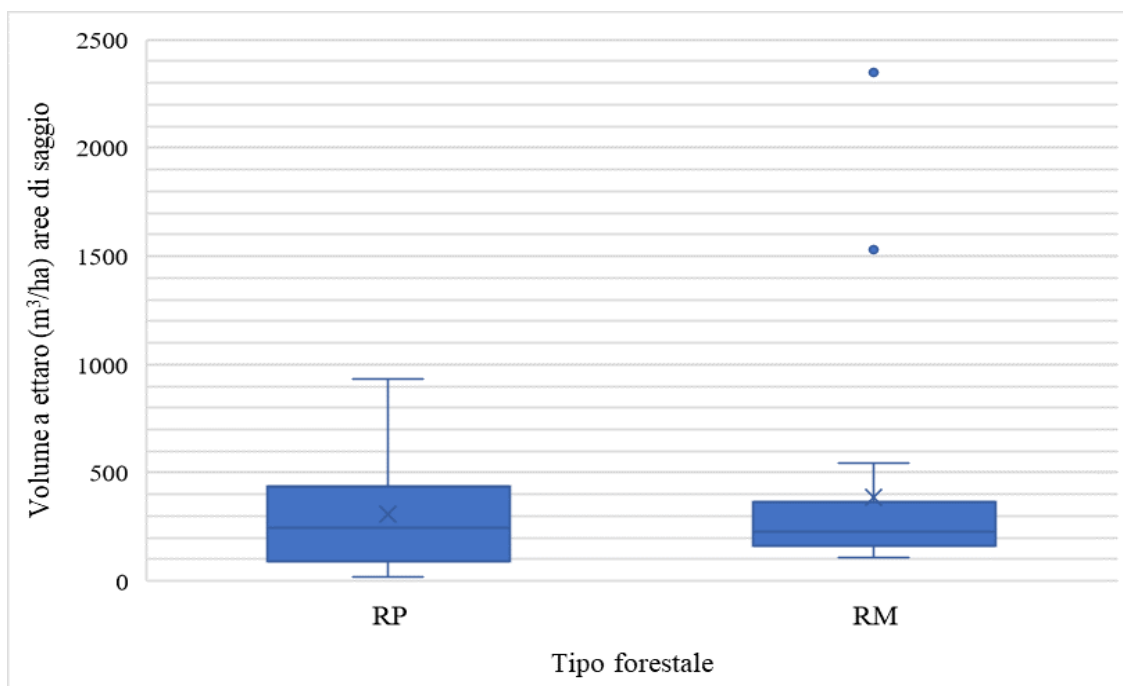


Figura 4.19: box-plot rappresentante il volume a ettaro delle formazioni lineari di ogni area di saggio in relazione con il tipo forestale delle formazioni lineari. (Gruppo 1, n=18; gruppo 2, n=24)

Lo strato vegetazionale arboreo è dominato dalla specie esotica e nitrofila *Robinia pseudoacacia* L., presente in tutte e 42 le aree di saggio. La Figura 4.20 mostra la distribuzione dei diametri e delle altezze delle piante cavallettate nelle 42 aree di saggio. Il diametro medio corrisponde a 11,31 cm, la mediana dei valori a 9 cm con un intervallo di valori compreso tra 5 cm e 51 cm. L'altezza media, equivalente alla mediana dei valori osservati, corrisponde a 10 m, con un intervallo di valori compreso tra 2 m e 22 m. La Figura 4.21 mostra la distribuzione dei volumi unitari delle piante cavallettate nelle 42 aree di saggio. Il volume medio unitario corrisponde a 0,03 m³, la mediana dei valori osservati a 0,07 m³, con un intervallo di valori compreso tra 0,013 m³ e 1,26 m³. Questi valori dendrometrici mettono in evidenza come i popolamenti analizzati risultino giovani, presumibilmente per la loro gestione periodica al fine di mantenere in sicurezza la rete ferroviaria, che potrebbe venire ostacolata da popolamenti maturi e quindi piante con valori dendrometrici maggiori.

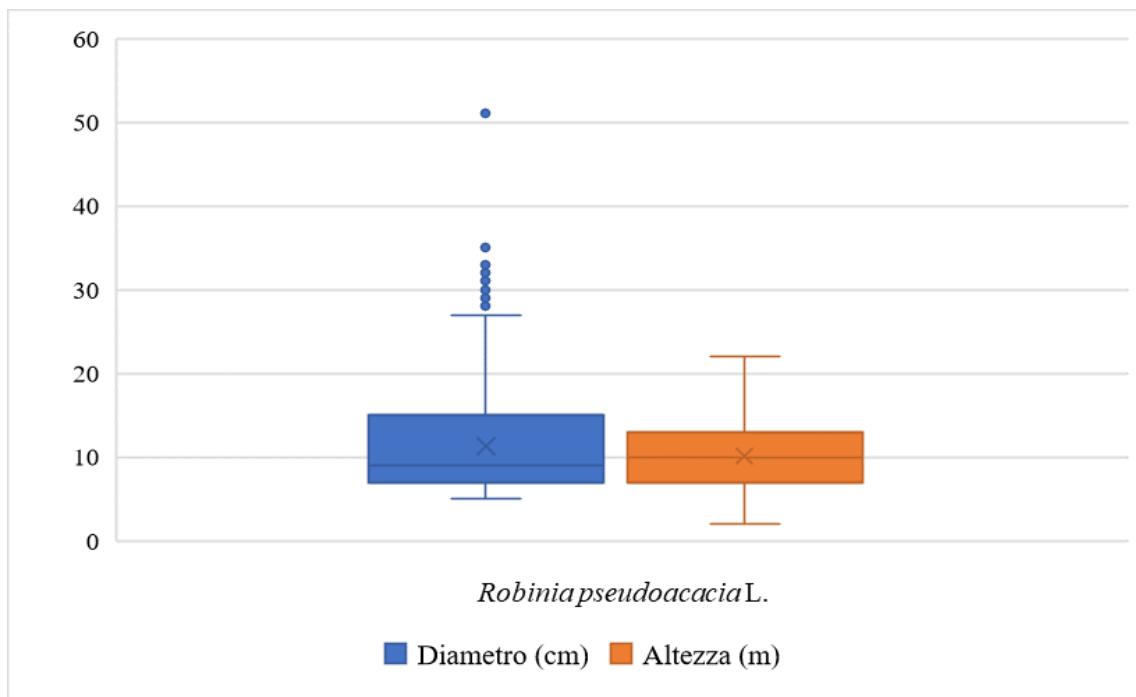


Figura 4.20: box-plot rappresentante il diametro (cm) e l'altezza (m) delle piante di *Robinia pseudoacacia* L. cavallettate nelle 42 aree di saggio. (Gruppo 1, n=679; gruppo 2, n=679)

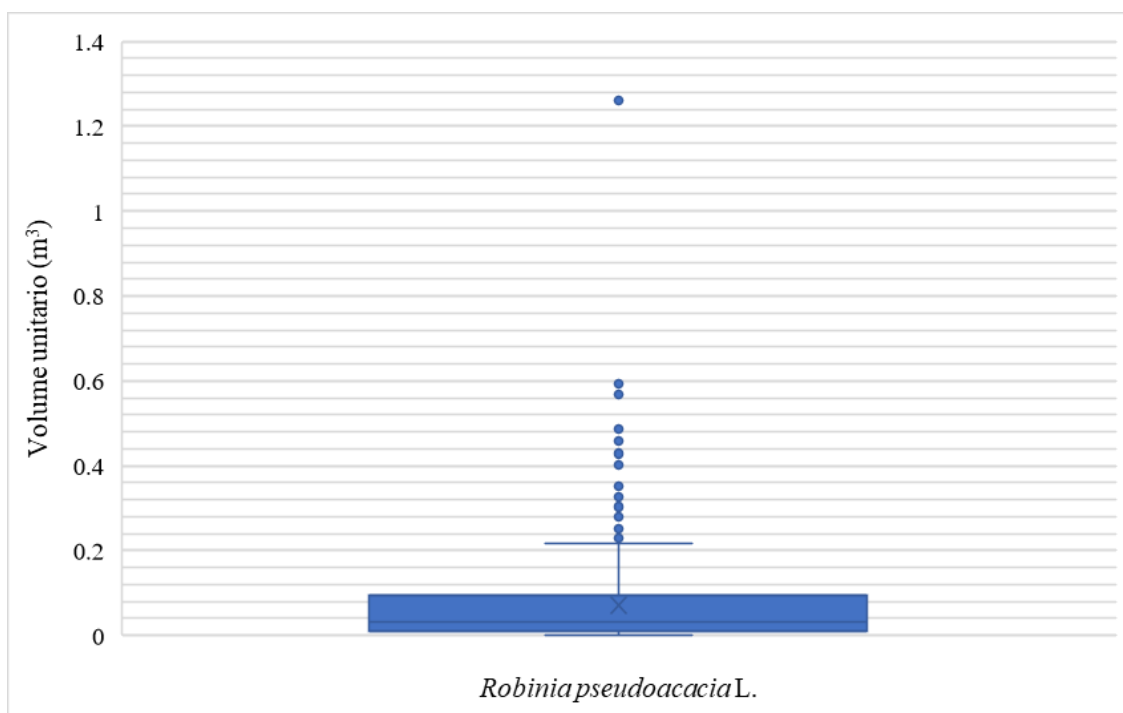


Figura 4.21: box-plot rappresentante il volume unitario (m^3) delle piante di *Robinia pseudoacacia* L. cavallettate nelle 42 aree di saggio. (Gruppo 1, n=679)

4.5.Necromassa

La necromassa è stata rinvenuta in 15 delle 42 aree di saggio e appartiene principalmente alla classe di decomposizione n.2 e n.3 che sono costituite maggiormente da piante in piedi intere e piante a terra stroncate. Le classi n.4 e n.5, ciò quelle che rappresentano legno quasi completamente decomposto, sono le meno rappresentate e sono costituite solamente da piante a terra stroncate (Fig. 4.22). Questo è dato probabilmente dalla gestione intensiva delle formazioni lineari da parte degli enti responsabili della sicurezza del traffico ferroviario, che provvedono alle potature e alla rimozione delle piante pericolanti.

Non si è verificata una correlazione lineare tra le classi di distanza dalle aree di frenata e il volume a ettaro della necromassa rinvenuta, così come la correlazione tra il volume a ettaro della necromassa e la superficie dell'area di saggio non ha mostrato legami.

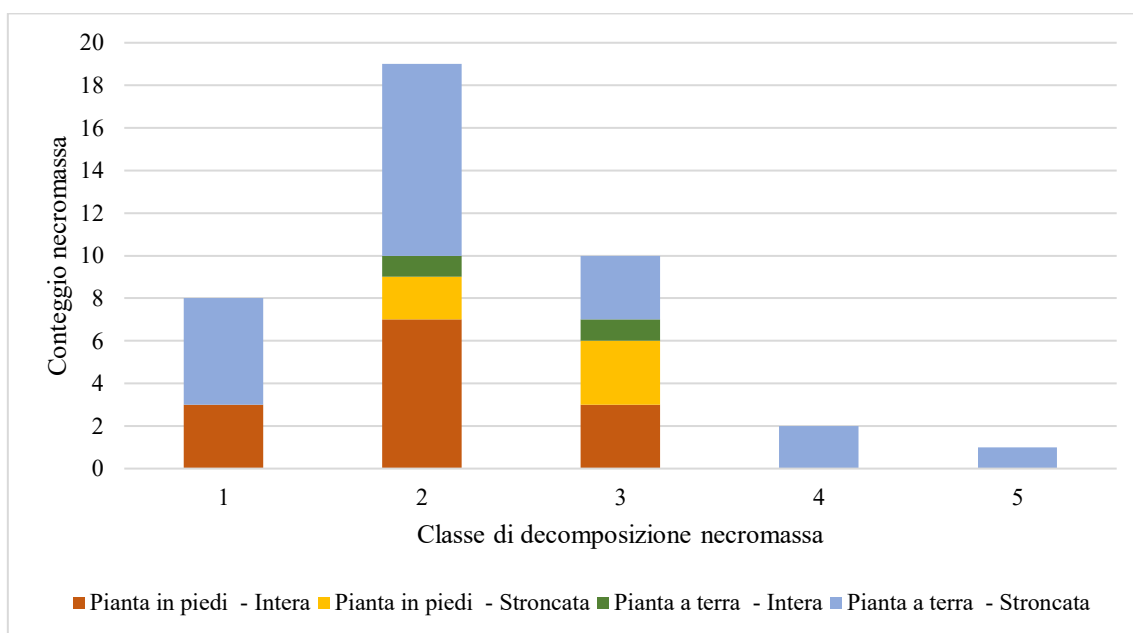


Figura 4.22: suddivisione della necromassa rinvenuta nelle 42 aree di saggio in base alla classe di decomposizione e al tipo di necromassa (pianta in piedi/pianta a terra; pianta intera/stroncata)

La Figura 4.23 mostra il volume unitario della necromassa cavallettata nelle 42 aree di saggio suddivisa nelle classi di decomposizione della necromassa. Il valore del volume unitario medio è piuttosto omogeneo nelle 5 classi seppur la maggiore eterogeneità nel dato sia registrato per le classi n.1, n.3 e n.4.

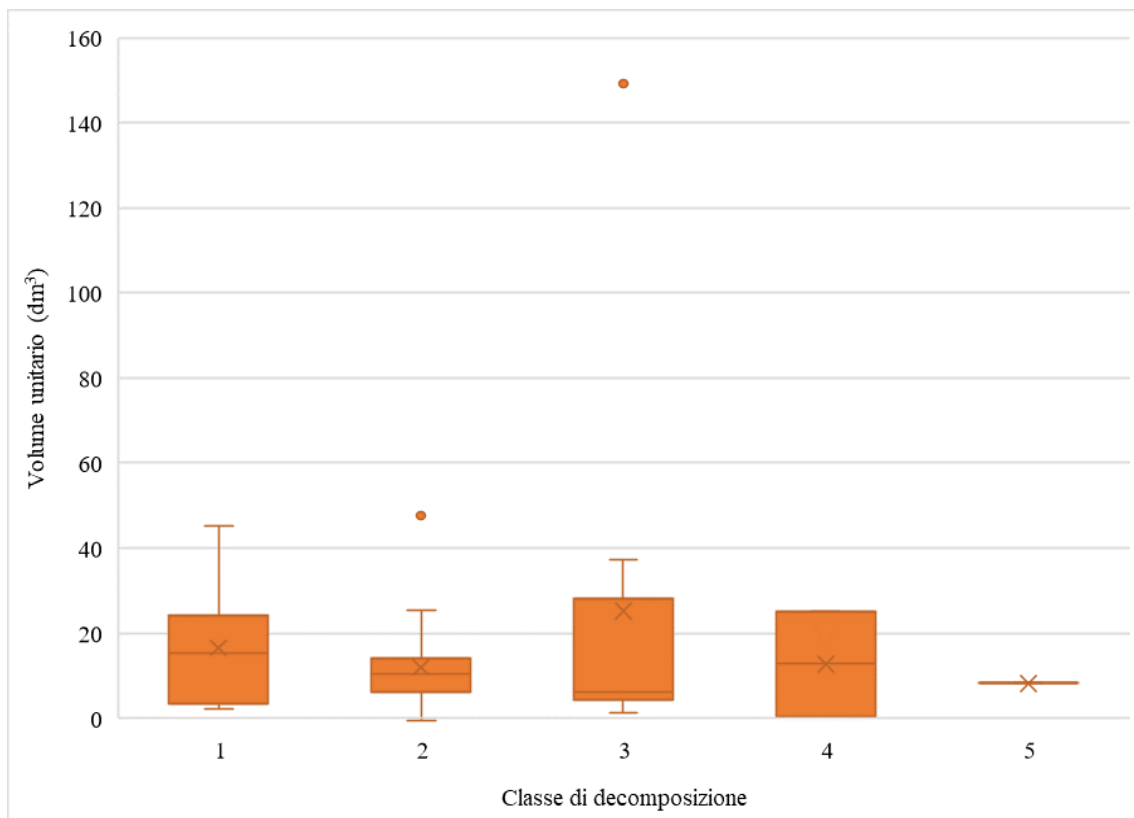


Figura 4.23: box-plot rappresentante il volume unitario (dm^3) della necromassa cavallettata per classe di decomposizione. (Gruppo 1, $n=8$; gruppo 2, $n=19$; gruppo 3, $n=10$; gruppo 4, $n=2$; gruppo 5, $n=1$)

4.6. Concentrazione metalli pesanti nel suolo

Al fine di valutare le concentrazioni dei metalli pesanti nel suolo sono stati presi come riferimento i valori indicati dal D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 “Norme in materia ambientale” che riportano le concentrazioni soglia di contaminazione nel suolo in relazione alla specifica destinazione d'uso dei siti, distinguendo siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale e siti ad uso commerciale e industriale. Le analisi delle concentrazioni dei metalli pesanti (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V, Zn, Hg, Sb, Sn) hanno mostrato in alcuni campioni di suolo, valori al di sopra i limiti di legge per i siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale per il rame (Cu), il nichel (Ni), il piombo (Pb), lo zinco (Zn) e lo stagno (Sn). I contaminanti arsenico (As), cromo (Cr) e vanadio (V) hanno mostrato valori inferiori ai limiti di legge (D.Lgs. n. 152/2006) in tutti i campioni di suolo. Per quanto riguarda le concentrazioni di cadmio (Cd), mercurio (Hg) e antimonio (Sb) i campioni di suolo analizzati hanno mostrato valori sotto la soglia di lettura dello strumento (ICP-OES 5900 Agilent, Santa Clara, CA, USA). Per quanto riguarda le concentrazioni di ferro (Fe) non viene riportata una soglia dalla normativa da noi utilizzata (D.Lgs. n. 152/2006). Le aree di saggio lungo la linea Monselice – Montagnana (linea complementare a singolo binario elettrificato) mostrano valori delle concentrazioni dei contaminanti tendenzialmente più basse, in quanto la linea è a singolo binario e risulta meno trafficata rispetto alle altre linee indagate.

Come è possibile osservare dalla Figura 4.24, i valori di concentrazione di rame superano in molti casi i valori limite di legge per i siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale ma in alcuni casi superano anche i valori limite di legge per i siti ad uso commerciale e industriale. Questi valori mostrano che, in prossimità dei binari ferroviari, ci siano concentrazioni di rame elevate a causa dell'attività ferroviaria, in particolare a causa dell'abrasione tra le ruote dei treni e le rotaie e tra il pantografo e la linea area di contatto, oltre al materiale rilasciato durante le operazioni di frenata. Le concentrazioni di nichel e stagno sopra soglia (Fig. 4.25 e Fig. 4.28) mostrano come l'abrasione tra le ruote dei treni e le rotaie rilasci questi composti come mostrato in letteratura. Le concentrazioni di zinco e piombo sopra soglia (Fig. 4.26 e Fig. 4.27) mostrano, come da letteratura, che il trasporto ferroviario rilascia questi composti nel terreno a causa di lubrificanti, oli e combustibili utilizzati per il corretto funzionamento del treno.

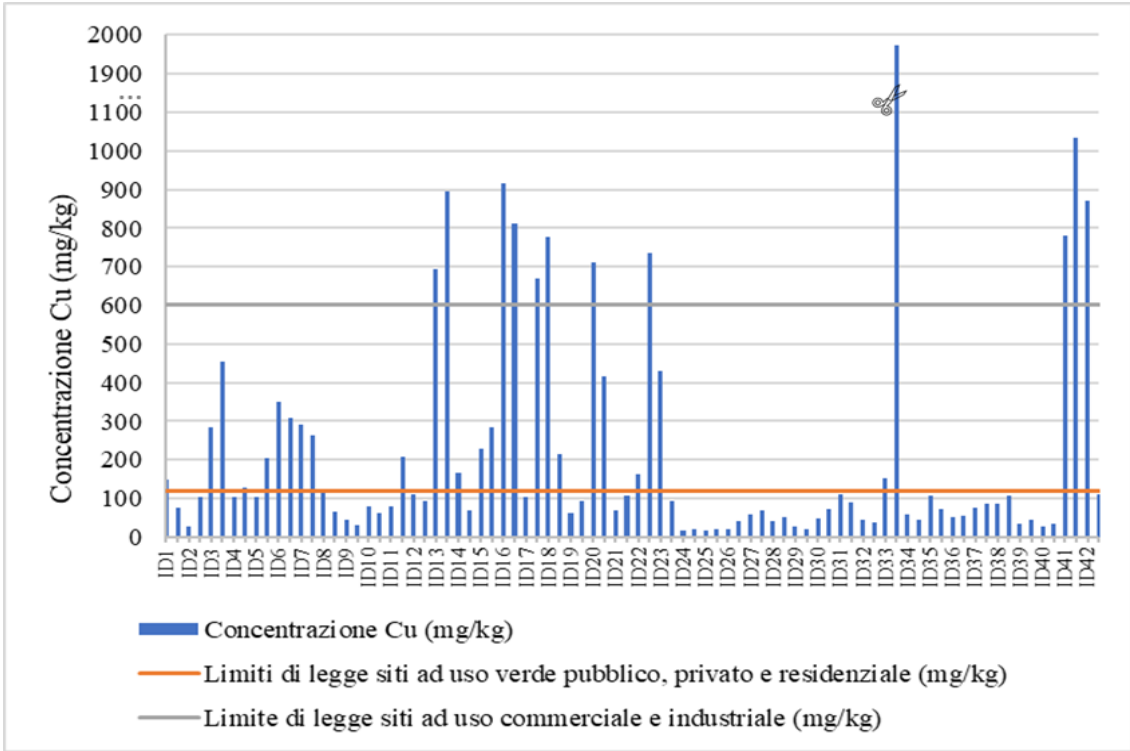


Figura 4.24: concentrazione di rame (Cu) nei campioni di suolo prelevati dalle aree di saggio confrontati con valori limite di legge

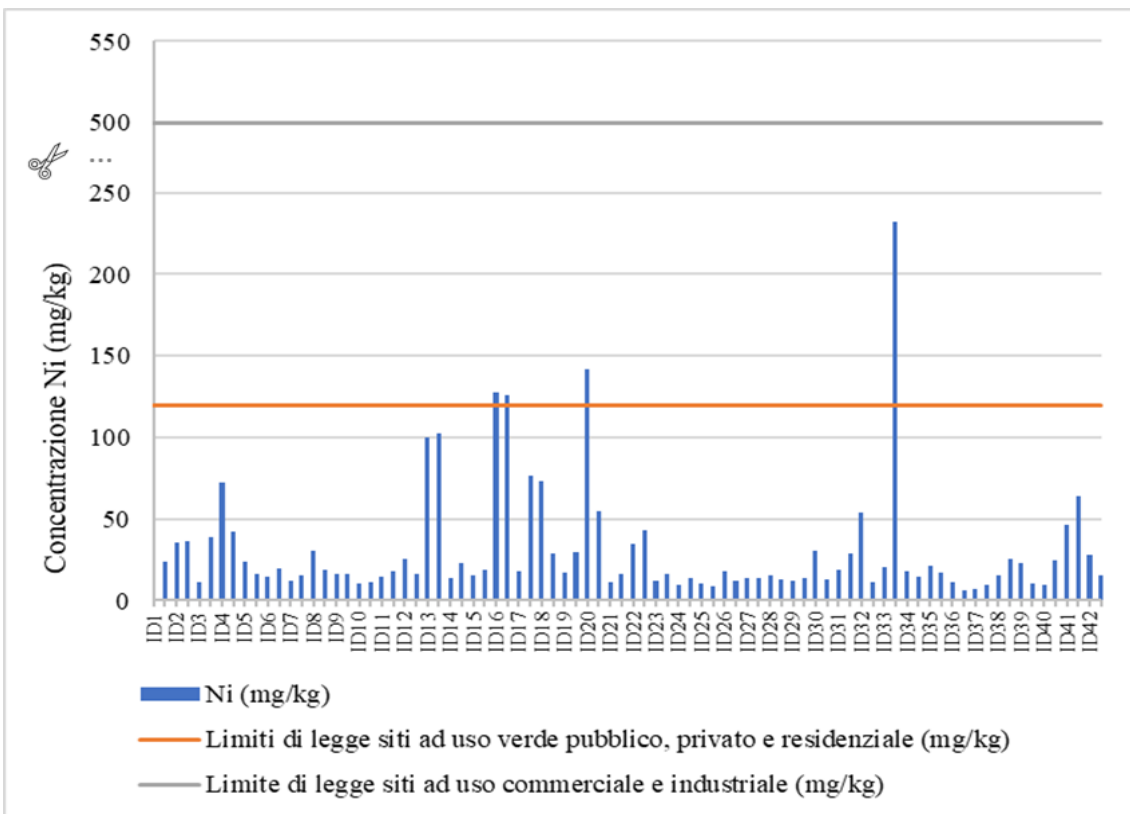


Figura 4.25: concentrazione di nichel (Ni) nei campioni di suolo prelevati dalle aree di saggio confrontati con valori limite di legge

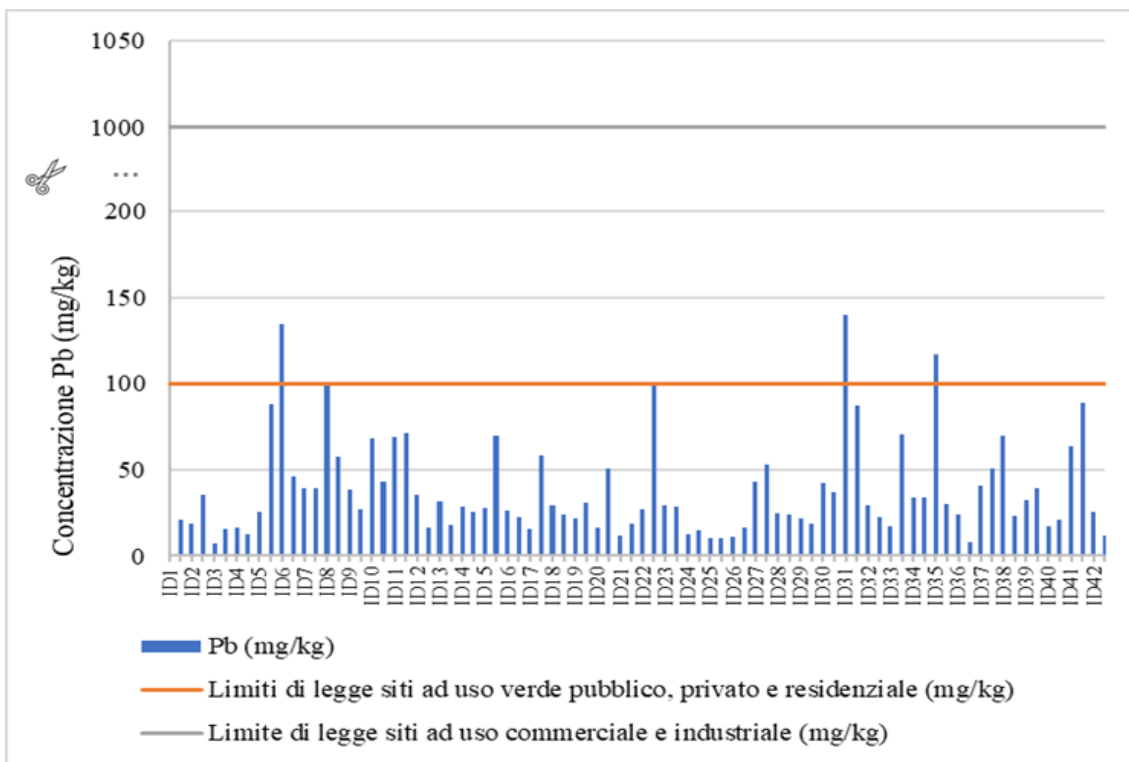


Figura 4.26: concentrazione di piombo (Pb) nei campioni di suolo prelevati dalle aree di saggio confrontati con valori limite di legge

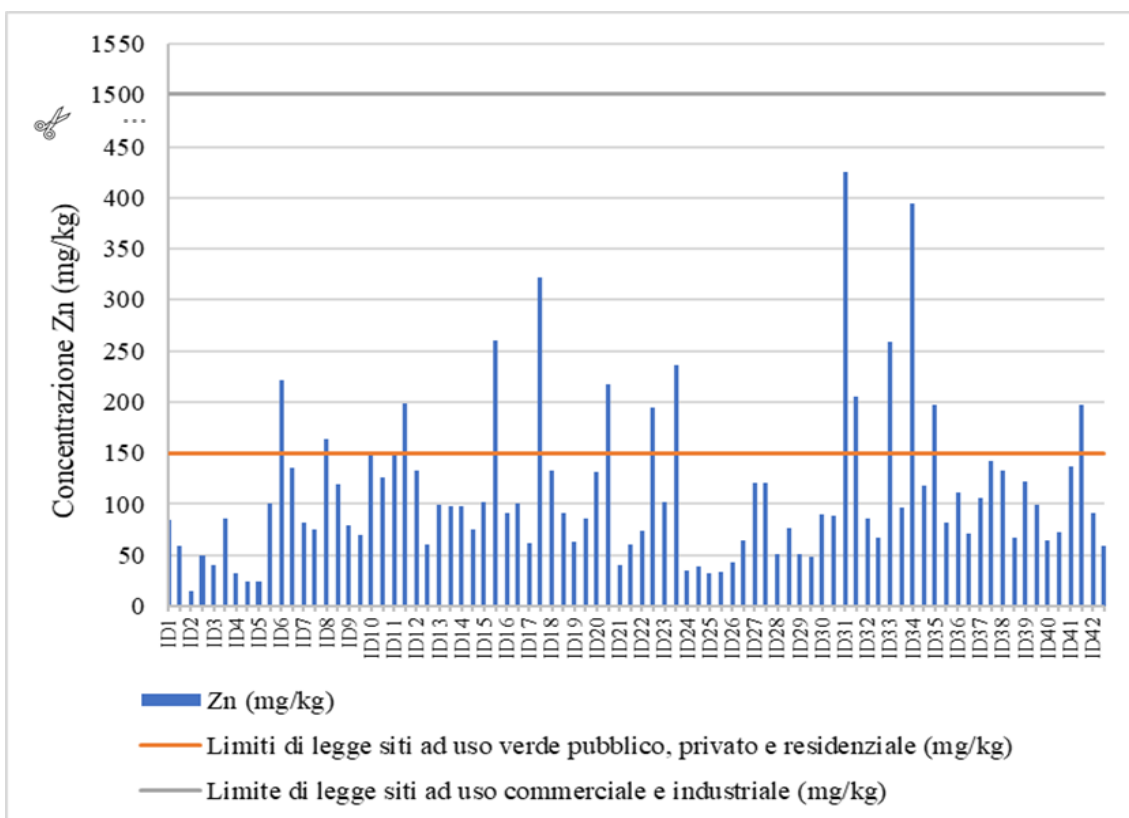


Figura 4.27: concentrazione di zinco (Zn) nei campioni di suolo prelevati dalle aree di saggio confrontati con valori limite di legge

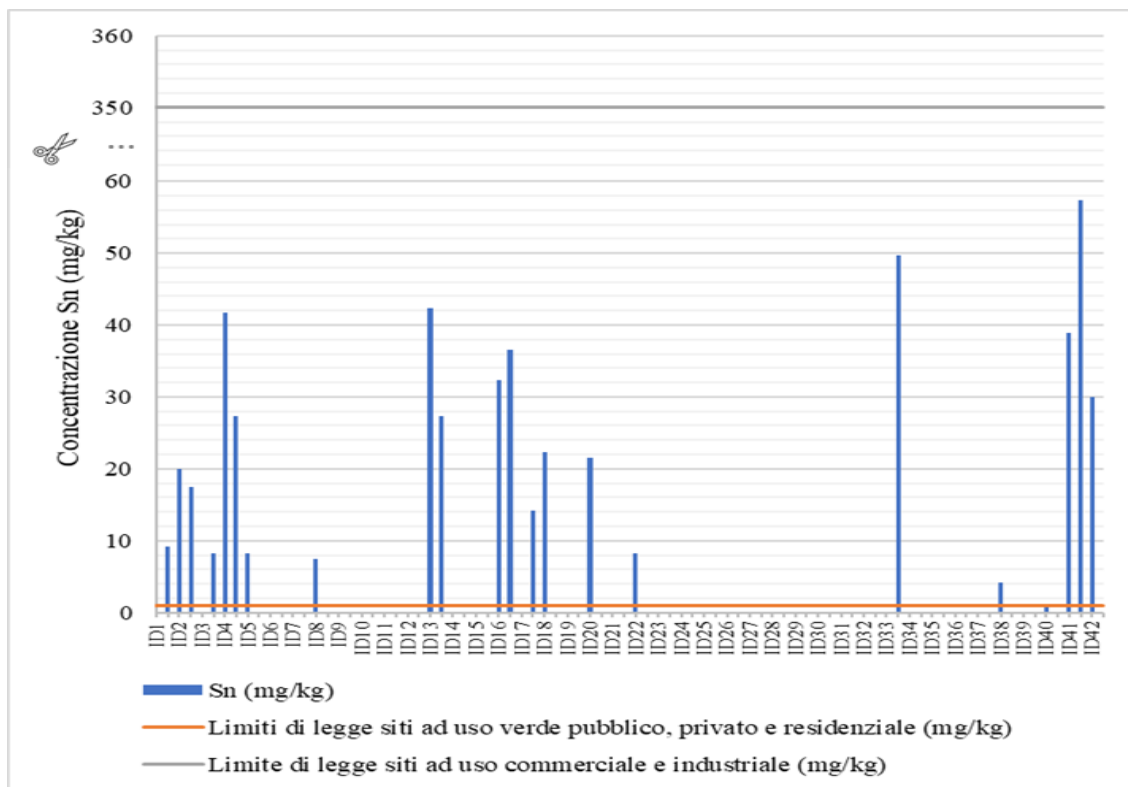


Figura 4.28: concentrazione di stagno (Sn) nei campioni di suolo prelevati dalle aree di saggio confrontati con valori limite di legge

È stata effettuata la correlazione tra le concentrazioni dei contaminanti e le classi di distanza dalle aree di frenata. Questa analisi non mostra correlazione lineare tra le concentrazioni di rame (Cu) e degli altri contaminanti analizzati con la classe di distanza dalle aree di frenata.

Al fine di verificare come la distanza di campionamento influisca sulle concentrazioni di inquinanti, è stata effettuata la correlazione tra queste due variabili. I risultati, come è possibile osservare dalla Figura 4.29 e dalla Figura 4.30, mostrano una mancata correlazione tra le variabili. Questo indica che, anche se i campionamenti effettuati sui campioni di suolo hanno una distanza variabile tra i 2,5 metri e i 9,2 metri, sulla base di questi dati non influiscono sulla concentrazione dei contaminanti, in quanto non presentano una correlazione lineare. Questo indica che l'ampio range di valori di concentrazione non è influenzato dallo schema di campionamento, che varia la distanza di campionamento del suolo in base alla distanza dal piede alla linea ferroviaria. La scelta di campionare a una distanza variabile dalla ferrovia è dettata dall'esigenza di avere un dato puntuale rappresentativo del suolo dove crescono le piante che poi verranno analizzate per uno studio futuro sulla concentrazione dei metalli pesanti negli organi

vegetali degli esemplari arborei e per avere un dato rappresentativo delle condizioni del suolo nell'area dove si sviluppa la fascia arborea analizzata.

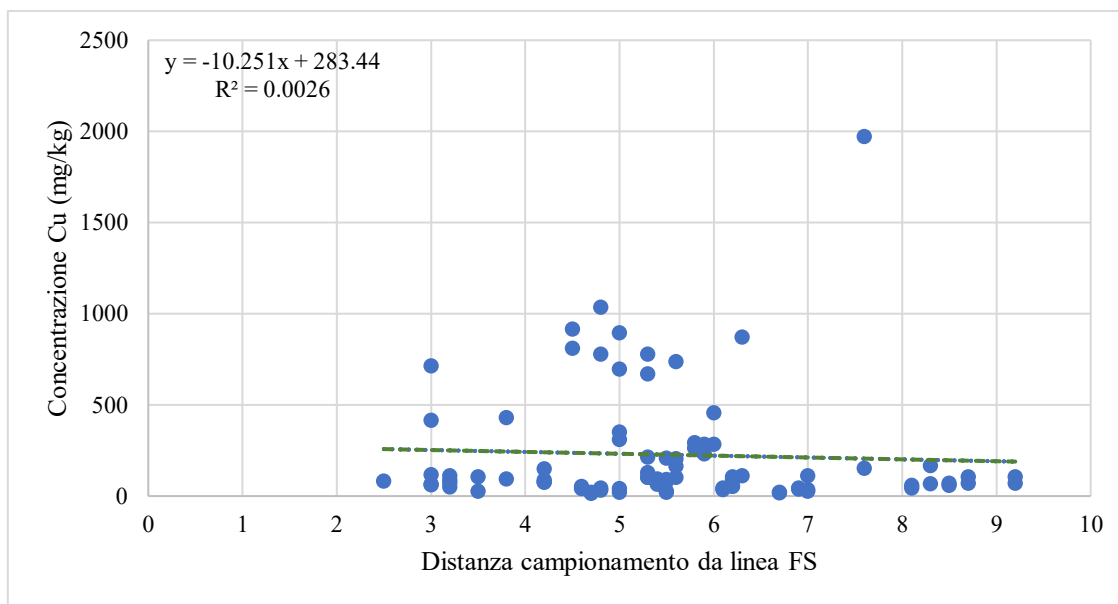


Figura 4.29: correlazione concentrazione rame (Cu) e distanza di campionamento dalla linea ferroviaria

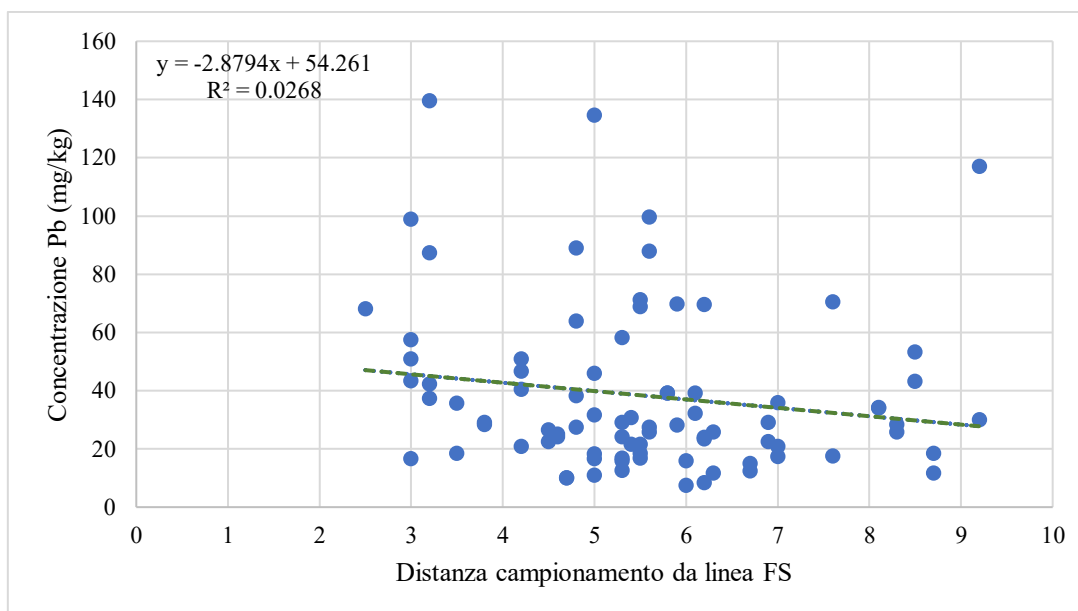


Figura 4.30: correlazione concentrazione piombo (Pb) e distanza di campionamento dalla linea ferroviaria

Anche la relazione tra i valori dei contaminanti sopra soglia e il numero di specie totali (Fig. 4.31), il numero di specie erbacee, la percentuale di specie esotiche e la percentuale

di specie nitrofile per ogni area di saggio non ha mostrato una correlazione lineare (Allegato 4).

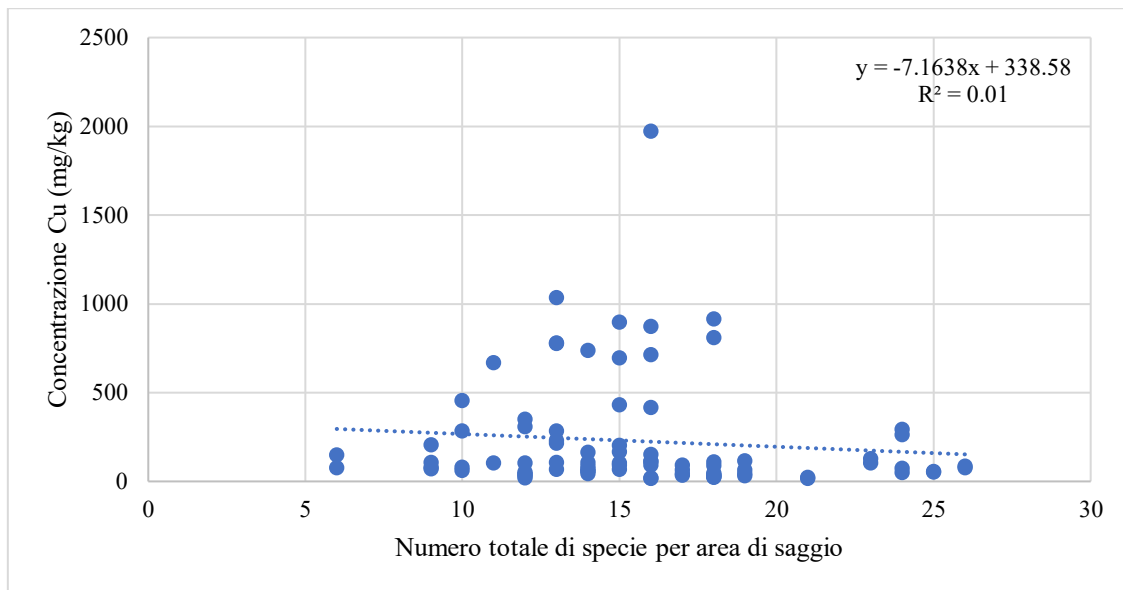


Figura 4.31: correlazione concentrazione rame (Cu) e numero di specie totali per area

Per quanto riguarda la struttura del popolamento è stata analizzata la correlazione tra i valori dei contaminanti sopra soglia e il rapporto tra altezza e diametro (H/D), il volume a ettaro del popolamento e il volume a ettaro della necromassa di ogni area di saggio: questa analisi non ha evidenziato una correlazione lineare come si può osservare dalle Figure 4.32, 4.33 e 4.34 (Allegato 4). Sulla base di questi dati non sembrano esserci correlazioni tra il grado di contaminazione e la struttura del popolamento, evidenziando la tolleranza ai metalli pesanti e il potenziale di fitorimediazione del suolo della *Robinia pseudoacacia* L..

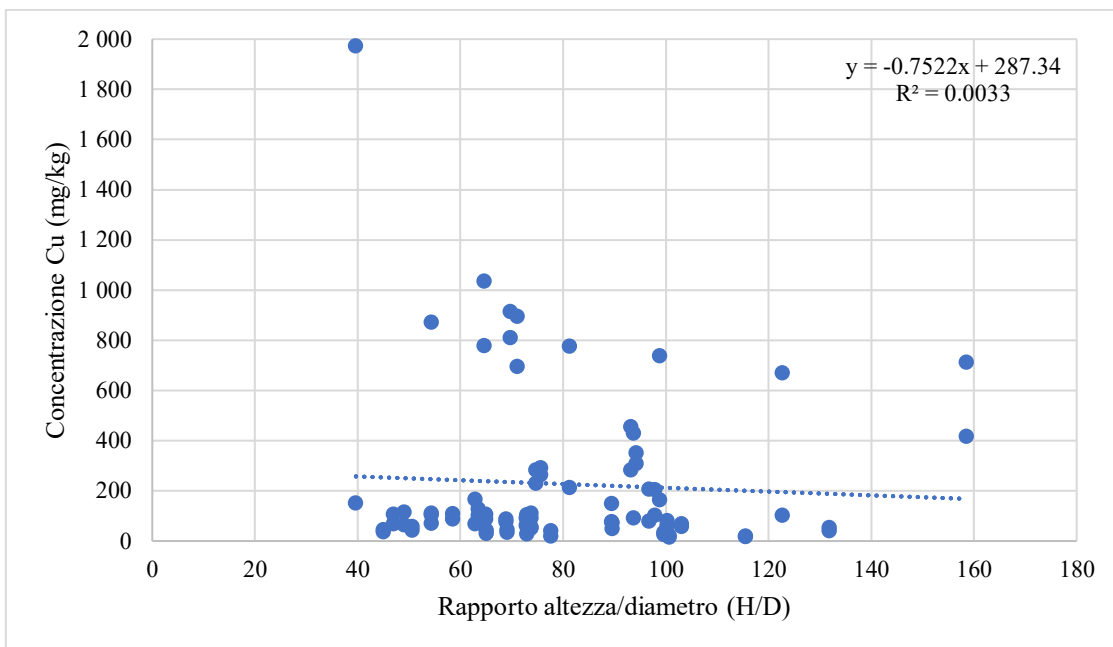


Figura 4.32: correlazione concentrazione rame (Cu) e rapporto altezza/diametro

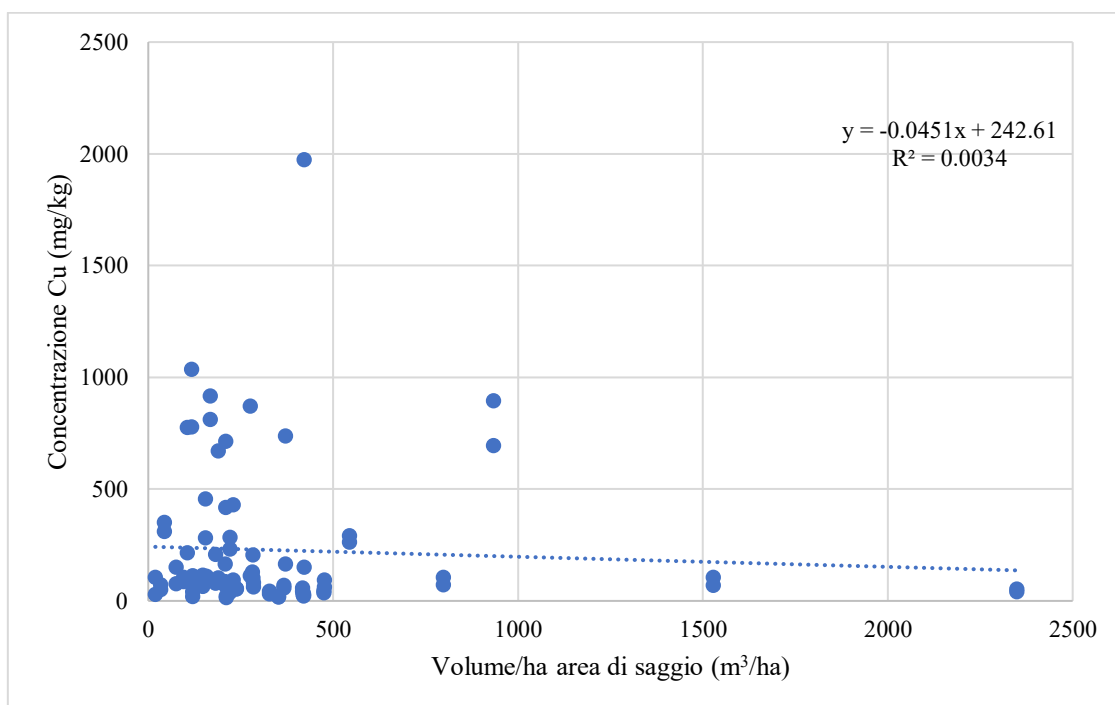


Figura 4.33: correlazione concentrazione rame (Cu) e volume/ha area di saggio

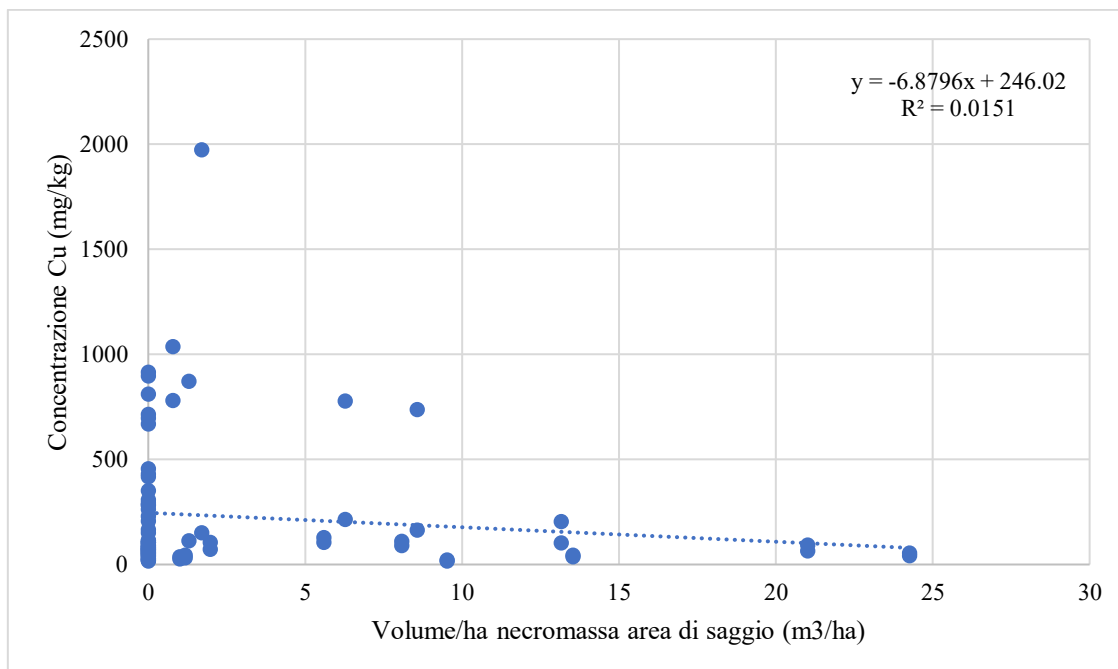


Figura 4.34: correlazione concentrazione rame (Cu) e volume/ha necromassa area di saggio

Per ogni area di saggio è stata calcolata la media, il valore minimo e il valore massimo delle due concentrazioni rilevate nei campionamenti di suolo per ogni contaminante. Attraverso la multicorrelazione tra le concentrazioni medie, minime e massime dei contaminanti per area di saggio sono emerse delle correlazioni (Allegato 3). Questa analisi è servita per evidenziare le correlazioni tra i vari contaminanti che successivamente sono state indagate e verificate singolarmente. In seguito a queste analisi sono state effettuate le correlazioni tra i singoli contaminanti e sono emerse delle correlazioni tra le concentrazioni di cromo (Cr) con quelle di rame (Cu), ferro (Fe), vanadio (V) e stagno (Sn), come mostrano le Figure 4.35 e 4.36.

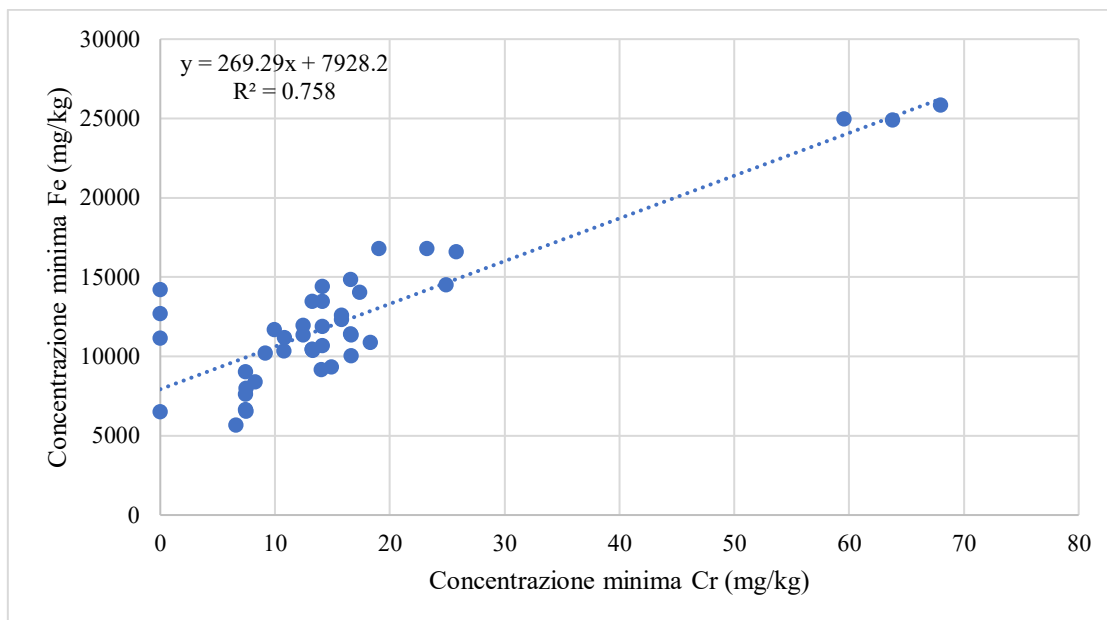


Figura 4.35: correlazione tra la concentrazione minima per area di saggio dei valori di cromo (Cr) e di ferro (Fe)

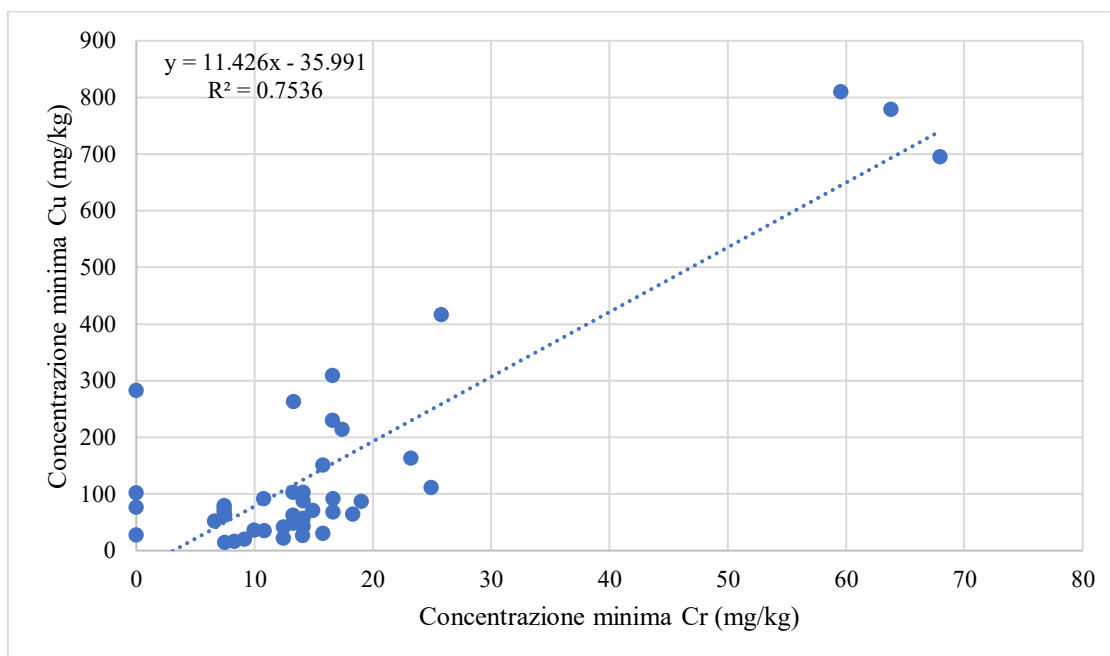


Figura 4.36: correlazione tra la concentrazione minima per area di saggio dei valori di cromo (Cr) e di rame (Cu)

Le concentrazioni di rame (Cu) hanno mostrato una correlazione con quelle di zinco (Zn), nichel (Ni) e ferro (Fe), come è possibile vedere dalla Figura 4.37.

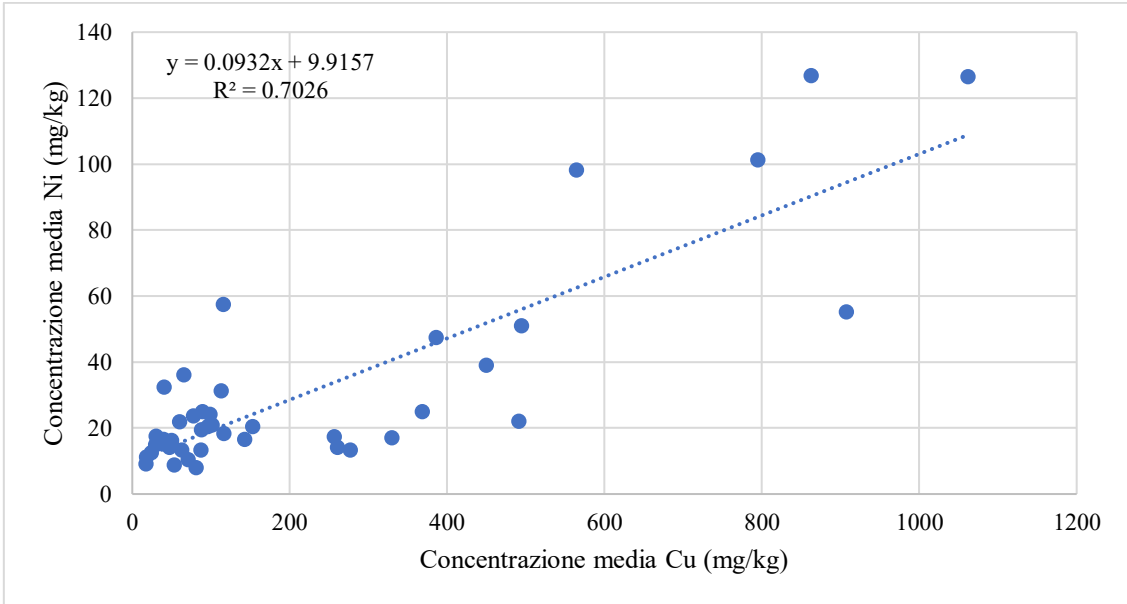


Figura 4.37: correlazione tra la concentrazione media per area di saggio dei valori di rame (Cu) e di nichel (Ni)

Il ferro ha mostrato una correlazione con le concentrazioni di nichel (Ni) e stagno (Sn); il nichel (Ni) ha mostrato una correlazione con i valori di stagno, mentre il piombo come si può osservare dalla Figura 4.38 mostra una correlazione con lo zinco.

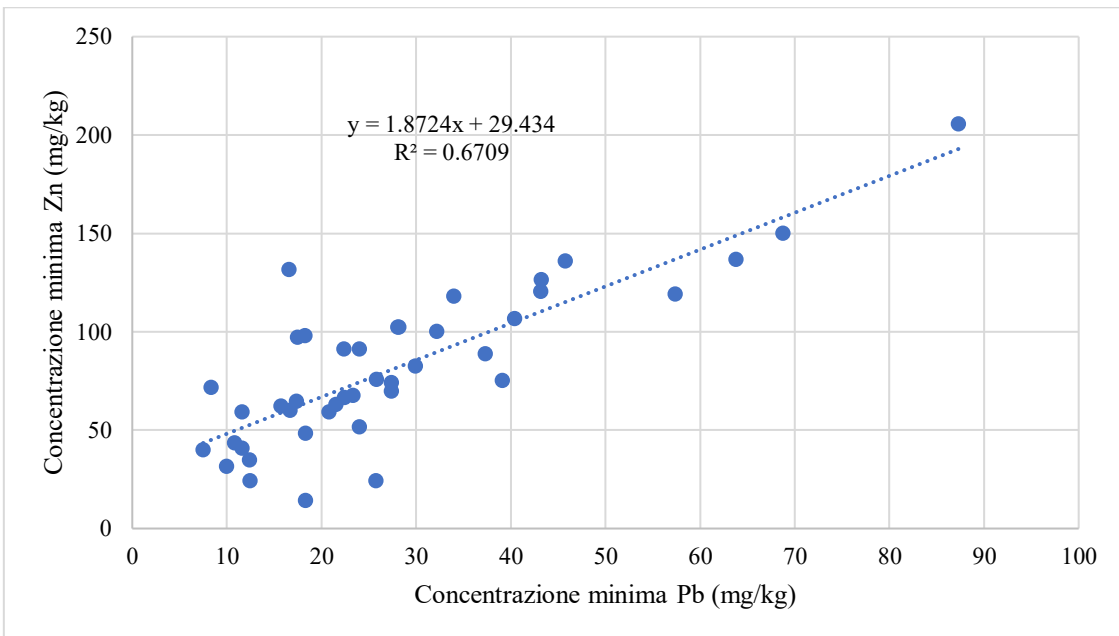


Figura 4.38: correlazione tra la concentrazione media per area di saggio dei valori di piombo (Pb) e di zinco (Zn)

Queste correlazioni possono essere influenzate da molte variabili esterne, ma risultano comunque un buon indicatore delle relazioni tra i contaminanti in modo da poterle

confrontare con le relazioni descritte in letteratura. Lo studio condotto da Burkhardt et al. (2008) evidenzia come nelle aree di frenata si ha l'emissione di ferro, manganese, rame e cromo, mentre l'abrasione tra le ruote e le rotaie genera emissioni di rame, nichel e molibdeno. Le correlazioni ottenute dalle concentrazioni di metalli pesanti nel suolo, rinvenute nelle 42 aree di saggio, sono in accordo con questo studio, mostrando una relazione tra le concentrazioni di cromo e ferro, cromo e rame, rame e ferro, metalli pesanti rilasciati in prevalenza durante le operazioni di frenata e tra rame e nichel rilasciati in prevalenza durante la marcia dei treni. Lo studio condotto da Chen et al. (2014) mette in evidenza la relazione tra il piombo, il cadmio e lo zinco, metalli pesanti rilasciati dai lubrificanti e dalle locomotrici a diesel. I livelli di concentrazione di piombo e zinco rinvenuti nelle aree di saggio hanno mostrato una correlazione tra i due inquinanti dimostrandosi in accordo con lo studio di Chen et al. (2014).

5. CONCLUSIONI

Nel presente studio si sono indagati gli effetti del trasporto ferroviario sulla vegetazione e sull'ambiente circostante attraverso lo studio delle formazioni arboree lineari adiacenti alle linee ferroviarie. Sono state prese in considerazione 42 aree di saggio composte da formazioni lineari dominate da *Robinia pseudoacacia* L. lungo quattro linee ferroviarie venete. Le aree sono state classificate in base alla loro origine (spontanea o mista), al tipo forestale (robiniето puro o robiniето misto), alla struttura e all'uso del suolo limitrofo; le formazioni lineari analizzate sono in prevalenza di origine spontanea, con una tipologia forestale a robiniето puro e una struttura prevalentemente monopiana. Questa classificazione ci ha permesso di valutare eventuali correlazioni tra la composizione delle formazioni lineari e altre variabili come la distanza dalla linea ferroviaria, la profondità della chioma, la profondità del piede e la copertura dei tre strati vegetazionali (erbaceo, arbustivo ed arboreo). Non si è verificata una correlazione lineare tra l'origine e il tipo forestale con la profondità del piede e della chioma, il campione analizzato è risultato piuttosto omogeneo per quanto riguarda la varietà all'interno dell'origine e della tipologia forestale. La relazione tra gli strati vegetazionali e l'origine e il tipo forestale mostra valori simili per quanto riguarda la copertura arborea, la copertura arbustiva ha valori maggiori nelle formazioni di origine spontanea e nel tipo forestale robiniето misto, mentre la copertura erbacea sembra essere maggiore nelle formazioni di origine spontanea e nel tipo forestale robiniето puro. Si è provveduto a suddividere le aree di saggio in tre classi (1: minima, 2: media, 3: massima) in base alla distanza dalle aree di frenata (stazioni e scambi di binario), al fine di verificare se questa variabile influisca sulla struttura delle formazioni lineari, sulla composizione della flora vascolare e sulle concentrazioni di inquinanti rinvenuti nel suolo. Questa variabile non ha mostrato correlazioni con i dati ricavati dalle aree di saggio analizzate, mostrando come la distanza dalle aree di frenata in prossimità di stazioni (principali e secondarie) e scambi non influisca sulla composizione delle formazioni lineari e sulla concentrazione di metalli pesanti nel suolo. È stata analizzata la composizione della flora vascolare classificando le specie in native ed esotiche e in funzione al valore di bioindicazione di Elleberg in specie nitrofile o non nitrofile. Sono state rinvenute 117 specie differenti nelle 42 aree di saggio di cui 32,48% sono specie esotiche e 27,35% sono specie nitrofile. La classe vegetazionale più ricca di specie è quella erbacea (media di 14 specie per area) che risulta strettamente legata alla

ricchezza di specie totali, seguita da quella arbustiva (media di 4 specie per area) e arborea (media di 2 specie per area) che risulta quasi monospecifica, costituita principalmente dalla specie esotica e nitrofila *Robinia pseudoacacia* L. che è presente in tutte le aree di saggio in quanto criterio di selezione per le aree di studio. Infatti, per la presenza della robinia, lo strato arboreo risulta quello con il maggior numero di specie esotiche (77%) e nitrofile (68%) dal quale è costituito in prevalenza.

Il volume a ettaro delle specie arboree cavallettate nelle aree di saggio risulta omogeneo in funzione dell'origine delle formazioni lineari e del tipo forestale analizzato. Le formazioni lineari risultano giovani, gli esemplari di robinia mostrano un diametro medio di 11,31 cm e un'altezza di 10 m. Questi dati mostrano come il volume a ettaro non sia influenzato dall'origine della formazione, dal tipo forestale, dalla distanza dalla linea ferroviaria e dalla dimensione dell'area, in quanto, probabilmente, la struttura e il volume di queste formazioni viene influenzato principalmente dalle operazioni di gestione delle fasce arboree lineari che hanno lo scopo di mantenere la sicurezza del traffico ferroviario, andando ad intervenire con ceduzioni, potature e rimozione del legno pericolante omogeneizzando la struttura e la composizione delle formazioni lineari. Per questo motivo la necromassa legnosa è stata rinvenuta in sole 15 aree di saggio e appartiene principalmente alle prime tre classi di decomposizione della necromassa che corrispondono a legno poco degradato, con la classe numero 2 che risulta la più rappresentata. La necromassa è costituita principalmente da piante in piedi intere e piante a terra stroncate.

Per studiare i contaminanti rilasciati dal trasporto ferroviario si è analizzata la concentrazione dei metalli pesanti di As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V, Zn, Hg, Sb, Sn. I contaminanti rame, nichel, piombo, zinco e stagno hanno evidenziato valori al di sopra i limiti di legge (D.Lgs. 3 aprile 2006) per i siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale. I valori di concentrazione di rame superano in alcuni casi anche i valori limite di legge per i siti ad uso commerciale e industriale. Questi valori mostrano come, in prossimità dei binari ferroviari, ci siano concentrazioni elevate di questi metalli pesanti. Le concentrazioni dei metalli pesanti sopra soglia sono in accordo con la letteratura in quanto il rame, il nichel e lo stagno vengono rilasciati in particolare a causa dell'abrasione tra le ruote dei treni e le rotaie e tra il pantografo e la linea area di contatto, oltre che durante le operazioni di frenata. Mentre lo zinco e il piombo vengono rilasciati dai

lubrificanti, oli e combustibili utilizzati per il corretto funzionamento dei treni. L'ampio range di valori di concentrazione non viene influenzato dallo schema di campionamento, che varia la distanza di campionamento del suolo in base alla distanza dal piede alla linea ferroviaria, in quanto non si è verificata una correlazione lineare tra queste due variabili. Non si sono verificate correlazioni tra il grado di contaminazione e la struttura del popolamento. Questo dato potrebbe suggerire che, in linea con quanto evidenziato in letteratura, la robinia sembra reagire bene ai livelli di contaminazione rinvenuti nei suoli in prossimità delle linee ferroviarie, evidenziando la sua tolleranza ai metalli pesanti e il suo potenziale di fitorimediazione del suolo. L'analisi di multicorrelazione tra le concentrazioni medie, minime e massime dei contaminanti per area di saggio ha evidenziato delle relazioni tra le concentrazioni. Sono risultate significative le correlazioni tra le concentrazioni di cromo con quelle di rame, ferro, vanadio e stagno; le concentrazioni di rame con quelle di zinco, nichel e ferro; le concentrazioni di ferro con quelle di nichel e stagno; le concentrazioni di nichel con quelle di stagno, mentre il piombo ha mostrato una correlazione con lo zinco. Queste correlazioni sono in accordo con quanto verificato dalla letteratura, il cromo, il ferro e il rame sono rilasciati in prevalenza durante le operazioni di frenata mentre il rame, il nichel e lo stagno vengono rilasciati in prevalenza durante la marcia dei treni per l'abrasione tra le ruote e le rotaie. La relazione tra il piombo e lo zinco è confermata dalla letteratura in quanto questi metalli pesanti vengono rilasciati da oli, lubrificanti e dalle locomotrici a diesel. Queste correlazioni possono essere influenzate da molte variabili esterne come le caratteristiche pedologiche, l'uso del suolo contermini e la gestione della linea ferroviaria. Future ricerche potrebbero approfondire l'influenza delle numerose variabili che entrano in gioco sulla concentrazione dei metalli pesanti nel suolo. Uno studio futuro, già avviato, riguarda le concentrazioni di metalli pesanti negli organi vegetali degli esemplari arborei in modo da poterli confrontare con le concentrazioni di inquinanti del suolo e valutare l'efficacia fitorimediante della *Robinia pseudoacacia* L..

BIBLIOGRAFIA

- Alessandrini A., Morelli V. & Pellizzari M. (2011). Ecologia e Flora ferroviaria, con particolare riferimento alle aree di “Ferrovie Emilia-Romagna”. Orlandi P. & Tozzi Fontana M. (eds.), *Ferrovie dell’Emilia-Romagna. Paesaggio, natura, storia*: 51-73. Istituto per i Beni artistici, culturali e naturali della Regione Emilia-Romagna, Bologna, Editrice Compositori.
- Alessandrini A. (2018). Flora degli ambienti ferroviari. Lo Scalo San Donato a Bologna. *Quaderni del Museo Civico di Storia Naturale di Ferrara*, 6, 37-44.
- Ali H., Khan E., & Sajad M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. In *Chemosphere*, 91(7), 869–881. Elsevier Ltd.
- Băbău A. M. C., Micle V., Damian G. E., & Sur I. M. (2021). Sustainable ecological restoration of sterile dumps using robinia pseudoacacia. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24).
- Baker A. J. M., McGrath S. P., Roger D. R., & Smith J. A. C. (2000). Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils.
- Bartolucci F., Peruzzi L., Galasso G., Albano A., Alessandrini A., Ardenghi N.M.G., Astuti G., Bacchetta G., Ballelli S., Banf E., Barberis G., Bernardo L., Bouvet D., Bovio M., Cecchi L., Di Pietro R., Domina G., Fascetti S., Fenu G., Festi F., Foggi B., Gallo L., Gottschlich G., Gubellini L., Iamónico D, Iberite M., Jiménez-Mejías P., Lattanzi E., Marchetti D., Martinetto E., Masin R.R., Medagli PP, Passalacqua N.G., Peccenini S., Pennesi R, Pierini B., Poldini L., Prosser F., Raimondo F.M., Roma-Marzio F., Rosati L., Santangelo A., Scoppola, Scortegagna L., Selvaggi A., Selvi F., Soldano A., Stinca A., Wagensommer R. P., Wilhalm T., & Conti F. (2018). An updated checklist of the vascular flora native to Italy. *Plant Biosystems*, 152(2), 179–303.
- Benesperi R., Giuliani C., Zanetti S., Gennai M., Mariotti Lippi M., Guidi T., Nascimbene J., & Foggi B. (2012). Forest plant diversity is threatened by Robinia pseudoacacia (black-locust) invasion. *Biodiversity and Conservation*, 21(14), 3555–3568.

- Bosak P., Lukianchuk N., Pinder V., Shukel I., & Popovych V. (2023). Performance analysis of protective functions of forest plantations of the Lviv railway line (Ukraine). *Ecological Questions*, 34(3).
- Brtnický M., Pecina V., Juříčka D., Kowal P., Vašinová Galiová M., Baltazár T., & Radziemska, M. (2022). Can rail transport-related contamination affect railway vegetation? A case study of a busy railway corridor in Poland. *Chemosphere*, 293.
- Burkhardt M., Rossi L., & Boller M. (2008). Diffuse release of environmental hazards by railways. *Desalination*, 226(1–3), 106–113.
- Campagnaro T., Brundu G., & Sitzia T. (2018). Five major invasive alien tree species in European Union Forest habitat types of the Alpine and Continental biogeographical regions. *Journal for Nature Conservation*, 43, 227–238.
- Campagnaro T., Trentanovi G., Iacopino S., Squartini A., Simonelli F. G., Alterio E., Bertoldo G., Concheri G., Grigolato S., Portaccio A., Rizzi A., Rizzieri Masin R., Stevanato P., Tasinazzo S., & Sitzia T. (2023). Sweet chestnut forests under black locust invasion threat and different management: An assessment of stand structure and biodiversity. *Forest Ecology and Management*, 537.
- Chen Z., Liu X., Ai Y., Chen J., Luo X., Chen J., & Zhong S. (2018). Effects and mechanisms of revegetation modes on cadmium and lead pollution in artificial soil on railway rock-cut slopes. *Science of the Total Environment*, 644, 1602–1611.
- Chen Z., Wang K., Ai Y. W., Li W., Gao H., & Fang C. (2014). The effects of railway transportation on the enrichment of heavy metals in the artificial soil on railway cut slopes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(2), 1039–1049.
- Cierjacks A., Kowarik I., Joshi J., Hempel S., Ristow M., von der Lippe M., & Weber E. (2013). Biological flora of the british isles: *Robinia pseudoacacia*. *Journal of Ecology*, 101(6), 1623–1640.
- Corona P., Chiriaco M. V., Salvati R., Marchetti M., Lasserre B., & Ferrari B. (2009). Proposta metodologica per l’inventario su vasta scala degli alberi fuori foresta. *L’Italia Forestale e Montana*, 367–380.
- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 “Norme in materia ambientale” – Parte IV: Titolo V Allegato 5.
- Del Favero R. (2004). *I boschi delle regioni alpine italiane. Tipologia, funzionamento, selvicoltura*, Padova, Coop. Libreria Editrice Università di Padova.

- Denisow B., Wrzesień M., Mamchur Z., & Chuba M. (2017). Invasive flora within urban railway areas: A case study from Lublin (Poland) and Lviv (Ukraine). *Acta Agrobotanica*, 70(4).
- Domina G., Galasso G., Bartolucci F., & Guarino R. (2018). Ellenberg Indicator Values for the vascular flora alien to Italy. Electronic Supplementary File 1. *Flora Mediterranea*, 28.
- Enescu C. M., & Dănescu A. (2013). Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.), an invasive neophyte in the conventional land reclamation flora in Romania. In *Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 6(2).
- Filibeck G., Cornelini P., & Petrella P. (2012). Floristic analysis of a high-speed railway embankment in a Mediterranean landscape. *Acta Botanica Croatica*, 71(2), 229–248.
- Galasso H., Conti H, Peruzzi L, N. M. G. Ardenghi, E. Banfi, L. CelestiGrapow, A. Albano, A. Alessandrini, G. Bacchetta, Ballelli S., Bandini Mazzanti A., Barberis, Bernardo L., Blasi, Bouvet L., Bovio M., Cecchi L., Del Guacchio E, Domina G., Fascetti S, Sizia W., Gallo L., Gubellini L., Guiggi A., Iamónico D., Iberite D., Jiménez-Mejías P., Lattanzi R., Marchetti D., Martinetto E., Masin R.R., Medagli P., Passalacqua NG, Peccenini S., Pennesi R, B. Pierini, Podda L., Poldini L., F. Prosser, Raimondo F.M., Roma-Marzio F., Rosati L., Santangelo A., Scortegagna A., Selvaggi F.A., Selvi F., Soldano A., Stinca A., Wagensommer R.P., Wilhalm T. & Bartolucci (2018). An updated checklist of the vascular flora alien to Italy, *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 152(3), 556-592.
- Ghosh M., & Singh S. P. (2005). Asian Journal on Energy and Environment A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of It's by Products. *As. J. Energy Env*, 6(4), 214–231.
- Meng X., Ai Y., Li R., & Zhang W. (2018). Effects of heavy metal pollution on enzyme activities in railway cut slope soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4).
- Mętrak M., Chmielewska M., Sudnik-Wójcikowska B., Wiłkomirski B., Staszewski T., & Suska-Malawska M. (2015). Does the Function of Railway Infrastructure Determine Qualitative and Quantitative Composition of Contaminants (PAHs, Heavy Metals) in Soil and Plant Biomass? *Water, Air, and Soil Pollution*, 226(8), 1-12.

- Motta R., Berretti R., Castagneri D., Dukić V., Garbarino M., Govedar Z., Lingua E., Maunaga Z., & Meloni F. (2011). Toward a definition of the range of variability of central european mixed fagus-abies-picea forests: The nearly steady-state forest of lom (Bosnia and Herzegovina). *Canadian Journal of Forest Research*, 41(9), 1871–1884.
- Muthusaravanan S., Sivarajasekar N., Vivek J. S., Paramasivan T., Naushad M., Prakashmaran J., Gayathri V., & Al-Duaij O. K. (2018). Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and enhancements. In *Environmental Chemistry Letters*, 16(4), 1339–1359. Springer Verlag.
- Nicolescu V. N., Rédei K., Mason W. L., Vor T., Pöetzelsberger E., Bastien J. C., Brus R., Benčat' T., Đodan M., Cvjetkovic B., Andrašev S., La Porta N., Lavnyy V., Mandžukovski D., Petkova K., Roženberger D., Wąsik R., Mohren G. M. J., Monteverdi M. C., Musch B., Klisz M., Perić S., Keça L., Bartlett D., Hernea C., & Pástor M. (2020). Ecology, growth and management of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.), a non-native species integrated into European forests. In *Journal of Forestry Research*, 31(4), 1081–1101. Northeast Forestry University.
- Padmavathiamma P. K., & Li L. Y. (2007). Phytoremediation technology: Hyperaccumulation metals in plants. In *Water, Air, and Soil Pollution*, 184(1–4), 105–126.
- Palowski B., Małkowska E., Kurtyka R., Szymanowska-Pułka J., Gucwa-Przepióra E., Małkowski Ł., Woźnica A., & Małkowski E. (2016). Bioaccumulation of heavy metals in selected organs of black locust (*Robinia pseudoacacia*) and their potential use as air contamination bioindicators. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(5), 2085–2096.
- Pignatti S. (2005). Valori di bioindicazione delle piante vascolari della flora d'Italia. *Braun-Blanquetia*, Camerino, 97.
- Regolamento (UE) 22 ottobre 2014, n. 1143 “recante disposizioni volte a prevenire e gestire l'introduzione e la diffusione delle specie esotiche invasive”.
- Schermann B., & Czóbel S. (2021). Investigation of the invasive plant infestation of the railway line between Gödöllő and Hatvan. *Columella: Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 8(1), 51–61.

- Sitzia T., Cierjacks A., de Rigo D., Caudullo G. (2016). *Robinia pseudoacacia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg.
- Stančić Z., Fiket Ž., & Vuger A. (2022). Tin and Antimony as Soil Pollutants along Railway Lines: A Case Study from North-Western Croatia. *Environments - MDPI*, 9(1).
- Tabacchi G., Di Cosmo L., Gasparini P., Morelli S. (2011). Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane. Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea. Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Trento.
- Wilkomirski B., Galera H., Sudnik-Wojcikowska B., Staszewski T., & Malawska M. (2012). Railway Tracks - Habitat Conditions, Contamination, Floristic Settlement - A Review. *Environment and Natural Resources Research*, 2(1).

SITOGRAFIA

- RFI, La rete oggi, visitato settembre 2023, <https://www.rfi.it/it/rete/la-rete-oggi.html>
- Regione Lombardia, Piante esotiche unionali e regionali, visitato settembre 2023, http://www.biodiversita.lombardia.it/index.php?option=com_content&view=article&id=215:c03&catid=89:flora
- SER, What is Ecological Restoration?, visitato settembre 2023, <https://ser-rrc.org/what-is-ecological-restoration/>
- Regione del Veneto, il Geoportale dei dati Territoriali, visitato settembre 2023, <https://idt2.regione.veneto.it/idt/downloader/download>
- Wikipedia, Ferrovia Mantova-Monselice, visitato ottobre 2023, https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Mantova-Monselice
- Wikipedia, Ferrovia Padova-Bassano, visitato ottobre 2023, https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Padova-Bassano
- Wikipedia, Ferrovia Padova-Bologna, visitato ottobre 2023, https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Padova-Bologna
- Wikipedia, Ferrovia Venezia-Udine, visitato ottobre 2023, https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrovia_Venezia-Udine

¹Fotografie di Flora Giulia Simonelli

ALLEGATO 1

Specie rinvenute nelle 42 aree di saggio, classificate quali specie native (Bartolucci et al., 2018) ed esotiche (Galasso et al., 2018). Classificazione delle specie nitrofile secondo il valore di bioindicazione di Elleberg (Pignatti, 2005, Domina et al., 2018) riguardante i nutrienti, considerando nitrofile le specie con un valore compreso tra 7 e 9; le specie X corrispondono a specie ad ampio spettro.

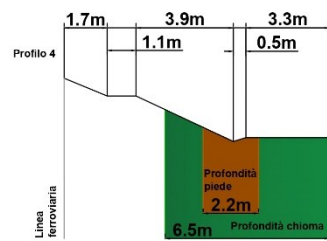
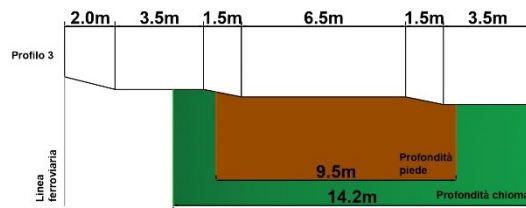
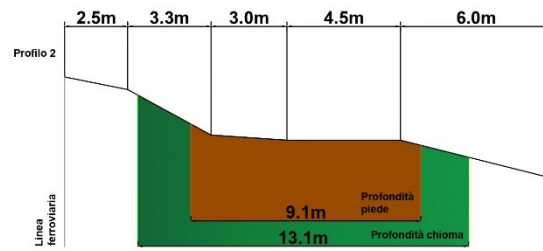
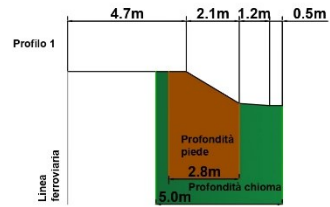
Specie	Esotica / Nativa	Nitrofila
<i>Acalypha virginica</i> L.	Esotica	Nitrofila
<i>Acer campestre</i> L.	Nativa	NULL
<i>Acer negundo</i> L.	Esotica	NULL
<i>Acer saccharinum</i> L.	Esotica	NULL
<i>Agropyron</i> spp	Esotica	Nitrofila
<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	Esotica	NULL
<i>Allium oleraceum</i> L.	Nativa	NULL
<i>Alliaria petiolata</i> (M.Bieb.) Cavara & Grande	Nativa	Nitrofila
<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	Esotica	Nitrofila
<i>Arctium minus</i> Schkuhr	Nativa	Nitrofila
<i>Aristolochia clematidis</i> L.	Nativa	Nitrofila
<i>Artemisia vulgaris</i> C.B. Clarke	Nativa	NULL
<i>Arum italicum</i> Mill.	Nativa	NULL
<i>Avena</i> spp	Nativa	NULL
<i>Ballota nigra</i> L.	Nativa	Nitrofila
<i>Brassica</i> spp	Nativa	NULL
<i>Brachypodium sylvaticum</i> (Huds.) P.Beauv.	Nativa	NULL
<i>Bromus</i> spp	Nativa	NULL
<i>Calamagrostis</i> spp	Nativa	NULL
<i>Capsella bursa-pastoris</i> Medik.	Nativa	NULL
<i>Carpinus betulus</i> L.	Nativa	X
<i>Carya glabra</i> (Mill.) Sweet	Esotica	NULL
<i>Carex</i> spp	Nativa	NULL
<i>Celtis australis</i> L.	Esotica	NULL
<i>Chenopodium album</i> L.	Nativa	Nitrofila
<i>Chelidonium majus</i> L.	Nativa	Nitrofila
<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	Nativa	Nitrofila
<i>Cirsium vulgare</i> (Savi) Ten.	Nativa	Nitrofila
<i>Clematis vitalba</i> L.	Nativa	Nitrofila
<i>Convolvulus arvensis</i> L.	Nativa	NULL
<i>Corylus avellana</i> L.	Nativa	Nitrofila
<i>Cornus sanguinea</i> L.	Nativa	X
<i>Crataegus monogyna</i> Jacq.	Nativa	NULL
<i>Crepis</i> spp	Nativa	NULL
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	Nativa	NULL
<i>Cyperus esculentus</i> L.	Esotica	NULL

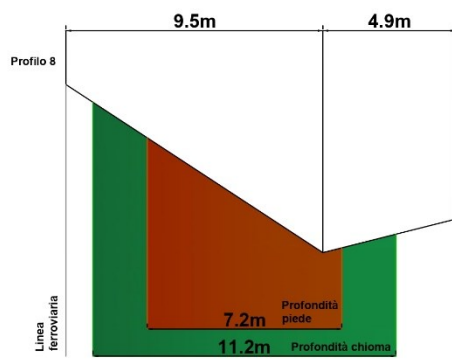
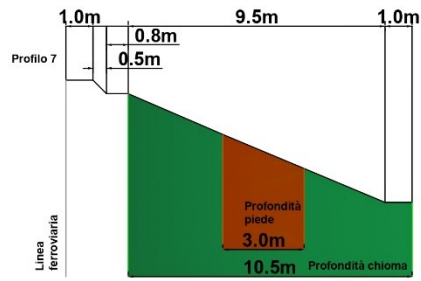
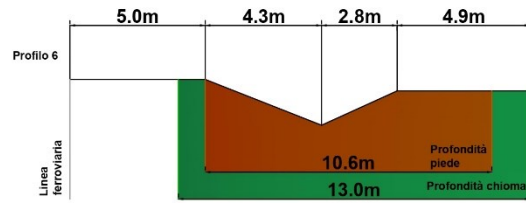
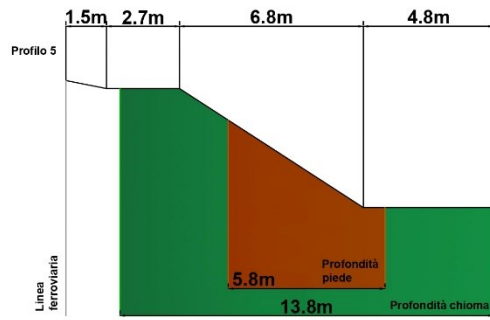
<i>Dioscorea communis (L.) Caddick & Wilkin</i>	Nativa	NULL
<i>Elaeagnus pungens Thunb.</i>	Esotica	NULL
<i>Epilobium tetragonum L.</i>	Nativa	NULL
<i>Equisetum arvense L.</i>	Nativa	NULL
<i>Equisetum hyemale L.</i>	Nativa	NULL
<i>Erigeron canadensis L.</i>	Esotica	Nitrofila
<i>Erigeron sumatrensis Retz.</i>	Esotica	NULL
<i>Euonymus europaeus L.</i>	Nativa	NULL
<i>Euonymus japonicus Thunb.</i>	Esotica	NULL
<i>Euphorbia lathyris L.</i>	Esotica	NULL
<i>Euphorbia maculata L.</i>	Esotica	NULL
<i>Euphorbia prostrata Aiton</i>	Esotica	NULL
<i>Festuca spp</i>	Nativa	NULL
<i>Fraxinus ornus L.</i>	Nativa	NULL
<i>Fragaria vesca L.</i>	Nativa	NULL
<i>Galium aparine L.</i>	Nativa	NULL
<i>Geum urbanum L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Glechoma hederacea L.</i>	Nativa	NULL
<i>Gleditsia triacanthos L.</i>	Esotica	NULL
<i>Hedera helix L.</i>	Nativa	X
<i>Hedera nepalensis K.Koch</i>	Esotica	X
<i>Hordeum marinum Huds.</i>	Nativa	NULL
<i>Humulus lupulus L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Juglans regia L.</i>	Esotica	NULL
<i>Lactuca spp</i>	Esotica	NULL
<i>Lamium orvala L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Lapsana communis L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Laurus nobilis L.</i>	Nativa	NULL
<i>Ligustrum lucidum W.T.Aiton</i>	Esotica	NULL
<i>Ligustrum ovalifolium Hassk.</i>	Esotica	NULL
<i>Ligustrum sinense Lour.</i>	Esotica	NULL
<i>Ligustrum vulgare L.</i>	Nativa	X
<i>Linaria vulgaris Mill.</i>	Nativa	NULL
<i>Lolium pratense (Huds.) Darbysh.</i>	Nativa	NULL
<i>Lonicera japonica Thunb.</i>	Esotica	NULL
<i>Luzula spp</i>	Nativa	NULL
<i>Malva multiflora (Cav.) Soldano, Banfi & Galasso</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Melica ciliata L.</i>	Nativa	NULL
<i>Morus nigra L.</i>	Esotica	NULL
<i>Oxalis stricta L.</i>	Esotica	NULL
<i>Parietaria officinalis L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Parthenocissus quinquefolia (L.) Planch.</i>	Esotica	NULL
<i>Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud.</i>	Nativa	NULL
<i>Phytolacca americana L.</i>	Esotica	NULL
<i>Plantago lanceolata L.</i>	Nativa	X

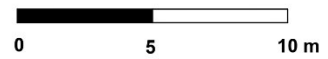
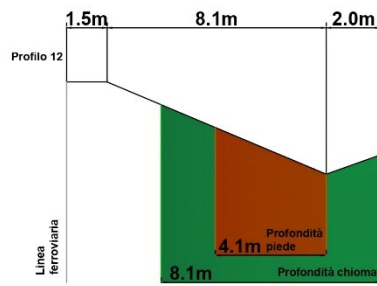
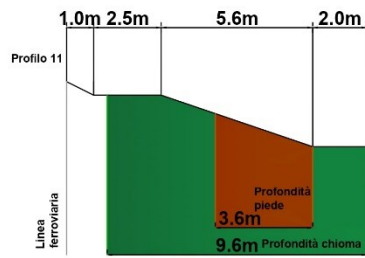
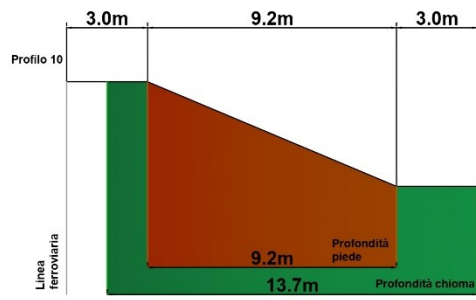
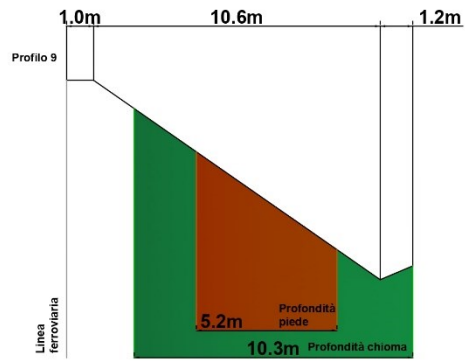
<i>Platanus spp</i>	Esotica	NULL
<i>Populus nigra L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Potentilla indica (Andrews) Th.Wolf</i>	Esotica	NULL
<i>Potentilla reptans L.</i>	Nativa	NULL
<i>Prunus cerasifera Ehrh.</i>	Esotica	NULL
<i>Prunus domestica L.</i>	Esotica	NULL
<i>Prunus laurocerasus L.</i>	Esotica	NULL
<i>Prunus spinosa L.</i>	Nativa	X
<i>Prunus spp</i>	Nativa	NULL
<i>Quercus ilex L.</i>	Nativa	X
<i>Quercus robur L.</i>	Nativa	NULL
<i>Robinia pseudoacacia L.</i>	Esotica	Nitrofila
<i>Rubus spp</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Salix alba L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Salix myrsinifolia Salisb.</i>	Nativa	NULL
<i>Sambucus nigra L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Saponaria officinalis L.</i>	Nativa	NULL
<i>Scabiosa atropurpurea L.</i>	Esotica	NULL
<i>Setaria italica (L.) P.Beauv.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Setaria verticillata (L.) P.Beauv.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Silene noctiflora L.</i>	Nativa	NULL
<i>Solanum nigrum L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Sonchus arvensis L.</i>	Nativa	X
<i>Sorghum halepense (L.) Pers.</i>	Esotica	Nitrofila
<i>Stachys palustris L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Taraxacum spp</i>	Nativa	NULL
<i>Torilis arvensis (Huds.) Link</i>	Nativa	NULL
<i>Trachycarpus fortunei (Hook.) H.Wendl.</i>	Esotica	NULL
<i>Trifolium pratense L.</i>	Nativa	X
<i>Ulmus minor Mill.</i>	Nativa	X
<i>Ulmus pumila L.</i>	Esotica	NULL
<i>Urtica dioica L.</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Urtica spp</i>	Nativa	Nitrofila
<i>Verbena officinalis L.</i>	Nativa	NULL
<i>Viola spp</i>	Nativa	NULL
<i>Vitis vinifera L.</i>	Nativa	NULL

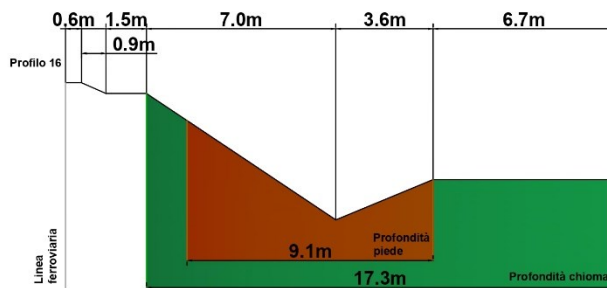
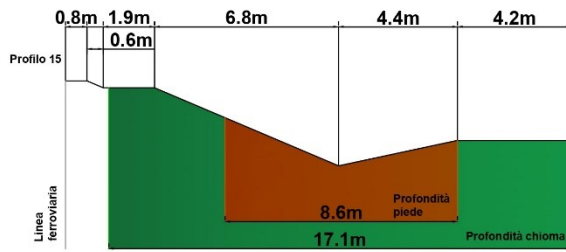
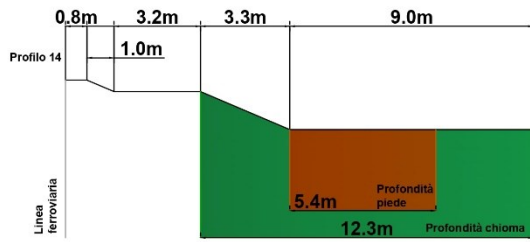
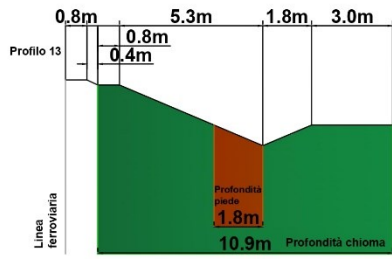
ALLEGATO 2

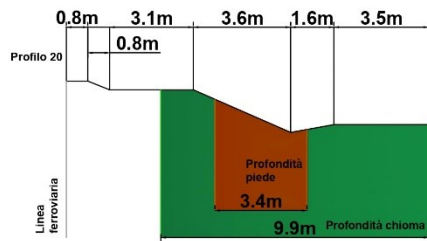
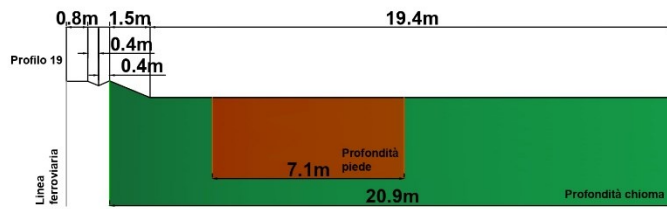
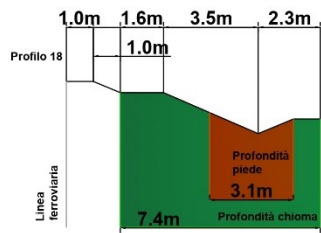
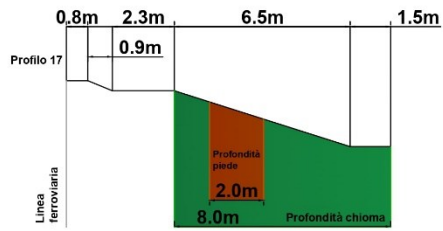
Profili delle scarpate ferroviarie delle 42 aree di saggio.

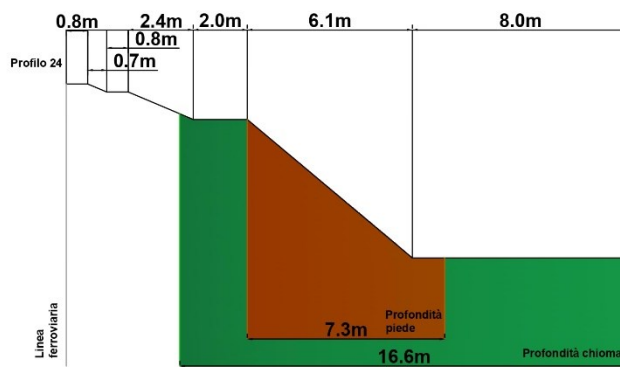
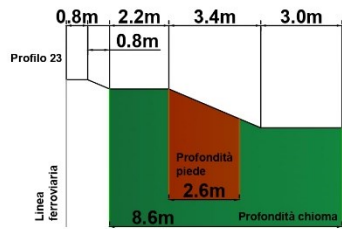
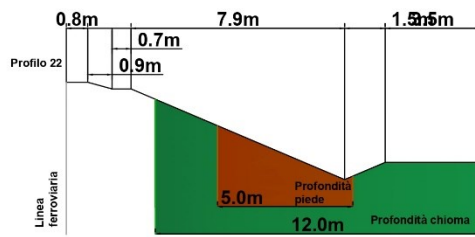
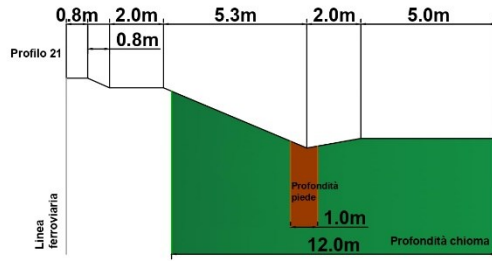


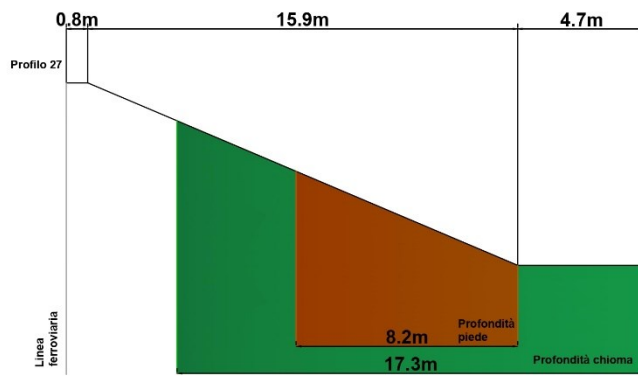
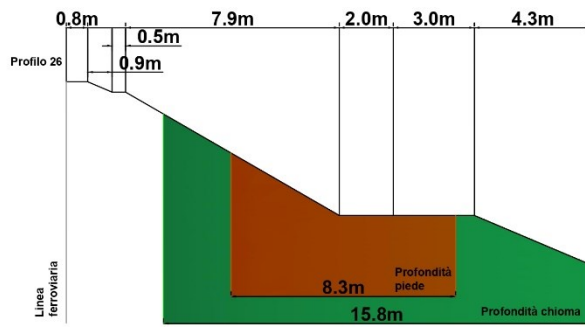
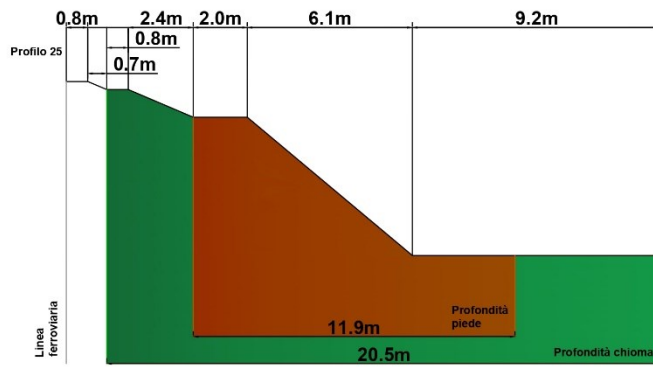


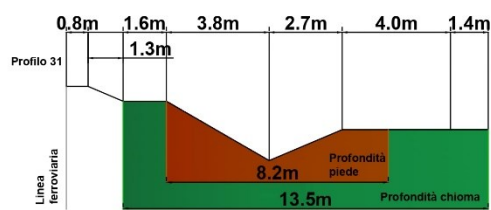
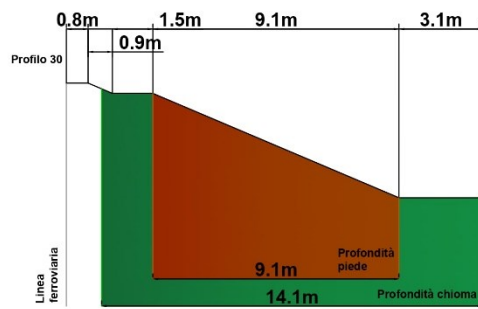
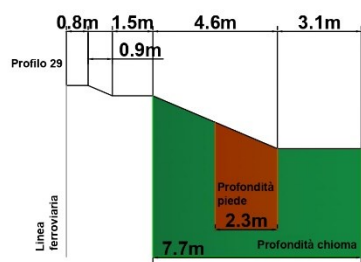
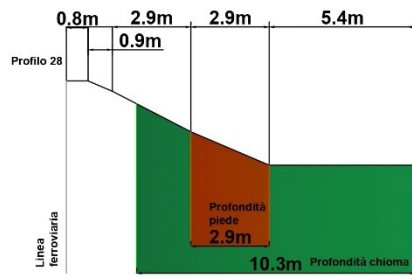


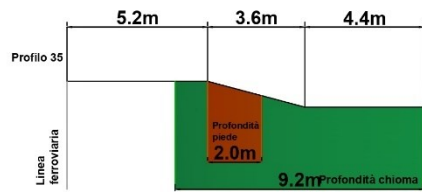
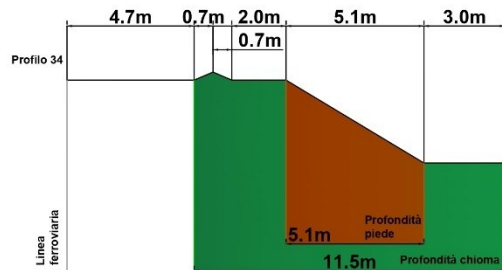
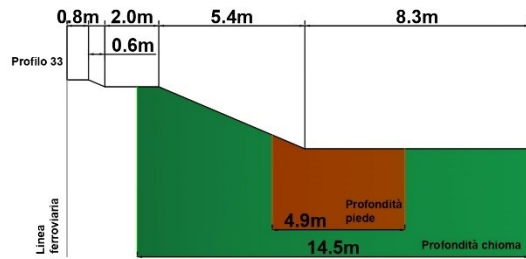
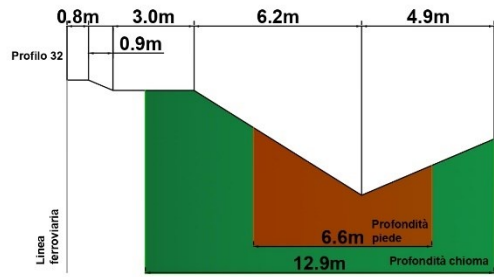


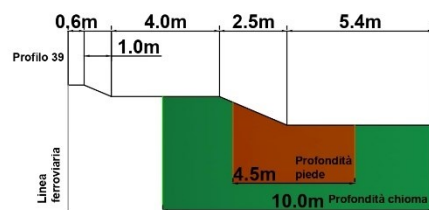
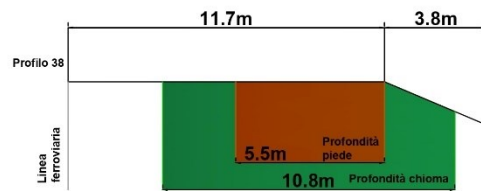
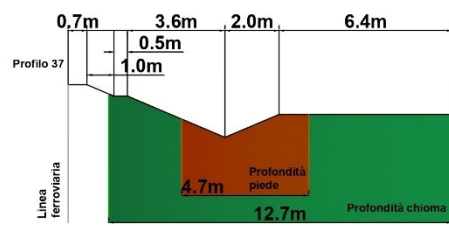
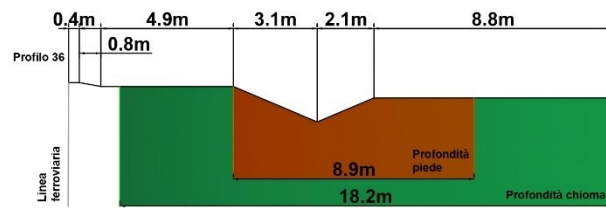


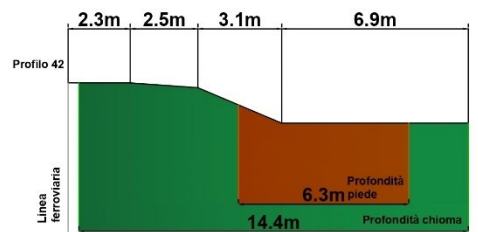
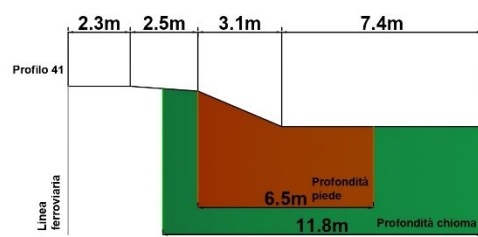
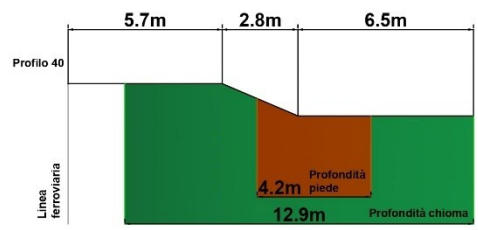






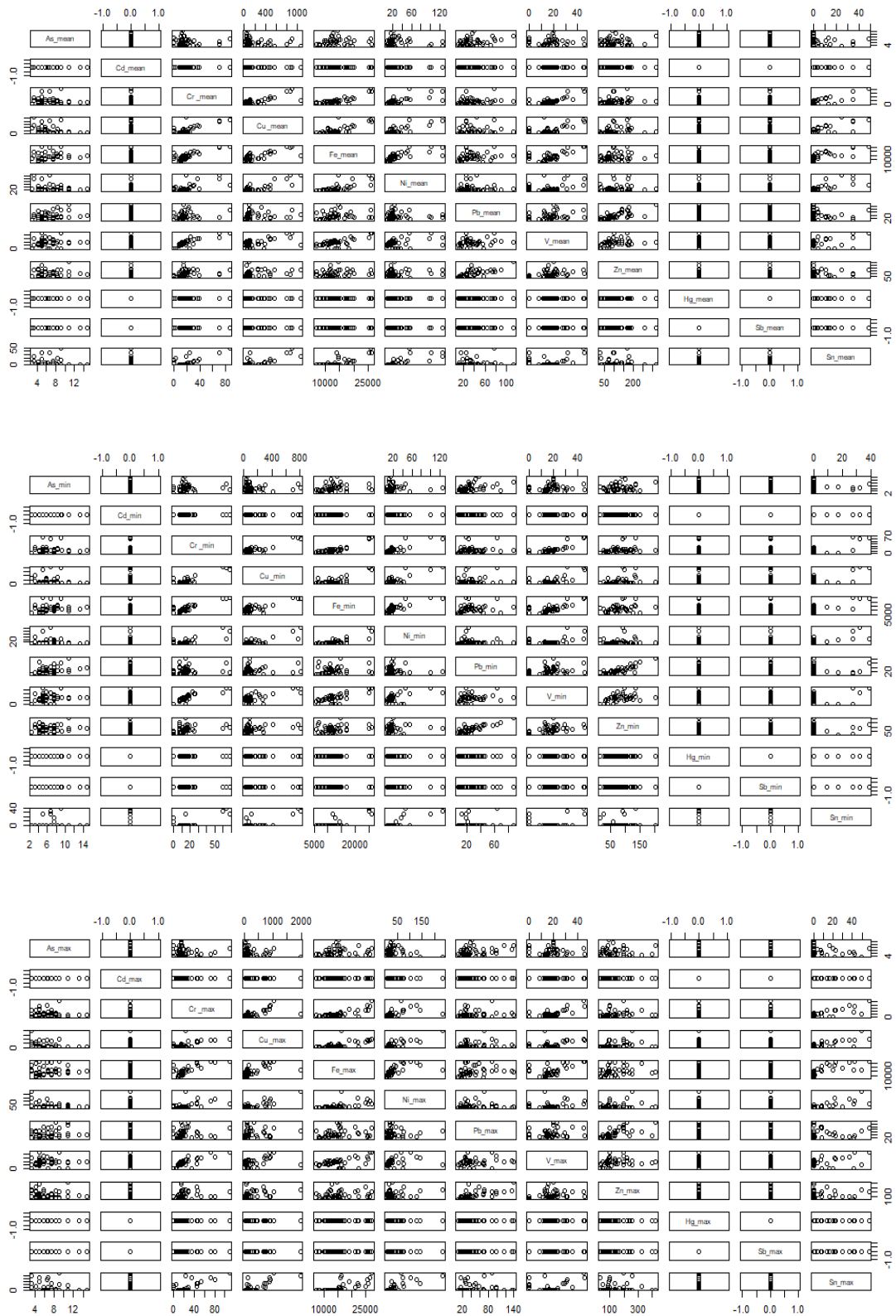






ALLEGATO 3

Analisi multicorrelazione tra i valori medi, minimi e massimi per area di saggio.



ALLEGATO 4

Correlazione delle concentrazioni dei contaminanti nel suolo con le variabili della struttura del popolamento delle formazioni lineari.

