

1222·2022  
**800**  
ANNI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

**DIFFERENZE STRUTTURALI TRA PIANTE PRODUTTIVE E  
NON PRODUTTIVE IN UNA TARTUFAIA COLTIVATA**

Relatore: Prof. Gaii Petit

Correlatore: Dott.ssa Alessia Sartori

Dott. Enrico Vidale

Laureando: Alessandro Carmelo

N° Matricola: 1222260

Anno accademico: 2021-2022



## Sommario

Riassunto .....	5
1 Introduzione.....	7
2 Materiali e metodi .....	12
2.1 Area di studio.....	12
2.2 Rilievi .....	13
2.3 Analisi dei dati.....	16
2.4 Cartografia .....	17
3 Risultati .....	18
3.1 Curva ipsometrica.....	18
3.2 Volume di chioma e diametro .....	20
3.3 Volume di chioma e altezza.....	22
3.4 Volume di fusto e volume di chioma.....	24
3.5 Mappa .....	27
4 Discussione e conclusioni.....	29
5 Bibliografia.....	31



## Riassunto

Gli alberi, successivamente a periodi di stress idrico, tendono a rilasciare maggiori quantità di carbonio per essudazione radicale. Questi essudati sono in grado di stimolare la formazione di legami simbiotici fra piante e funghi.

Da recenti studi, sembrerebbe che le piante in simbiosi abbiano una maggior efficienza nell'uso dell'acqua. In altre parole, durante periodi di siccità, queste mantengono livelli idrici quasi costanti all'interno del fusto, rispetto quelle prive di legami simbiotici.

Questo perché sono in grado di osmoregolare, concentrando zuccheri durante tali periodi, per poi rilasciarne una parte sotto forma di essudati durante la fase di recupero.

Non si conosce ancora dove possa essere destinata parte del surplus di carbonio.

Si ipotizza che gli alberi in simbiosi siano in grado di impiegare parte del surplus di carbonio per accrescersi.

Per verificare tale ipotesi, sono stati misurati i parametri dendrometrici (diametro, altezza, volume di chioma) di alberi presenti all'interno di una tartufaia coltivata, al fine di verificare se vi sia una differenza di accrescimento tra piante micorrizzate e non micorrizzate.

È emerso che non vi è una differenza significativa di accrescimento tra piante produttive e non produttive. Il surplus di carbonio all'interno delle piante micorrizzate non è quindi impiegato per la crescita degli organi.

In conclusione, la differenza di accrescimento tra piante produttive e non produttive sembra non essere significativa. Il surplus di carbonio delle piante produttive è forse parzialmente destinato alla crescita dei tartufi.

## Abstract

Trees usually exude more carbon after water stress periods. These exudates stimulate the formation of symbiotic bonds between plants and fungi.

Recent studies show that plants in symbiosis have a good water use efficiency. In other words, during drought periods, they are able to maintain their stem well hydrated.

This is because they are able to osmoregulate, concentrating sugars during that periods and releasing part of them in the form of exudates during recovery stage.

The hypothesis is: trees in symbiosis should be able to use part of the carbon surplus to grow. To verify the hypothesis, we measured dendrometric parameters (diameter, height, canopy volume) of trees inside a cultivated truffle orchard, in order to see if there are differences between mycorrhizal plants and non-mycorrhizal plants.

The results show that there isn't a significant difference of growth between productive and non-productive trees. The carbon surplus inside productive plants isn't used for the growth.

To conclude, the growth differences between productive and non-productive trees, isn't relevant. Carbon surplus of productive plants could be partially allocated to truffles.

# 1 Introduzione

Gli alberi crescono, ed aumentano quindi di dimensioni, grazie al carbonio fissato durante il processo fotosintetico.

La velocità di crescita dipende da diverse variabili, come la quota, la temperatura, la radiazione, il tasso di precipitazioni, la fertilità del suolo, la specie. Ad esempio, alberi che si trovano a quote elevate o ad alte latitudini ed esposti a temperature rigide, generalmente crescono in misura minore in termini di carbonio fissato rispetto alle specie delle foreste pluviali, con disponibilità idrica abbondante e in condizioni di suolo fertile, oltre che temperature elevate.

Crescono in misura differente per via di molteplici fattori climatici, ambientali, stagionali.

L'accrescimento degli alberi è però anche influenzato, oltre che dagli stimoli abiotici sopra citati, anche da interazioni biotiche.

È stato studiato come gli alberi siano capaci di emettere particolari segnali chimici verso la rizosfera sotto forma di molecole specifiche, chiamate essudati radicali (Brunner et al. 2015).

Tali essudati sono principalmente molecole composte da uno scheletro carbonioso. Comprendono polisaccaridi, amminoacidi, flavonoidi e acidi organici, oltre che altre molecole ad elevato peso atomico, come gli enzimi (Bertin et al 2003).

Si ipotizza che gli essudati possano assolvere a diverse funzioni, ad esempio la protezione delle cellule degli apici radicali in periodi di debolezza (Baetz and Martinoia 2014), di fungere da lubrificante per facilitare la penetrazione delle radici al suolo, oltre che a interagire con i microrganismi del suolo (Bertin et al. 2003).

Grazie all'emissione di queste sostanze, sembra che le piante siano capaci di modificare le comunità microbiche a proprio vantaggio, condizionando anche la formazione di simbiosi micorriziche (Williams and de Vries 2019).

Gli essudati radicali possono contenere sostanze chimiche in grado di stimolare lo sviluppo della simbiosi con i funghi (Dakora and Phillips 2002).

Inoltre, sembra che queste simbiosi s'instaurino più facilmente in periodi successivi all'emissione di essudati radicali da parte della pianta (van Dam et al. 2016).

Un aspetto particolarmente interessante, è che un basso livello idrico al suolo, sembrerebbe favorire la micorrizzazione (Bonet et al. 2006).

Le simbiosi micorriziche sono dette di tipo mutualistico, avvantaggiano cioè entrambi gli organismi coinvolti attraverso lo scambio reciproco di nutrienti e acqua.

Le micorrize, grazie alla maggior superficie di scambio rispetto alle radici normali, hanno la capacità di assorbire N, P, Zn, Mg e Cu in maggiori quantità e sono poi in grado di cederle alla pianta (Nuti and Sbrana 2013).

La pianta invece cede al fungo carbonio in forma organica.

Uno studio condotto su *Tuber melanosporum* Vittad. in associazione con *Quercus ilex* L, dimostra che le piante micorrizzate, in condizioni standard, possiedono valori più elevati in termini di assimilazione netta di carbonio e di conduttanza stomatica rispetto quelle non in simbiosi (Nardini et al. 2000).

È importante approfondire la conoscenza delle strategie che le piante adottano per far fronte alla siccità anche alla luce dei cambiamenti climatici in atto, con il fine di salvaguardare l'ecosistema foresta e di capire come trarre vantaggio dalle simbiosi durante tali periodi.

Infatti, si è studiato che in seguito a periodi di stress idrico più o meno prolungato, il carbonio allocato dalla pianta per la produzione di essudati è relativamente maggiore rispetto quello impiegato per la produzione di biomassa (Preece et al. 2018).

Secondo un'ipotesi sviluppata dal gruppo di ricerca coinvolto in questo lavoro, è stato individuato un pattern nei picchi di produzione di una tartufaia che evidenzia come la pianta necessiti di un periodo di stress idrico per raggiungere una produzione maggiore (Figura 1.1).

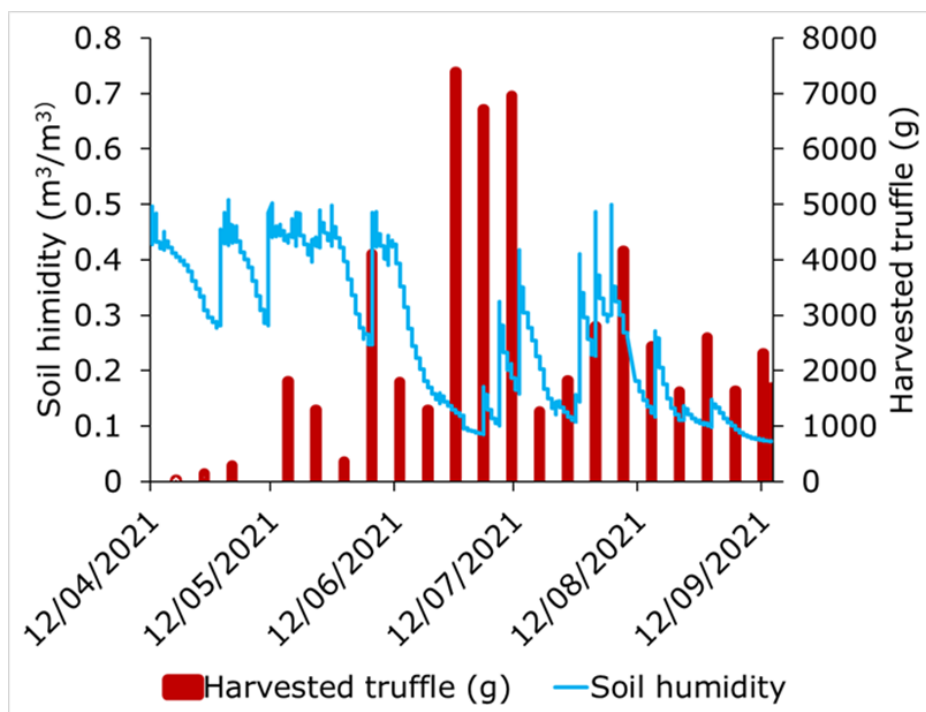
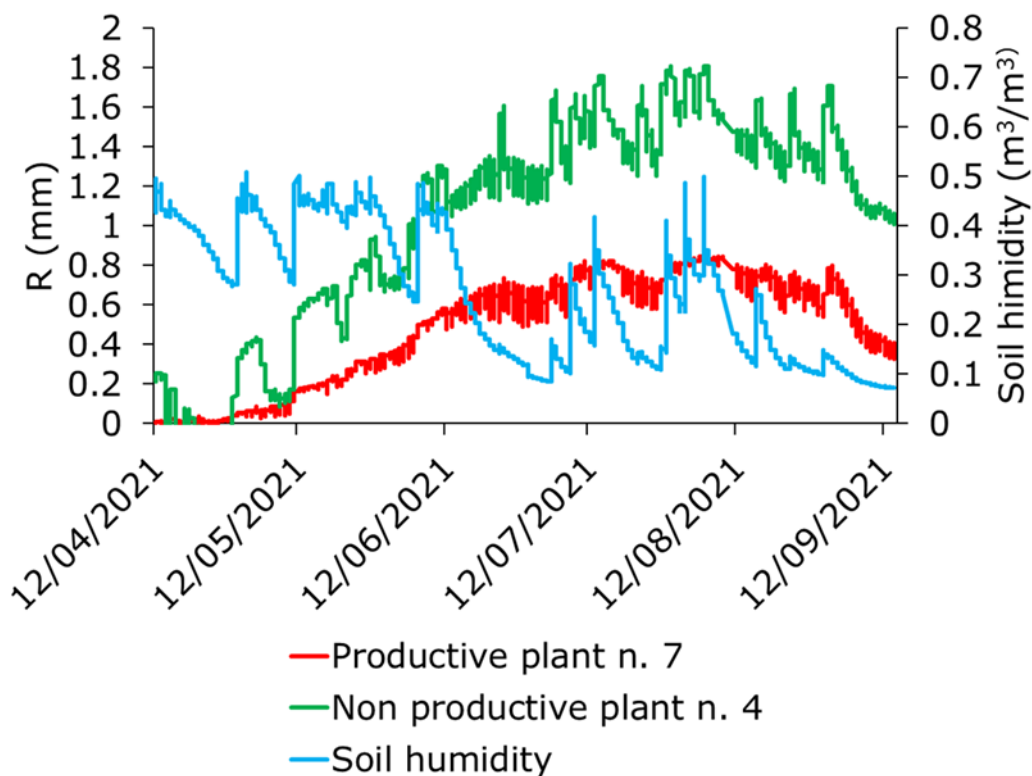


Figura 1.1: Andamento della produzione in relazione ai picchi di umidità del suolo e siccità. Le colonne in rosso indicano la quantità di tartufi prelevati ogni settimana, in blu è indicato l'andamento del contenuto di umidità del suolo.



Inoltre, si è visto come le piante in simbiosi con i tartufi, durante periodi di siccità, non variano in modo sostanziale il loro contenuto idrico all'interno del fusto, invece al contrario, quelle non micorrizzate presentano dei cicli di idratazione e disidratazione in stretta relazione con l'andamento dell'umidità del suolo (Figura 1.2).



*Figura 1.2: Oscillazioni del raggio del fusto in funzione dell'andamento dell'umidità del suolo tra piante produttive e non produttive. In blu è rappresentato l'andamento di umidità del suolo, in rosso l'andamento dell'umidità nel fusto delle piante produttive, in verde l'andamento dell'umidità nel fusto delle piante non produttive.*

Questo è riconducibile al fatto che le piante produttive hanno una buona capacità di osmoregolazione che consente loro di mantenere un livello idrico costante al proprio interno. Infatti, i cicli di stress idrico e recupero comportano una concentrazione di zuccheri maggiore durante i periodi di deficit idrico e il rilascio di essudati radicali durante il periodo di recupero. Durante i periodi successivi allo stress, le piante produttive si ritroveranno in una condizione di surplus di carbonio, perché durante la fase di recupero l'umidità del suolo aumenta e, per

mantenere il potenziale idrico tra foglie e radici, parte di questo sarà espulso dalle radici sottoforma di essudati radicali.

Per cui è possibile che parte del surplus di carbonio sia trattenuto dalla pianta ed impiegato per un maggior accrescimento degli organi?

Per rispondere a questa domanda, si è deciso di studiare come la simbiosi tra pianta (*Ostrya carpinifolia* Scop.) e tartufo (*Tuber aestivum* Vittad.) implichi o no una differenza di accrescimento epigeo.

Il notevole valore economico e la versatilità di questa specie di tartufo spingono sempre più la ricerca verso l'approfondimento dei rapporti che vi sono tra pianta e fungo, al fine di trarne il massimo potenziale in termini di produttività.

L'obiettivo che questo lavoro si pone è di verificare se le piante produttive abbiano oppure no un maggiore accrescimento negli organi rispetto quelle non produttive, per confermare oppure escludere un possibile impiego del surplus di carbonio nelle strutture della pianta.



## 2 Materiali e metodi

### 2.1 Area di studio

L'area di studio si trova nella fascia pedemontana della provincia di Vicenza.

Riguarda un impianto boschivo artificiale di 22 anni di età con prevalenza di *Ostrya carpinifolia* Scop. e presenza di altre specie forestali accessorie capaci di instaurare rapporti micorrizici con il tartufo, come *Fagus sylvatica* L.

La densità della tartufaia è molto elevata: il sesto d'impianto è di 2x2.5, e questo ha determinato un forte accrescimento in altezza degli esemplari.

Il fatto di eseguire uno studio su un impianto artificiale permette di uniformare pressoché tutte le variabili, come ad esempio le condizioni micro-stazionali, la pendenza e la posizione delle piante nello spazio.

Il tartufo presente all'interno dell'impianto è il *Tuber aestivum* Vittad, comunemente chiamato scorzone (Figura 2.1). È un ascomicete a crescita ipogea appartenente alla famiglia delle *Tuberaceae*. Il suo periodo riproduttivo coincide con l'estate.



Figura 2.1: esemplari di *Tuber aestivum* Vitt. <https://www.mondofunghi.com/wp-content/uploads/2018/11/tuber-aestivum.jpg>

La simbiosi micorrizica di questa specie può instaurarsi su svariate specie arboree forestali quali: carpino bianco (*Carpinus betulus* L.); nocciolo (*Corylus avellana* L.); roverella (*Quercus pubescens* Willd.); farnia (*Quercus robur* L.); rovere (*Quercus petraea* Liebl.); faggio (*Fagus sylvatica* L.); leccio (*Quercus ilex* L.); pino nero (*Pinus nigra* J.F.Arnold); pino laricio (*Pinus nigra* var. *laricius* Maire); carpino nero (*Ostrya carpinifolia* Scop.) (Nutti and Sbrana 2013).

Il micelio si sviluppa prevalentemente su terreni a pH basico o sub-alcalino, in prossimità dello strato superficiale, dove si accrescono anche i suoi ascomi, che spesso possono affiorare parzialmente dal terreno.

L'assenza di vegetazione erbacea al di sotto della proiezione di chioma, è sintomo dell'entrata in produzione della pianta. Tale zona è comunemente chiamata "pianello" (Nutti and Sbrana 2013).

Lo scorzone possiede un importante valore economico: il suo prezzo oscilla tra i 100€ e i 300€ al kg (<https://www.tartufo.com/it/prezzi-tartufo/>).

Da alcuni studi, come quello svolto presso il Sannio (Marotta and Varricchio 2007), è emerso che, rispetto altre specie di tartufo, questa si adatta più facilmente a diverse caratteristiche climatiche (si sviluppa da 0 fino a 1000 msl), oltre che di composizione fisica e chimica del suolo.

## 2.2 Rilievi

Per effettuare il cavallettamento totale della tartufaia, il diametro (D) è stato misurato a petto d'uomo, cioè a 1,30m dalla base del fusto. La posizione e la quota di ogni singolo albero sono state rilevate con l'ausilio di un ricevitore GPS, attraverso un tipo di rilievo cinematico (RTK: real time kinematic).

Le coordinate di ogni singolo albero sono state rilevate collocandosi con le spalle rivolte verso monte e posizionando il puntale dell'asta sulla base del fusto, in modo che la posizione e la quota si riferissero ad essa (Figura 2.1).



*Figura 2.2: rilievo Gps in tartufaia*

Le misure di altezza ( $H$ ) e dell'altezza di inserzione di chioma ( $H_c$ ) sono state effettuate utilizzando l'ipsometro laser Trupulse (Figura 2.2).  $H_c$  è stata misurata in prossimità delle prime gemme poste in rami laterali, che si trovavano più vicine al terreno.





*Figura 3: rilievo altezze e altezza d'inserzione di chioma*

Per il rilievo del raggio di chioma ( $R_c$ ) sono state seguite le linee in lunghezza e larghezza dell'impianto, rilevando per ciascuna direzione la misura del raggio di ogni chioma. La media dei due valori misurati fornisce il valore di  $R_c$ .

Si è utilizzato un distanziometro laser per misurare la distanza orizzontale tra i due operatori posizionati sulla verticale proiettata dalla chioma.

Le misure di  $H$ ,  $H_c$  e  $R_c$  sono state eseguite all'inizio della stagione vegetativa (tra marzo e l'inizio di aprile), in modo da riuscire ad avere sufficiente visibilità tra le chiome per intravedere con maggiore facilità l'apice della chioma e i rami laterali.

## 2.3 Analisi dei dati

Dai dati rilevati in campo, si è calcolata la lunghezza di chioma ( $L_c$ ) attraverso la formula:

$$L_c = H - H_c \quad (\text{eq1})$$

Per il calcolo del volume di chioma ( $V_c$ ) si è utilizzata la formula:

$$V_c = \pi \times R_c^2 \times L_c \quad (\text{eq2})$$

Si è calcolato infine il volume del fusto ( $V_f$ ) con la formula:

$$V_f = \pi \times (D/2)^2 \times H \quad (\text{eq3})$$

La chioma e il fusto sono stati assunti di forma cilindrica e i coefficienti di forma considerati costanti con la crescita.

I dati sono stati trasformati in  $\log_{10}$  e le rette di regressione lineare stimate con modelli lineari ad effetti misti tramite il pacchetto “*lme*” del software R.

Un Linear Mixed-Effect Model è un modello statistico che usa sia fixed effects che random effects, in questo caso rappresentati dalla variazione data dalle singole piante (abbiamo infatti usato l'ID come random effect all'interno del modello). Come fixed effects sono stati utilizzati la specie e la produttività (P o NP).

Sono stati creati due differenti modelli: uno considera le interazioni tra i fattori, mentre il secondo non considera tali interazioni.

Per determinare il modello più attendibile fra i due, è stato scelto il modello con il valore dell'indice AIC (Akaike's Information Criterion) più basso.

Tale indice fornisce una misura della qualità della stima del modello statistico considerando i parametri di bontà di adattamento e complessità del modello.



## 2.4 Cartografia

Utilizzando il software di cartografia Q-gis, sono stati caricati i dati raccolti in campo attraverso il rilievo RTK, relativi alle coordinate e la quota delle ceppaie di ciascun albero interno alla tartufaia.

Attraverso la funzione “join”, si sono uniti i dati riferiti ai parametri dendrometrici misurati in campo e calcolati attraverso Excel.

In questo modo si sono rese visibili graficamente le piante produttive e quelle non produttive. Inoltre, è stata creata una mappa di concentrazione per far risaltare la densità per unità di superficie e la distribuzione spaziale relativa ai volumi di chioma (Figura 3.8).

### 3 Risultati

#### 3.1 Curva ipsometrica

È stata realizzata la curva ipsometrica (Figura 3.2) relativa alle piante produttive e non produttive, con rappresentate le relative linee di tendenza.

Il secondo modello, senza interazioni tra ID e specie, è risultato più attendibile (Tabella 3.1).

Dalla statistica (Figura 4.1) si evince che, a parità di diametro, non vi è una maggiore crescita in altezza delle piante produttive rispetto quelle non produttive.

L'indice  $R^2$  suggerisce una buona significatività del modello statistico.

	Model 1	Model 2
Indice AIC	-1037.45	-1043.19

Tabella 3.1: relativa agli indici AIC ottenuti dall'output lineare a effetti misti della relazione  $\log_{10}H$  vs.  $\log_{10}D$ . Sono stati considerati i modelli aventi i valori minori, in questo caso è stato selezionato il "Model 2"

```
> #model 2 with NO interaction
> mod2<-lme(log10(Hmax) ~ log10(Dcum)+Stato+Specie,
+          random=~1|ID, data=data)
> summary(mod2)
Linear mixed-effects model fit by REML
Data: data
      AIC      BIC    logLik
-1043.194 -1005.299  530.5972

Random effects:
Formula: ~1 | ID
      (Intercept) Residual
StdDev:  0.07657906 0.0287166

Fixed effects:  log10(Hmax) ~ log10(Dcum) + Stato + Specie
      value Std.Error DF  t-value p-value
(Intercept)  0.7470586 0.05218889 498 14.314513 0.0000
log10(Dcum)  0.3404763 0.01896415 498 17.953684 0.0000
Statoprod   0.0125123 0.00756947 498  1.653000 0.0990
SpecieCB    0.0270576 0.09464115 498  0.285896 0.7751
SpecieFS   -0.2817532 0.05044156 498 -5.585735 0.0000
SpecieOC   -0.0117831 0.04742065 498 -0.248480 0.8039
SpeciePA   -0.3069708 0.07485877 498 -4.100666 0.0000
Correlation:
      (Intr) l10(D) Sttprd speccB specFS specOC
log10(Dcum) -0.423
Statoprod   -0.022 -0.063
SpecieCB    -0.465  0.038 -0.055
SpecieFS    -0.941  0.216  0.028  0.473
SpecieOC    -0.918  0.042 -0.021  0.499  0.940
SpeciePA    -0.600  0.065  0.030  0.315  0.606  0.630

Standardized within-Group Residuals:
      Min      Q1      Med      Q3      Max
-1.95226780 -0.14558175  0.05391269  0.22218063  0.84014809

Number of Observations: 505
Number of Groups: 505
> R2<-r.squaredGLMM(mod2)
> R2
      R2m      R2c
[1,] 0.7207689 0.9655754
```

Figura 4.1: output del modello lineare a effetti misti della relazione  $\log_{10}H$  vs.  $\log_{10}D$

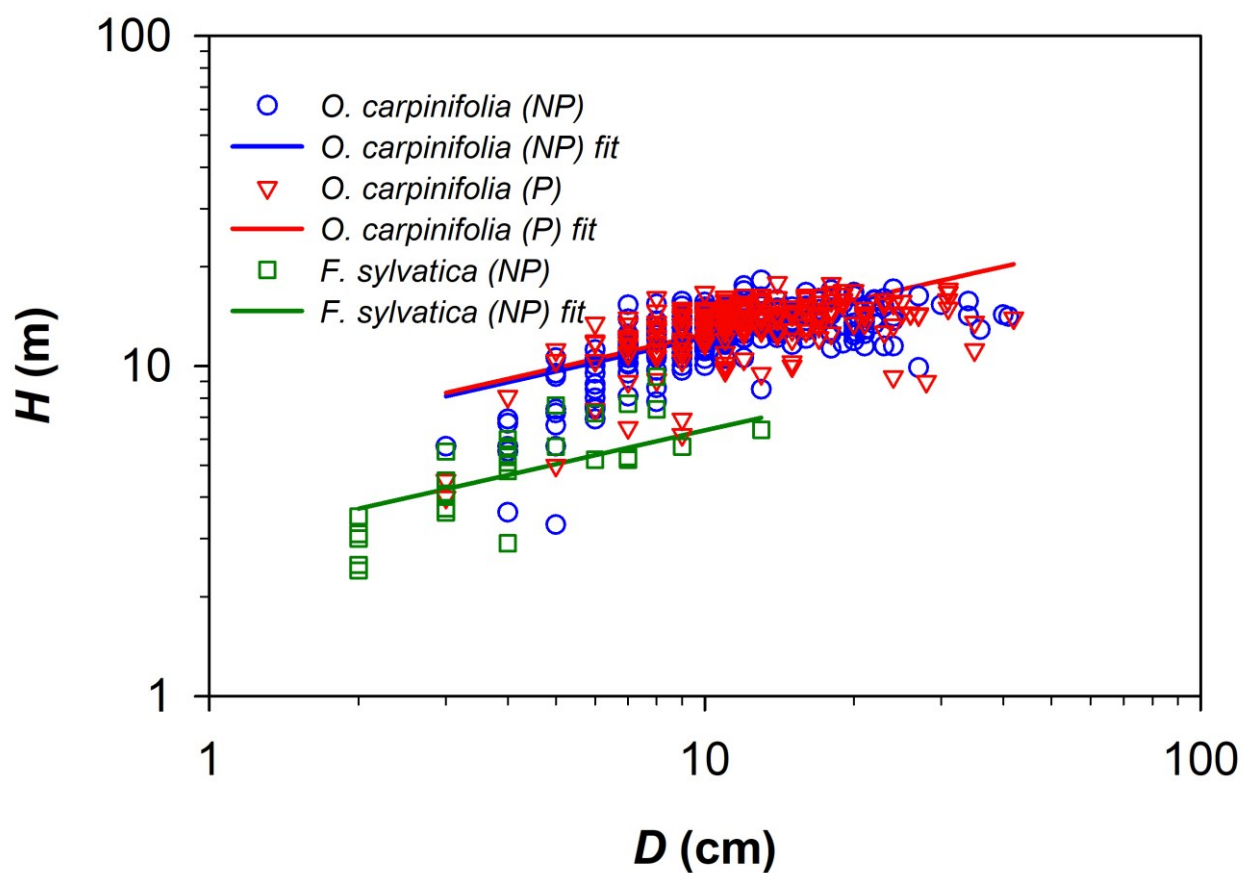


Figura 3.2: relazione tra H e D. Le linee di tendenza sono riferite alle diverse specie e a piante produttive e non produttive.

Linea di tendenza	Equazione della linea di tendenza
Carpino NP	$y = 5,585x^{0,34}$
Carpino P	$y = 5,741x^{0,34}$
Faggio NP	$y = 2,917x^{0,34}$

Tabella 3.2: equazioni delle linee di tendenza relative al grafico in Figura 3.2

Sono state calcolate media e deviazione standard di diametro e altezza per le piante produttive e quelle non produttive.

Nonostante il popolamento sia coetaneo, la variabilità diametrica, definita dalla deviazione standard, risulta essere ampia.

### 3.2 Volume di chioma e diametro

La relazione iniziale rapporta i valori di volume di chioma ( $V_c$ ), con i valori di Diametro ( $D$ ).

Dalla statistica risulta più attendibile il secondo modello (Tabella 3.3).

Si evince che le piante produttive, a parità di diametro, hanno un volume di chioma maggiore. Lo giustifica il valore di p-value pari a  $0,0320 < 0,05$  (soglia di rifiuto dell'ipotesi nulla) (Figura 3.3).

	<i>Model 1</i>	<i>Model 2</i>
<i>Indice AIC</i>	241,34	237,64

*Tabella 3.3: relativa agli indici AIC ottenuti dall'output lineare a effetti misti della relazione  $\log_{10}V_c$  vs.  $\log_{10}D$ . Sono stati considerati i modelli aventi i valori minori, in questo caso è stato selezionato il "Model 2"*

```

> #model 2 with NO interaction
> mod2<-lme(log10(vctot) ~ log10(Dcum)+Stato+Specie,
+          random=~1|ID, data=data)
> summary(mod2)
Linear mixed-effects model fit by REML
Data: data
      AIC      BIC    logLik
237.6388 275.5342 -109.8194

Random effects:
Formula: ~1 | ID
      (Intercept) Residual
StdDev:  0.2770778 0.1039042

Fixed effects:  log10(vctot) ~ log10(Dcum) + Stato + Specie
              value Std.Error  DF   t-value p-value
(Intercept)  0.9489447 0.1888299 498   5.025394 0.0000
log10(Dcum)  1.3079101 0.0686161 498  19.061268 0.0000
Statoprod    0.0589060 0.0273879 498   2.150808 0.0320
SpecieCB    -0.2034350 0.3424307 498  -0.594091 0.5527
SpecieFS     0.1619000 0.1825077 498   0.887086 0.3755
SpecieOC    -0.1925343 0.1715775 498  -1.122142 0.2623
SpeciePA    -0.0319846 0.2708541 498  -0.118088 0.9060
Correlation:
      (Intr) l10(D) sttprd speccB specFS specOC
log10(Dcum) -0.423
Statoprod   -0.022 -0.063
SpecieCB    -0.465  0.038 -0.055
SpecieFS    -0.941  0.216  0.028  0.473
SpecieOC    -0.918  0.042 -0.021  0.499  0.940
SpeciePA    -0.600  0.065  0.030  0.315  0.606  0.630

Standardized within-Group Residuals:
      Min      Q1      Med      Q3      Max
-1.0757922 -0.2061327  0.0157282  0.2301968  1.0287454

Number of Observations: 505
Number of Groups: 505
> R2<-r.squaredGLMM(mod2)
> R2
      R2m      R2C
[1,] 0.4495416 0.9321353

```

Figura 3.3: output del modello lineare a effetti misti della relazione  $\log_{10}Vc$  vs.  $\log_{10}D$

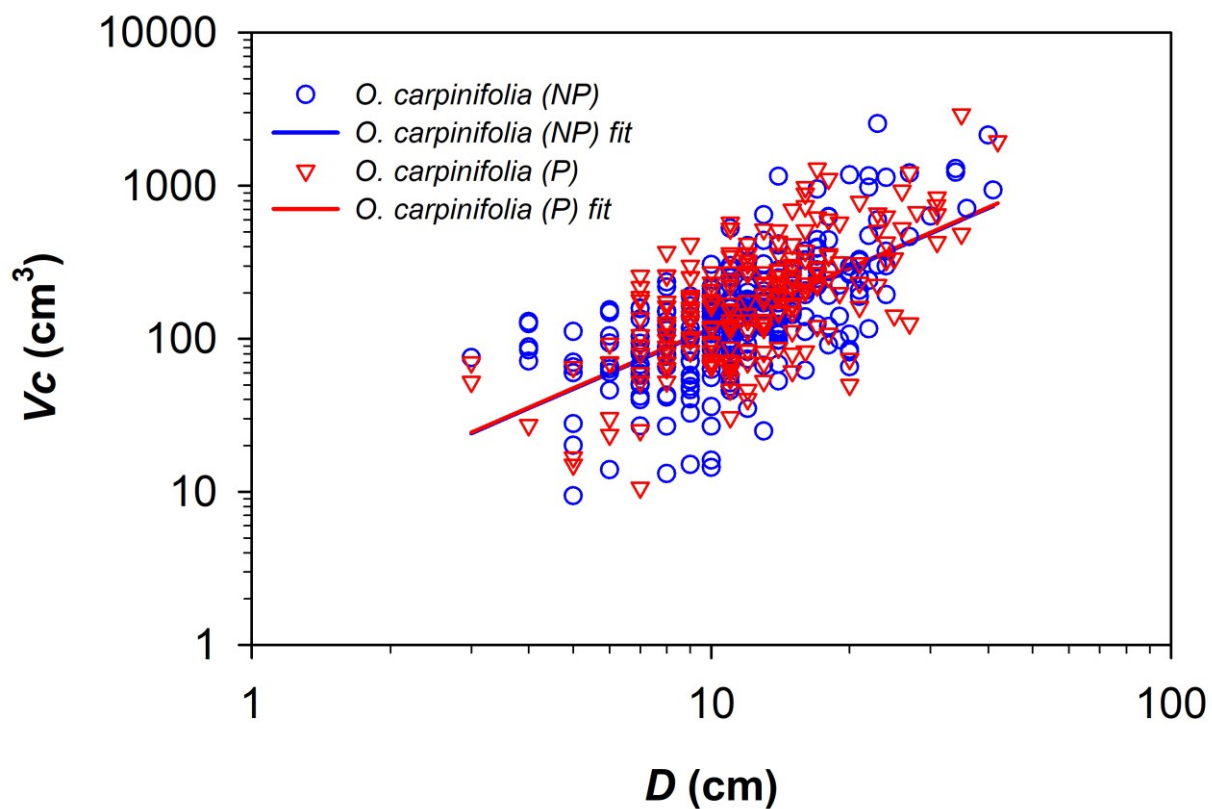


Figura 3.4: relazione tra  $V_c$  e  $D$ . Le linee di tendenza sono riferite alle diverse specie e a piante produttive e non produttive.

Linea di tendenza	Equazione della linea di tendenza
Carpino NP	$y = 8,913x^{1,31}$
Carpino P	$y = 10,233x^{1,31}$
Faggio NP	$y = 12,912x^{1,31}$

Tabella3.4: equazioni delle linee di tendenza relative alla Figura 3.4

### 3.3 Volume di chioma e altezza

La seconda riguarda l'interpolazione tra volume di chioma ( $V_c$ ) e altezza ( $H$ ).

Dalla statistica risulta come più attendibile il secondo modello, senza interazione tra H e specie (Tabella 3.5).

Non vi è una differenza significativa, a parità di altezza, di volume di chioma tra piante produttive e non produttive (Figura 3.5) (p-value corrispondente a  $0,0578 > 0,05$ ).

L'indice  $R^2$  di tale relazione suggerisce una significatività peggiore rispetto alla relazione Vc vs D.

	Model 1	Model 2
Indice AIC	445,74	443,77

Tabella 3.5: relativa agli indici AIC ottenuti dall'output lineare a effetti misti dell'interpolazione  $\log_{10}Vc$  vs.  $\log_{10}H$ . Sono stati considerati i modelli aventi i valori minori, in questo caso è stato selezionato il "Model 2"

```
> #model 2 with NO interaction
> mod2<-lme(log10(vctot) ~ log10(Hmax)+Stato+Specie,
+          random=~1|ID, data=data)
> summary(mod2)
Linear mixed-effects model fit by REML
Data: data
      AIC      BIC    logLik
443.7699 481.6653 -212.8849

Random effects:
Formula: ~1 | ID
      (Intercept) Residual
stdDev:  0.3412029 0.1279569

Fixed effects: log10(vctot) ~ log10(Hmax) + Stato + Specie
      Value Std.Error DF   t-value p-value
(Intercept) 0.9836770 0.2757466 498   3.567323 0.0004
log10(Hmax) 1.3014906 0.1555645 498   8.366242 0.0000
Statoprod   0.0643077 0.0338188 498   1.901536 0.0578
specieCB    -0.4025752 0.4214191 498  -0.955285 0.3399
specieFS    0.0306953 0.2316658 498   0.132498 0.8946
specieOC   -0.2673763 0.2112317 498  -1.265796 0.2062
speciePA    0.1472687 0.3384333 498   0.435148 0.6636

Correlation:
      (Intr) l10(H) Sttprd specCB specFS specOC
log10(Hmax) -0.645
Statoprod    0.022 -0.097
specieCB     -0.388  0.014 -0.054
specieFS     -0.902  0.321  0.009  0.456
specieOC     -0.782  0.035 -0.021  0.499  0.915
speciePA     -0.592  0.181  0.015  0.311  0.624  0.625

Standardized within-Group Residuals:
      Min      Q1      Med      Q3      Max
-1.12955123 -0.21343747 -0.01143102  0.19901321  1.16676020

Number of Observations: 505
Number of Groups: 505
> R2<-r.squaredGLMM(mod2)
> R2
      R2m      R2c
[1,] 0.1680754 0.8974257
```

Figura 3.5: output del modello lineare a effetti misti della relazione  $\log_{10}Vc$  vs.  $\log_{10}H$

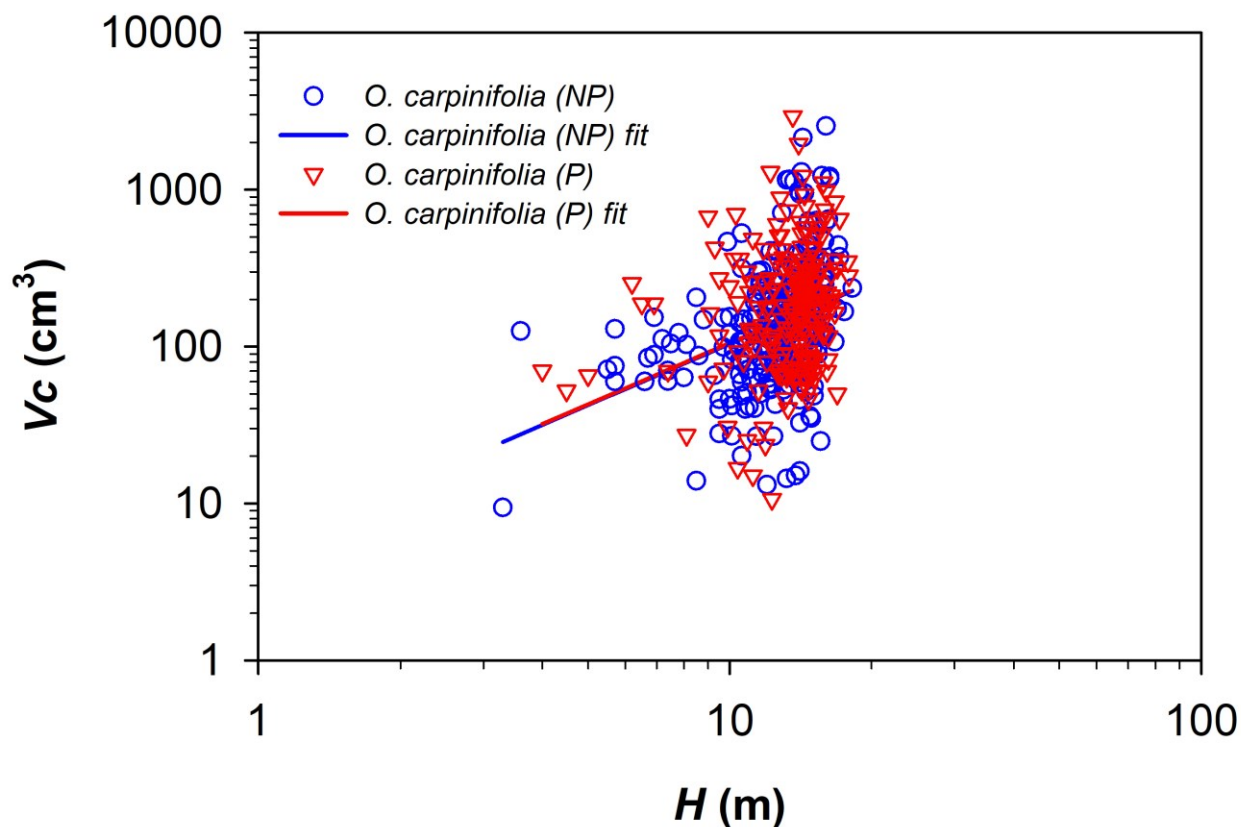


Figura 3.6: relazione tra  $V_c$  e  $H$ . Le linee di tendenza sono riferite alle diverse specie e a piante produttive e non produttive.

Linea di tendenza	Equazione della linea di tendenza
Carpino NP	$y = 9,616x^{1,3}$
Carpino P	$y = 11,143x^{1,3}$
Faggio NP	$y = 10,304x^{1,3}$

Tabella 3.6: equazioni delle linee di tendenza relative alla Figura 3.6

### 3.4 Volume di fusto e volume di chioma

Questa relazione rapporta i valori di volume del fusto ( $V_f$ ) con quelli di volume di chioma ( $V_c$ ).



Quest'ultima è l'interpolazione che meglio può rispondere all'ipotesi iniziale, in quanto mette in relazione il volume di chioma, cioè la parte che produce e fissa il carbonio, con il volume del fusto, la parte che consuma e utilizza il carbonio fissato dalla chioma per il metabolismo dei tessuti vivi. La significatività statistica di questo test è evidenziata da un valore abbastanza elevato dell'indice  $R^2$ , pari a 0,64, il migliore.

In questo caso, dalla statistica risulta più attendibile il secondo modello (Tabella 3.7).

Emerge che, a parità di volume di chioma, il volume del fusto non varia in maniera significativa fra le piante produttive e non produttive ( $p\text{-value}=0,5202$ ) (Figura 3.7).

	<i>Model 1</i>	<i>Model 2</i>
<i>Indice AIC</i>	337,75	333,50

Tabella 3.7: relativa agli indici AIC ottenuti dall'output lineare a effetti misti dell'interpolazione  $\log_{10}Vf$  vs.  $\log_{10}Vc$ .

Sono stati considerati i modelli aventi i valori minori, in questo caso è stato selezionato il "Model 2"

```
> mod2<-lme(log10(vcum) ~ log10(vctot)+Stato+Specie,
+           random=~1|ID, data=data)
> summary(mod2)
Linear mixed-effects model fit by REML
Data: data
      AIC      BIC    logLik
333.507 371.4024 -157.7535

Random effects:
Formula: ~1 | ID
      (Intercept) Residual
stdDev:  0.3046432 0.1142456

Fixed effects:  log10(vcum) ~ log10(vctot) + Stato + Specie
              Value Std.Error DF   t-value p-value
(Intercept) -2.7678754 0.2096741 498  -13.200848 0.0000
log10(vctot)  0.6615487 0.0374633 498   17.658562 0.0000
Statoprod    0.0194630 0.0302490 498    0.643426 0.5202
SpecieCB     -0.1239493 0.3766077 498   -0.329120 0.7422
SpecieFS     -1.2659639 0.1971558 498   -6.421135 0.0000
SpecieOC     -0.0884501 0.1888862 498   -0.468272 0.6398
SpeciePA     -0.6585877 0.2974958 498   -2.213772 0.0273
Correlation:
      (Intr) l10(v) sttprd specCB specFS specOC
log10(vctot) -0.442
statoprod     0.003 -0.114
SpecieCB     -0.464 0.045 -0.058
SpecieFS     -0.905 0.112 0.029 0.478
SpecieOC     -0.919 0.065 -0.025 0.500 0.954
SpeciePA     -0.588 0.046 0.028 0.315 0.608 0.630

Standardized within-Group Residuals:
      Min          Q1          Med          Q3          Max
-1.54399003 -0.17196548  0.05492654  0.22189418  0.81131452

Number of Observations: 505
Number of Groups: 505
> R2<-r.squaredGLMM(mod2)
> R2
      R2m      R2c
[1,] 0.6450734 0.956239
```

Figura 3.7: output del modello lineare a effetti misti della relazione  $\log_{10}Vf$  vs.  $\log_{10}Vc$ .

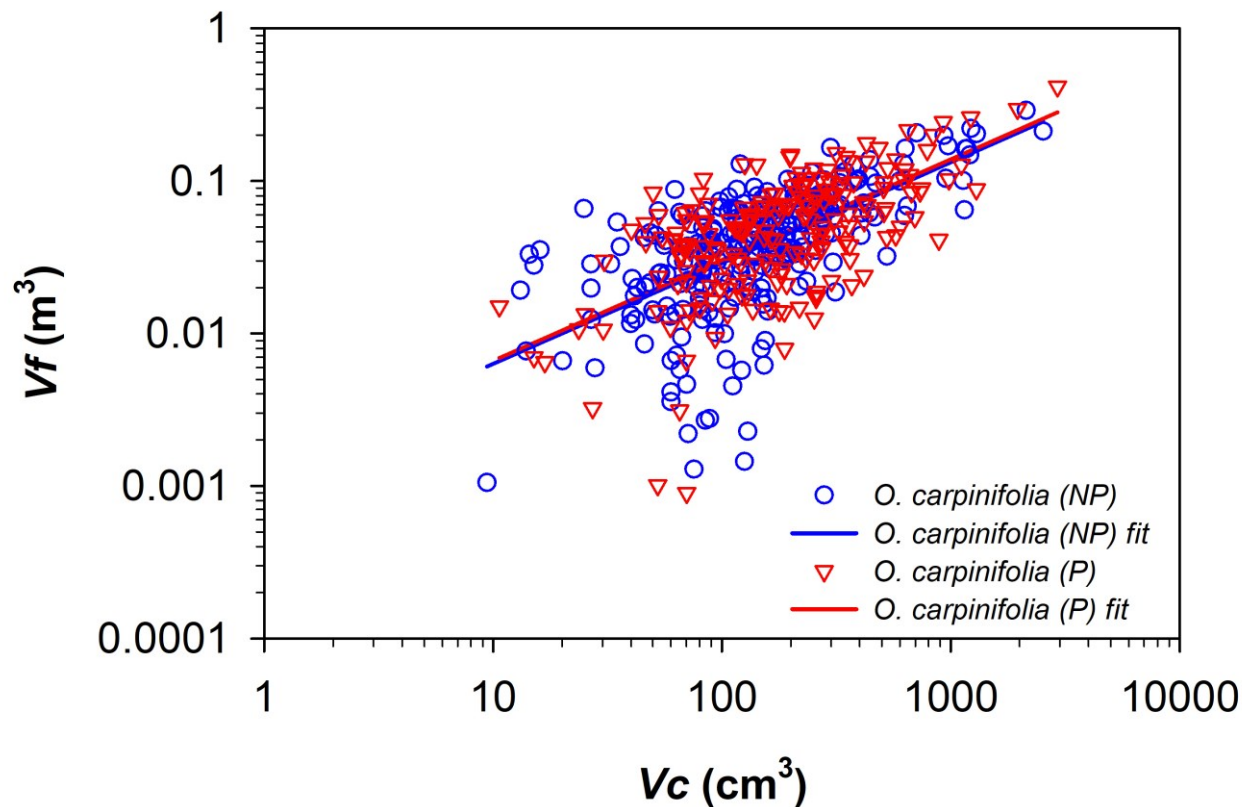


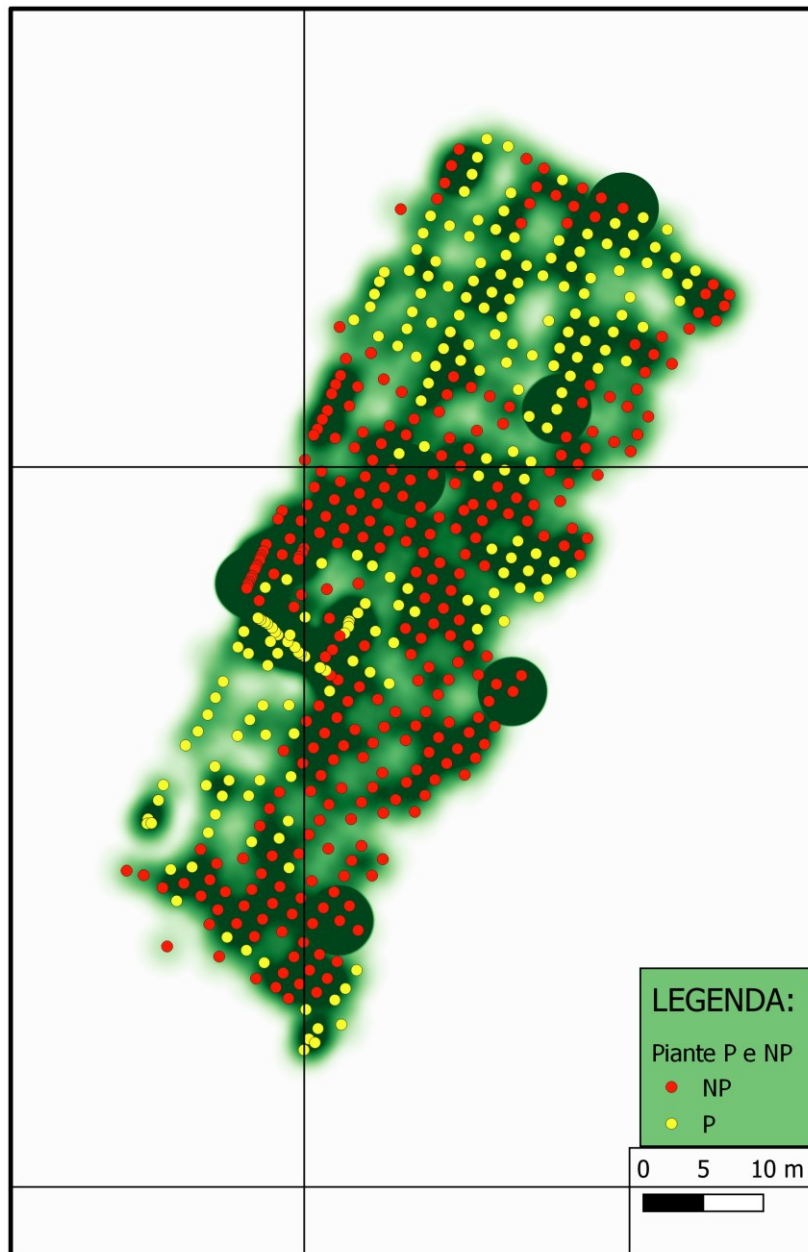
Figura 3.8: : relazione tra  $V_f$  e  $V_c$ . Le linee di tendenza sono riferite alle diverse specie e a piante produttive e non produttive.

Linea di tendenza	Equazione della linea di tendenza
Carpino NP	$y = 0,00170x^{0,66}$
Carpino P	$y = 0,00178x^{0,66}$
Faggio NP	$y = 9,12 \cdot 10^{-5}x^{0,66}$

Tabella 3.8: equazioni delle linee di tendenza relative alla Figura 3.8

### 3.5 Mappa

Dalla mappa si nota che la densità di chioma per unità di superficie al suolo non è distribuita in modo omogeneo all'interno della tartufaia. Visivamente, infatti, si nota che la densità è maggiore in zone dove si trovano nuclei di piante non produttive. Viceversa, le piante produttive sono localizzate in aree con densità più basse.



*Figura 3.9: mappa relativa alle piante produttive e non produttive in tartufaia, dove è evidenziata la densità per unità di superficie dei volumi di chioma: la scala dei colori varia dal bianco, a cui corrisponde una densità di volume di chioma pari a 0, fino al verde intenso, relativo a densità di chioma sempre più elevate.*

## 4 Discussione e conclusioni

Il grafico presentato nella parte introduttiva (Figura 1.2) evidenzia come le piante produttive e non produttive siano capaci di utilizzare la risorsa idrica in maniera differente. In particolare, le piante produttive si sono viste abili nel mantenere una buona idratazione all'interno del fusto, durante periodi di stress idrico. Questo perché concentrano gli zuccheri, i quali saranno poi in parte rilasciati sotto forma di essudati radicali durante la fase di recupero.

All'inizio di questo elaborato si è ipotizzato che la porzione di carbonio extra presente nel fusto delle piante produttive, durante la fase di recupero, sia investita nell'accrescimento degli organi della pianta.

Il grafico che relaziona il volume di chioma con il diametro (Figura 3.4) dimostra che, a parità di diametro, le piante produttive presentano un volume di chioma maggiore rispetto quelle non produttive. Questo appoggierebbe l'ipotesi iniziale, confermando che parte del surplus di carbonio è impiegato per l'accrescimento della chioma.

Al contrario, la relazione (Figura 3.8) che confronta il volume del fusto, la parte che consuma carbonio, con il volume di chioma, che fissa carbonio, non evidenzia differenze tra piante produttive e non produttive. Anche la curva ipsometrica (Figura 3.2) mostra che, a parità di diametro, la crescita in altezza delle piante produttive non è significativamente maggiore rispetto quelle non produttive. Data la maggior significatività degli ultimi due test effettuati, i risultati sono sufficienti a smentire l'ipotesi iniziale.

Parte del surplus di carbonio delle piante produttive, durante i periodi di recupero dallo stress idrico, non sono impiegati per un maggior accrescimento.

È quindi possibile che il carbonio segua differenti pattern di allocazione.

Come sottolineato dalla Figura 1.1, la produttività tartufigena raggiunge picchi maggiori in concomitanza a periodi successivi al deficit idrico, nonché quando le piante produttive rilasciano generalmente maggiori quantità di essudati.

Perciò, è possibile supporre che parte del surplus di carbonio rilasciato dalla pianta sia impiegato dal micelio fungino per accrescersi.

Anche il fungo apporta ottimi benefici, soprattutto per quanto riguarda l'assimilazione di nutrienti poco biodisponibili per l'assorbimento diretto da parte della pianta, come ad esempio N, P, Mg, Zn e Cu (Nutti and Sbrana 2013).

Non tutti gli aspetti delle simbiosi sembrano però essere positivi. Uno studio effettuato su *Tuber melanosporum* Vittad. dimostra che la conduttanza radicale per unità di superficie radicale di

piante completamente micorrizzate è 2,5 volte inferiore. Questo però sembra essere compensato dalla maggior massa radicale, che probabilmente permette un maggior assorbimento di nutrienti. Il maggior quantitativo di carbonio destinato alle radici potrebbe favorire l'aumento di disponibilità idrica per unità di superficie fogliare, permettendo un'apertura stomatica più prolungata (Nardini et al 2000).

Quindi, nonostante il surplus di carbonio delle piante produttive non sia impiegato per un maggior accrescimento epigeo, alcuni studi sopra citati evidenziano altri vantaggi apportati dalle simbiosi micorriziche e di come i flussi di carbonio siano la base per comprendere meglio il funzionamento di tali simbiosi.

Perciò è molto importante continuare ad approfondire gli studi nel campo delle simbiosi micorriziche, oltre che per il valore ecologico, anche per il valore economico che questi tartufi possiedono.

In impianti tartuficoli artificiali, per ottenere la massima resa economica, sarebbe importante capire le condizioni ottimali per l'instaurarsi delle simbiosi micorriziche con le specie forestali. Nella parte introduttiva, ad esempio, è stato accennato come le simbiosi si instaurino più agevolmente in periodi successivi all'emissione di essudati radicali, coincidenti con i periodi post stress idrico, nonché di recupero (van Dam et al. 2016, Bonet et al. 2006).

Infatti, qualche ragionamento sul motivo per il quale non tutte le piante interne alla tartufaia siano micorrizzate, lo si ricava dalla mappa (Figura 3.9) che mette in mostra come la densità dei volumi di chioma sia visivamente maggiore nelle zone dove sono presenti nuclei di alberi non produttivi. Al contrario, i nuclei di piante produttive presentano densità di chioma per unità di superficie inferiori.

Una possibile ipotesi può essere che, per permettere l'instaurarsi delle simbiosi micorriziche, gli alberi necessitino di mantenere una bassa densità di volume di chioma per unità di superficie al suolo. Questo nella pratica si tradurrebbe nell'effettuare un leggero diradamento, in modo tale da diminuire la densità delle chiome per permettere al micelio del tartufo di colonizzare nuovi nuclei di alberi, col fine di aumentare la produzione complessiva della tartufaia.

In conclusione, l'ipotesi iniziale non è stata confermata. Gli zuccheri che influenzano l'osmoregolazione all'interno delle piante produttive, non pare siano utilizzati per l'accrescimento epigeo, bensì sembrerebbero destinati alle micorrize del tartufo per favorirne la crescita.

## 5 Bibliografia

Baetz U, Martinoia E (2014) Root exudates: The hidden part of plant defense. *Trends Plant Sci* 19:90–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2013.11.006>

Benucci N, Raggi L, Albertini E, Grebenc T, Bencivenga M, Falcinelli M, Di Massimo G. (2011) Ectomycorrhizal communities in a productive *Tuber aestivum* Vittad. orchard: composition, host influence and species replacement.

<https://academic.oup.com/femsec/article/76/1/170/521911>

Bertin C, Yang X, Weston LA (2003) The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. *Plant Soil* 256:67–83.

Bonet J. A, Fischer C. R, Colinas C. (2006), Cultivation of black truffle to promote reforestation and land-use stability. *Agronomy for sustainable development* 26.1:69-76

Brunner I, Herzog C, Dawes MA, Arend M, Sperisen C (2015) How tree roots respond to drought. *Front Plant Sci* 6:1–16.

Dakora FD, Phillips DA (2002) Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant Soil* 245:35–47.

Marotta, G., and E. Varricchio. (2007) "La risorsa tartuficola nel Sannio, Analisi e prospettive. Il sistema Titerno Fortore Tammaro.": 57-59,77-80.

Nardini A, Salleo S, Tyree MT, Vertovec M (2000) Influence of the ectomycorrhizas formed by *Tuber melanosporum* Vitt. on hydraulic conductance and water relations of *Quercus ilex* L. seedlings. *Ann For Sci* 57:305–312.

Nuti M, Sbrana C. (2013) Il tartufo: una simbiosi multipla. *Disponibile online*

<https://www.georgofili.it/download/1274.pdf>

Preece C, Farré-Armengol G, Llusà J, Peñuelas J (2018) Thirsty tree roots exude more carbon. *Tree Physiol* 38:690–695.

Tesi di laurea magistrale "Essudati radicali: quando, come, perché", laureanda: Dott.ssa Alessia Sartori, relatore: Prof. Gai Petit, correlatore: Prof. Andrea Ertani

van Dam N, Bouwmeester H (2016), Metabolomics in the Rhizosphere: Tapping into Belowground Chemical Communication. *Trends in plant science* 21.3: 256-265

Williams A, de Vries FT (2019) Plant root exudation under drought: implications for ecosystem functioning. *New Phytol*:0–3.

Altre fonti

[https://it.wikipedia.org/wiki/Test\\_di\\_verifica\\_delle\\_informazioni\\_di\\_Akaike](https://it.wikipedia.org/wiki/Test_di_verifica_delle_informazioni_di_Akaike)

<https://www.tartufo.com/it/prezzi-tartufo/>