

## Azione C1 - Deliverable C1.3

Report on the results of the carbon sink measurement in the demo sites and description of the empirical methodology applied

Risultati della misurazione dei flussi di carbonio e metodologia empirica utilizzata

Giorgio Vacchiano  
Edoardo Nevola

Dip. Scienze Agrarie e Ambientali  
Università degli Studi di Milano  
Dicembre 2021

**LE FORESTE  
CHE RIGENERANO  
L'ECONOMIA**

## Summary

Forests play a crucial role in the mitigation of global warming, removing from the atmosphere about 23% of global fossil fuel emissions every year. Forest carbon is stored in soil, above- and below-ground biomass, deadwood and litter. However, forests' capacity to absorb carbon is not steady: it can change with forest age, decline due to physiological stress and tree mortality, or increase from CO<sub>2</sub> or nitrogen fertilization, or a combination of the three. Also, it can be improved by appropriate forest management, e.g., by maximizing wood increment or minimizing vulnerability to disturbances. It is thus essential to assess in detail the current carbon fluxes in the forest and to predict their temporal dynamics to better understand how silvicultural interventions would affect the forest carbon sink.

In the following work we 1) calculated current carbon stock and sink ("baseline") in the three study areas of the project Life CO<sub>2</sub> PEF&PES using different methodologies (IPCC Guidelines, National Forest Inventory coefficients, and in-situ measurement); 2) predicted changes of forest carbon stock and sink in the next 50 years using the CO2FIX model, an empirical multi-cohort ecosystem-level forest growth model, which we calibrated using field measurements or local management plans. Simulations were run three different scenarios: continuation of current silvicultural practices or business as usual (BAU), climate-smart forest management, and longer lifetime of wood products.

Results highlighted that: standard IPCC and forest inventory coefficients underestimated carbon stocks and sinks relative to field measurements in two out of three study areas; soil was the major carbon pool, with a generally increasing trend in the next 50 years; under BAU, products and bioenergy carbon pools increased during the simulation, while biomass carbon and total carbon decreased in two of the three study areas, as a result of high density and ageing that high mortality and low annual increment. By contrast, both improved management and improved products destination produced an increase in carbon stocks compared to BAU, consistent with the scientific literature. Such increase will be even higher if the silvicultural interventions are carried out on a larger area and if avoided disturbance mortality is included among their effects.

This study emphasises the great benefits that a "climate-smart" forest management regime can have on the ability of the forests to absorb and store carbon. This will also generate economic benefits if the additional carbon sink is valued under a designated payment scheme for voluntary carbon credits, which would compensate for the extra costs of the improved forest management.



## Sommario

Le foreste assorbono annualmente circa il 23% delle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti da combustibili fossili, rivestendo un ruolo cruciale nella mitigazione del cambiamento climatico. Le foreste costituiscono il maggior serbatoio terrestre di carbonio, che viene immagazzinato in suolo, biomassa epigea e ipogea, necromassa e lettiera. La capacità delle foreste di assorbire carbonio non è tuttavia costante: può variare con l'età della foresta, diminuire in seguito a stress climatico o mortalità da eventi meteorologici estremi, aumentare grazie a fertilizzazione da CO<sub>2</sub> o deposizioni azotate, o una combinazione di tutti e tre questi fattori. Inoltre, può essere incrementata attraverso un'appropriata gestione selvicolturale, ad esempio stimolando l'incremento legnoso annuale. È quindi importante, a questo fine, saper quantificare nel dettaglio i flussi di carbonio attuali nella foresta nonché prevedere quelli futuri, per capire come un'eventuale gestione selvicolturale possa influenzare lo scenario attuale.

In questo studio abbiamo: 1) quantificato i serbatoi (stock) e gli assorbimenti (sink) di carbonio all'attualità nelle tre aree di studio del progetto Life CO<sub>2</sub> PEF&PES utilizzando tre differenti metodi di calcolo (Linee guida IPCC, coefficienti dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio, rilievi in campo); 2) analizzato l'evoluzione temporale degli stock e dei flussi di carbonio forestale nelle tre aree di studio tramite il modello di simulazione CO2FIX, per prevedere come i 5 pool di carbonio varieranno nei prossimi 50 anni in tre scenari di simulazione – continuazione delle pratiche selvicolturali correnti (BAU), interventi selvicolturali "climate smart", e destinazione del legno prelevato a prodotti di maggior durata.

I risultati mostrano che: le stime basate su coefficienti standard IPCC o INFC sottostimano stock e sink di carbonio in due aree di studio su tre; il suolo è il principale serbatoio di carbonio, con un trend generalmente crescente nei prossimi 50 anni; nello scenario BAU, il carbonio nei prodotti legnosi e nel pool bioenergetico aumenterà, mentre il carbonio contenuto nella biomassa e il carbonio totale diminuirà in delle tre aree di studio, a causa dell'alta densità e dell'invecchiamento della foresta, che genereranno una elevata mortalità e limiteranno l'incremento legnoso annuo. Al contrario, sia una migliore gestione forestale che una migliore destinazione dei prodotti legnosi produrranno un aumento degli stock di carbonio rispetto al BAU, coerentemente con la letteratura scientifica. Tale aumento sarà ancora maggiore se gli interventi selvicolturali sono realizzati su un'area più ampia di quella prevista, e se si include tra i loro effetti la ridotta vulnerabilità alla mortalità da disturbo naturale.

Questo studio sottolinea i grandi benefici che un regime di gestione forestale "climaticamente intelligente" può avere sulla capacità delle foreste di assorbire e immagazzinare carbonio. Ciò potrà generare anche benefici economici qualora il sink di carbonio aggiuntivo venga valutato nell'ambito di un programma di pagamento per crediti di carbonio volontari, che compenserebbero i costi aggiuntivi della gestione forestale "climate smart".

## Indice

1. Introduzione	1
2. Metodologia	3
2.1 Calcolo degli stock e dei sink di carbonio per lo scenario BAU	3
2.1.1 Metodo 1: Linee guida IPCC	3
2.1.2 Metodo 2: parametri medi INFC	4
2.1.3 Metodo 3: dati di campo	4
2.2 CO2FIX	7
2.2.1 Parametri generali della simulazione	8
2.2.2 Incremento in volume	8
2.2.3 Carbonio presente a inizio simulazione e altri input	9
2.2.4 Scenari selvicolturali	10
2.2.5 Suolo	11
2.2.6 Prodotti legnosi	12
2.2.7 Bioenergia	13
2.2.8 Altri moduli	14
3. Risultati e Discussione	14
3.1 C stock e sink	14
3.2 CO2FIX	19
Conclusioni	26
Bibliografia	27

## 1. Introduzione

Le foreste svolgono un ruolo essenziale nel soddisfacimento dei bisogni del genere umano: influenzano il ciclo dell'acqua, purificano l'aria, stabilizzano i versanti, proteggono i suoli dall'erosione, forniscono materie prime come legno e altri prodotti del sottobosco e diversi servizi immateriali di tipo culturale e turistico-ricreativo (Thorsen *et al.*, 2014). Una delle più importanti funzioni assolve dagli ecosistemi forestali però è quella di immagazzinare carbonio tramite l'assorbimento di ingenti quantità di anidride carbonica dall'atmosfera mediante la fotosintesi.

Le foreste sono il maggior serbatoio terrestre di carbonio, il secondo a livello globale dopo gli oceani (Bravo, 2007). Gli ecosistemi terrestri rimuovono circa il 30% delle emissioni di CO<sub>2</sub> da combustibili fossili (Friedligstein *et al.*, 2021). Secondo alcune stime le foreste rimuovono globalmente dall'atmosfera circa il 23% delle emissioni fossili ogni anno (Harris *et al.*, 2021), e il 13% a livello europeo (Nabuurs *et al.*, 2015). In Italia, il carbonio immagazzinato negli ecosistemi forestali è pari a 1,24 Gt, circa 142 t/ha, ovvero 4,5 Gt di CO<sub>2</sub> (Gasparini *et al.*, 2013). La maggior parte del carbonio organico delle foreste italiane è accumulato nei suoli, che contengono il 57,6% del carbonio totale. Il secondo serbatoio per importanza è la biomassa arborea epigea, che contiene il 38,1% del totale, circa 54,0 t/ha. Nella lettiera e nella necromassa sono invece accumulati rispettivamente il 2,0% e il 2,3% del carbonio organico totale. Nell'analisi dei flussi di carbonio in un ecosistema forestale non è quindi sufficiente limitarsi alla biomassa in quanto anche suolo, lettiera e necromassa sono importanti serbatoi, andando a costituire i cinque pool di carbonio riconosciuti dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Per quanto riguarda i flussi da e per l'ecosistema forestale, annualmente in Italia vengono assorbite nei pool forestali 12,6 Mt di carbonio in conseguenza dell'accrescimento degli alberi, corrispondenti a 46,2 Mt di CO<sub>2</sub> o 5 t/ha di CO<sub>2</sub> (Gasparini *et al.*, 2013; MIPAAFT, 2019), al netto delle perdite da utilizzazioni forestali e da disturbi naturali (comprese 5,8 Mt CO<sub>2</sub> emesse annualmente in Italia a causa di incendi boschivi: Vilén e Fernandes, 2011). In foreste gestite, inoltre, il destino del carbonio immagazzinato nella biomassa epigea dipende dall'uso cui la biomassa è destinata: nel caso essa venga bruciata per produrre energia (come nell'80% dei casi per il legno prelevato in Italia: MIPAAFT, 2019), gran parte del carbonio torna immediatamente in atmosfera, mentre in carta, materiale da costruzione e altri prodotti di lunga durata esso rimane immagazzinato per decenni o addirittura secoli: risulta perciò rilevante considerare anche i prodotti legnosi e la durata della loro vita nella simulazione dei flussi di carbonio di un ecosistema forestale.

La capacità delle foreste di assorbire carbonio non è sempre costante, ma può variare a seconda dell'età degli alberi, dell'andamento climatico, della struttura della foresta, della mortalità da eventi estremi, della specie e della gestione selvicolturale adottata. In popolamenti molto maturi o molto densi, dove la competizione è maggiore, l'accrescimento degli individui e di conseguenza l'assorbimento di carbonio risultano quindi ridotti. Tuttavia, sia l'età media che la densità dei popolamenti possono essere influenzati con la gestione forestale tramite appropriati interventi selvicolturali. In particolare, l'assorbimento di carbonio può essere migliorato in tre modi: 1) proteggendo la foresta da agenti esterni (incendi, schianti da vento, patogeni), ad esempio riducendo il carico di combustibile e aumentando la stabilità meccanica dei popolamenti, evitando

così che parte del serbatoio di carbonio vada perso e che l'assorbimento di carbonio venga interrotto a seguito dello stress o della mortalità da disturbo, 2) riducendo la respirazione eterotrofa e quindi la frequenza con cui il suolo resta scoperto, e 3) stimolando l'incremento legnoso mantenendo densità e quindi competizione non eccessive (Konôpka *et al.*, 2017). Interventi selvicolturali atti a rendere le foreste più resistenti e resilienti agli estremi climatici, previsti in aumento nei prossimi decenni, creano perciò serbatoi di carbonio più stabili, con emissioni ridotte rispetto a quelle che si potrebbero verificare in seguito a disturbi naturali che colpiscano ripetutamente foreste a turno lungo e alta densità di carbonio nella biomassa. Anche la forma di governo adottata influisce sulla quantità di carbonio assorbita: boschi d'alto fusto correttamente gestiti permettono di fissare più carbonio e di conservarne maggiormente in prodotti a più lunga durata rispetto al governo a ceduo. Massimizzare i serbatoi forestali di carbonio è perciò possibile utilizzando turni di taglio e interventi adeguatamente pianificati (Jandl *et al.*, 2007).

Per realizzare il massimo assorbimento di carbonio e limitare le perdite dai serbatoi forestali esistenti è quindi fondamentale prevedere nel dettaglio le dinamiche dello stock e del sink forestale nel tempo. Simulare la dinamica futura dei flussi di carbonio in dipendenza dai diversi tipi di gestione selvicolturale permette ad esempio di comprendere il tipo di intervento migliore per massimizzare l'assorbimento di carbonio e per valorizzare i servizi ecosistemici forniti dalla foresta, nonché di quantificare la differenza rispetto a uno scenario di continuazione della selvicoltura corrente o "business as usual" (BAU).

In questo contesto, il principale obiettivo del Progetto LIFE CO2PES&PEF è proprio quello di aumentare l'assorbimento di carbonio da parte degli ecosistemi forestali, a partire da quelli delle tre aree studio considerate: una alpina (Foresta Regionale di Fusine (UD)) e due appenniniche (Comunali parmensi di Baselica e Pontolo (PR) e Complesso Demaniale di Fantella-Galeata (FC)). In un precedente lavoro di progetto (Vacchiano e Nevola, 2021) è stato calcolato il carbonio attualmente immagazzinato e assorbito nelle aree studio e sono quindi state individuate le aree a maggiore priorità di intervento per la conservazione del servizio di mitigazione climatica. Questo studio invece ha lo scopo di prevedere l'evoluzione dello stock e sink carbonio nelle tre aree di studio per i prossimi 50 anni, ed è diviso in due fasi:

- Calcolo della baseline dei serbatoi (stock) e degli assorbimenti (sink) di carbonio per le tre aree di studio utilizzando i coefficienti IPCC e quelli dell'Inventario Forestale Nazionale (Gasparini *et al.*, 2013) per poi confrontarli con la stima precedentemente effettuata utilizzando dati prelevati sul campo.
- Analisi della dinamica temporale dei cinque serbatoi di carbonio nelle tre aree di progetto tramite il modello di simulazione CO2FIX per i prossimi 50 anni in tre scenari (1. BAU, 2. Implementazione di interventi selvicolturali di prevenzione dei disturbi e 3. Destinazione del legno a prodotti con maggior durata), nonché per stimare le differenze tra i vari scenari e quindi conoscere i benefici apportati da una gestione selvicolturale e/o destinazione dei prodotti migliorata.

## 2. Metodologia

### 2.1 Calcolo degli stock e dei sink di carbonio per lo scenario BAU

Per stimare l'entità dei serbatoi e degli assorbimenti di carbonio nelle foreste delle aree di studio è innanzitutto necessario conoscere la quantità di carbonio attualmente contenuta ed assorbita dai popolamenti forestali in questione. Questa stima è stata effettuata utilizzando tre diverse metodologie, in modo da poter eseguire un confronto tra i risultati ottenuti ed evidenziarne il progressivo affinamento.

#### 2.1.1 Metodo 1: Linee guida IPCC

La prima metodologia adottata ha visto utilizzare i valori standard delle linee guida IPCC, forniti come intervallo in base a clima, zona ecologica e continente nel manuale "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" (IPCC, 2006, 2019) (Tab. 1).

In particolare, per la stima degli stock e dei sink sono stati utilizzati i valori standard di biomassa riportati dal Volume 4 "Agriculture, Forest and Other Land Uses" rispettivamente nelle tabelle 4.7 e 4.9. Per il calcolo del carbonio epigeo questi valori sono stati quindi moltiplicati per il coefficiente di densità di carbonio pari a 0.47 (IPCC, 2019), mentre per il calcolo del carbonio ipogeo sono stati precedentemente moltiplicati per il fattore di espansione della biomassa radicale riportato nella tabella 4.4.

Per la stima del carbonio negli altri tre pool forestali sono invece stati impiegati i valori presenti alle tabelle 2.2 e 2.3 rispettivamente per la stima del carbonio in lettiera e necromassa e per quello nel suolo.

Tabella 1: valori impiegati per il calcolo di serbatoi e assorbimenti di carbonio secondo linee guida IPCC (IPCC, 2006)

Valore		Biomassa epigea media (min-max) (t/ha)	Crescita annua biomassa epigea (t/ha)	Carbonio in lettiera (t/ha)	Carbonio in necromassa (t/ha)	Carbonio in 0-30cm suolo (t/ha)
Fonte IPCC 2006 Vol.4 AFOLU		Cap. 4 Tab 4.7	Cap. 4 Tab 4.9	Cap. 2 Tab 2.2	Cap 2 Tab 2.2	Capitolo 2 Tabella 2.3
Foresta Regionale di Fusine (UD)	Latifoglie	130 (20-600)	3.0 (0.5-6.0)	3.4	21.2 (2.8-80.6)	81 +- 5%
	Conifere			3.9	48.1 (1.7-181.8)	
	Misto			3.7 (3.4-3.9)	37.6 (1.7-181.8)	
Comunale di Baselica e Pontolo (PR)	Latifoglie	120 (20-320)	4.0 (0.5-7.5)	23.9 (4.6-64.4)	23.6 (1.6-150.0)	64+-5%
	Conifere			66.3 (6.0-279.1)	22.1 (2.1-59.5)	
	Misto			47.8 (4.6-279.1)	23.0 (1.6-150.0)	
Complesso Demaniale Fantella-Galeata (FC)	Latifoglie	120 (20-320)	4.0 (0.5-7.5)	23.9 (4.6-64.4)	23.6 (1.6-150.0)	64+-5%
	Conifere			66.3 (6.0-279.1)	22.1 (2.1-59.5)	
	Misto			47.8 (4.6-279.1)	23.0 (1.6-150.0)	

### 2.1.2 Metodo 2: parametri medi INFC

La seconda metodologia ha visto utilizzati i valori di fitomassa o carbonio forniti a livello di tipo forestale e di regione italiana nell'Inventario Forestale Nazionale (Gasparini *et al.*, 2013) (Tab. 2).

Per la stima dello stock di carbonio epigeo, i valori presenti nella tabella “Fitomassa arborea epigea” sono stati moltiplicati per il coefficiente di densità di carbonio pari a 0.47, mentre per il calcolo del carbonio ipogeo questi sono stati anche moltiplicati per il fattore di espansione della biomassa radicale pari a 0.23. Per la stima del carbonio negli altri tre pool forestali (lettiera, necromassa e suolo) sono invece stati impiegati i valori presenti rispettivamente nelle tabelle “Carbonio organico nella lettiera”, “Peso secco della necromassa totale”, e “Carbonio organico in orizzonti organici del suolo/totale del suolo minerale”. Infine, per il calcolo dei sink sono stati usati i valori di incremento corrente annuo presenti nella tabella “Incremento corrente di volume”.

Tabella 2: valori impiegati per il calcolo di serbatoi e assorbimenti di carbonio secondo il metodo INFC

Area di studio	Tipo forestale o specie dominante	Fitomassa arborea epigea (t/ha)	C lettiera (t/ha)	C necromassa (t/ha)	C suolo organico (t/ha)	C suolo minerale (t/ha)	Incremento corrente di volume (t/ha/anno)
Foresta Regionale di Fusine (UD)	abete rosso	234.8	3	6.9	10.7	67.1	11.1
	abete bianco	326.7	5.8	13.9	25.7	40.2	8.6
	pino silvestre	92.1	4	6.4	13.1	136.2	1.9
	pino nero	208.2	2.5	3.4	4.2	77.6	4.7
	faggio	252.2	4.4	4.8	15	44	7.2
	larice	122.1	1.7	3.7	11.7	79	4.3
Comunale di Baselica e Pontolo (PR)	abete rosso	159	1.7	6.9	3.5	102.4	14.9
	pino silvestre	57.9	2.8	2.4	3.6	62.9	3.2
	pino nero	161.8	7.1	3.5	2.6	68.5	7.3
	faggio	174.9	3.7	3.7	4.6	77.9	5.1
	castagno	110.4	2.1	15.6	0.7	77.4	5.7
Complesso Demaniale Fantella-Galeata (FC)	abete rosso	159	1.7	6.9	3.5	102.4	14.9
	pino silvestre	57.9	2.8	2.4	3.6	62.9	3.2
	pino nero	161.8	7.1	3.5	2.6	68.5	7.3
	faggio	174.9	3.7	3.7	4.6	77.9	5.1
	quercia	72.6	2.7	1	2.1	79.3	1.6
	castagno	110.4	2.1	15.6	0.7	77.4	5.7
	carpino	83.9	2.5	2.9	2.1	83.9	3.4
altre latifoglie	71.6	1.7	3.4	1.2	67.4	4.5	

### 2.1.3 Metodo 3: dati di campo

La terza ed ultima metodologia utilizzata ha visto impiegati i valori ottenuti elaborando i dati ricavati tramite rilievi sul campo o dai Piani di Assestamento Forestale<sup>1</sup> (PAF) delle tre aree di studio. Per

<sup>1</sup> Piano di gestione Forestale per la Foresta regionale di Fusine (UD) valido per gli anni 2021-2035 e redatto dal dott. For. Alessio De Crignis in data giugno 2020; Piani di Assestamento forestale delle Comunale di Baselica e Pontolo (PR), validi rispettivamente per i periodi 2004-2014 e 2010-2020 e redatti dai dott. For. Antonio Mortali e Miriam Taburoni; Piano d'Assestamento Forestale del complesso demaniale “Fantella-Galeata” (FC) valido per il periodo 2018-2032, redatto da Studio Verde srl, Studio Silva srl e DREAM soc. coop.



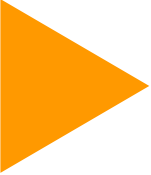
calcolare la quantità di carbonio contenuta nelle foreste in esame (stock), le misurazioni effettuate sul campo sono state trasformate in biomassa mediante equazioni matematiche. Innanzitutto, sono state stimate le altezze di tutti gli individui cavallettati a partire da quelle misurate sul campo tramite regressioni polinomiali tra diametro e altezza (Tab. 3). Utilizzando le altezze e i diametri a disposizione sono stati quindi calcolati i volumi cormometrici attraverso le equazioni allometriche allegare all'INFC 2005 (Tabacchi *et al.*, 2011) (Tab. 4). Una volta calcolati i volumi in m<sup>3</sup>/ha in base alle frequenze a ettaro di ciascuna classe diametrica, sono state quindi stimate le biomasse dei cinque serbatoi forestali individuati dall'IPCC tramite le formule riportate in Tabella 5 e i coefficienti specie-specifici di densità basale, fattore di espansione epigeo, e fattore di espansione per la biomassa radicale individuati per le principali tipologie delle foreste italiane dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (Vitullo *et al.*, 2007). Infine, la biomassa totale è stata convertita in tonnellate di carbonio ad ettaro utilizzando il coefficiente di densità di carbonio pari a 0.47. Per le particelle non cavallettate si è proseguito in modi diversi a seconda dei dati disponibili nei rispettivi piani di assestamento forestale (PAF): 1) Foresta Regionale di Fusine: sono stati utilizzati volumi presenti nel PAF; 2) Comunalie parmensi di Baselica e Pontolo: gli stock sono stati stimati fittando una regressione tra superficie di ciascuna particella [ha] e stock di carbonio [tC/ha] per ogni specie dominante; 3) Complesso demaniale di Fantella-Galeata: sono state utilizzate le provvigioni presenti nel PAF per calcolare le biomasse come precedentemente descritto.

Tabella 3: equazioni di regressione polinomiale utilizzate per la stima delle altezze (h). d = diametro individuo a 1,3 m dal terreno.

Area di Studio	Tipo forestale o Specie dominante	Equazione
Foresta Regionale di Fusine (UD)	Abete rosso	$h = -0.00005*d^3 - 0.0026*d^2 + 0.8038*d + 1.3$
	Faggio	$h = 0.0001*d^3 - 0.02*d^2 + 1.1138*d + 1.3$
Comunalie parmensi di Baselica e Pontolo (PR)	Conifere	$h = 0.0002*d^3 - 0.0188*d^2 + 0.9884*d + 1.3$
	Faggio	$h = 0.0003*d^3 - 0.0307*d^2 + 1.1752*d + 1.3$
	Castagno e Nocciolo	$h = 0.0004*d^3 - 0.034*d^2 + 1.1197*d + 1.3$
	Altre latifoglie	$h = -0.0033*d^3 + 0.0787*d^2 + 0.2859*d + 1.3$
Complesso Demaniale Fantella-Galeata (FC)	Conifere	$h = 0,0008*d^3 - 0,0427*d^2 + 1,1276*d + 1,3$
	Latifoglie	$h = 0,001*d^3 - 0,0518*d^2 + 1,0702*d + 1,3$

Tabella 4: equazioni utilizzate per la stima del volume cormometrico (Tabacchi *et al.*, 2011). d = diametro individuo a 1,3 m dal terreno; h = altezza.

Specie	Equazione
Carpino nero	$-1.4983+0.038828*d^2*h$
castagno	$-2.001+0.036524*d^2*h+0.74466*d$
faggio	$0.81151+0.038965*d^2*h$
frassino	$-0.11137 + 0.039108*d^2*h$
cerro	$-0.043221 + 0.038079*d^2*h$
roverella	$0.51025 + 0.045184*d^2*h-0.36026*d$
robinia	$-2.1214 +0.037123*d^2*h+0.14296*d$
salice	$-2.314+0.038926*d^2*h$
ontano	$-22.932+0.032641*d^2*h+2.991*d$
acero	$1.6905+0.037082*d^2*h$
altre latifoglie	$2.3118+0.031278*d^2*h+0.37159*d$
douglasia	$-7.9946+0.033343*d^2*h+1.2186*d$
pino strobo	$2.6279+0.03389*d^2*h$
pino silvestre	$3.1803+0.039899*d^2*h$
pino nero	$-21.48 +0.033448*d^2*h+2.9088*d$
abete rosso	$-9.1298+0.034866*d^2*h+1.4633*d$



LIFE  
CO2

PES & PEF  
LIFE/CC/1/002/0

LE FORESTE CHE RIGENERANO L'ECONOMIA



Tabella 5: formule impiegate per la stima della biomassa dei cinque serbatoi forestali individuati dall'IPCC.  $GS$  = volume epigeo [ $m^3 ha^{-1}$ ],  $BEF$  = fattore di conversione biomassa,  $WBD$  = densità basale del legno [ $t m^{-3}$ ],  $R$  = rapporto root/shoot che converte la biomassa epigea in biomassa ipogea,  $DCF$  = fattore di conversione da biomassa epigea in necromassa,  $A$  = superficie occupata dalla specifica tipologia forestale [ha],  $a$ - $b$ - $c$ - $d$  = coefficienti specie specifici. (Vitullo et al., 2007)

Serbatoio forestale	Carbonio
Biomassa epigea	$GS*BEF*WBD*A$
Biomassa ipogea	$GS*WBD*R*A$
Necromassa	$GS*BEF*WBD*DCF*A$
Lettiera	$a*C$ epigeo + $b$
Suolo	$c*C$ epigeo + $d$

Per il calcolo del sink annuo di carbonio è stata innanzitutto eseguita, attraverso i software CDendro e Coorecorder, la misura dello spessore radiale degli ultimi dieci anelli dei campioni incrementali prelevati per ogni specie dominante e classe diametrica (<15cm, 15- 30cm, >30cm) nelle particelle cavallettate. Più precisamente, lo spessore degli anelli è stato utilizzato per calcolare il diametro del fusto all'anno 2010 con in quale, insieme alle regressioni altezza-diametro precedentemente utilizzate, sono stati stimati i volumi cormometrici all'anno 2010 applicando le formule riportate in Tabella 4. Questi volumi sono stati quindi sottratti a quelli attuali, per ottenere l'incremento volumetrico degli ultimi dieci anni dei singoli alberi, poi trasformato in incremento di biomassa medio annuo epigea e ipogea. Per ogni classe diametrica è stato quindi calcolato un valore medio annuo di incremento di biomassa individuale, poi moltiplicato per le frequenze a ettaro di ciascuna classe diametrica, ottenendo così l'incremento di biomassa totale per ettaro in ogni particella, successivamente trasformato in incremento di carbonio (sink) semplicemente moltiplicando per il coefficiente di densità di carbonio pari a 0.47. Per le particelle non cavallettate si è proseguito in modi diversi a seconda dei dati disponibili dai relativi PAF: 1) Foresta Regionale di Fusine: sono stati calcolati valori medi di incrementi di fitomassa delle particelle cavallettate di uno stesso tipo forestale; 2) Comunalie parmensi di Baselica e Pontolo: sono state fittate delle regressioni tra superficie della particella [ha] e sink [tC/ha/anno] per ogni specie dominante; 3) Complesso demaniale Fantella-Galeata: sono state fittate delle regressioni tra provvigione [ $m^3/ha$ ] e incremento epigeo [ $m^3/ha/anno$ ] per ogni specie dominante.

## 2.2 CO2FIX

CO2FIX V 3.1 (Schelhaas et al., 2004) è un modello di simulazione empirico a scala di ecosistema che permette di stimare i serbatoi e i flussi di carbonio forestali in biomassa, suolo e nei prodotti legnosi. Il modello è diviso in sei moduli (biomassa, suolo, prodotti, bioenergia, economico e di accreditamento) e richiede come input, principalmente in forma tabellare, dati che sono solitamente ricavabili sul campo o da inventari nazionali e PAF. CO2FIX, nello specifico, lavora tramite un approccio a coorti ovvero "popolamenti forestali che presentano un simile tasso di crescita, mortalità e turnover e che è quindi possibile trattare come singola entità". Normalmente le coorti sono coetanee e monospecifiche. Il modello inoltre può simulare diverse tipologie di gestione forestale, interventi selvicolturali e destinazioni dei prodotti legnosi.

### 2.2.1 Parametri generali della simulazione

Le impostazioni generali permettono di creare gli scenari che si desidera simulare per una determinata area di studio, di scegliere le principali modalità di simulazione e di fornire l'età attuale e la composizione specifica delle coorti che si intendono considerare in ciascuno scenario. Per la quasi totalità delle simulazioni effettuate in questo lavoro, ogni coorte è stata associata a una particella forestale in quanto la maggior parte di queste sono costituite da popolamenti simili in età, composizione e fisionomia; nei casi in cui fosse presente una netta eterogeneità di specie o età, come nelle piceo-faggete della Foresta Regionale di Fusine, ogni particella è stata simulata attraverso due coorti separate. Gli scenari simulati per ogni area di studio sono tre: uno *business as usual (BAU)*, ovvero la continuazione delle pratiche selvicolturali attuali, uno con implementazione degli interventi selvicolturali per la riduzione della vulnerabilità a disturbi e uno per la generazione di prodotti legnosi a durata prolungata. La durata della simulazione è stata impostata a 50 anni.

### 2.2.2 Incremento in volume

Il modulo della biomassa è diviso in quattro compartimenti: fusto, foglie, rami e radici. Questo modulo calcola le variazioni nel serbatoio di carbonio della biomassa attraverso un bilancio tra il carbonio inizialmente presente, gli aumenti dovuti agli incrementi volumetrici e le perdite dovute a mortalità naturale e interventi selvicolturali. L'incremento corrente annuo del fusto (CAI, m<sup>3</sup>/ha/anno) è il parametro chiave del modulo biomassa. Da questo vengono poi ricavati quelli di foglie, rami e radici. Il CAI viene parametrizzato tramite curve di accrescimento per ogni specie ed area di studio, che devono essere fornite dall'utente. CO2FIX permette di parametrizzare l'incremento in funzione dell'età della coorte oppure della sua biomassa totale; è stata scelta la prima opzione, così da poter utilizzare i dati ottenuti dall'analisi delle carote incrementali prelevate durante le attività di campo. Da un lato sono quindi state calibrate regressioni lineari tra diametro ed età, utilizzando il conteggio totale degli anelli di ogni carota; dall'altro è stato calcolato il CAI medio per ogni specie e classe diametrica, e quindi età.

I valori di CAI sono stati validati contro curve incrementali costruite in modo indipendente tramite l'equazione di Richards, che modella l'incremento annuo in funzione della biomassa arborea epigea (e quindi indipendentemente dall'età della foresta) (Eq. 1). L'equazione è stata inizializzata con i valori di biomassa epigea rilevati in campo o forniti dai PAF per ciascuna particella, e con i coefficienti ( $\alpha$ ,  $k$ ,  $\nu$ ) forniti dall'ISPRA per le rispettive specie e regioni di appartenenza delle tre aree di studio.

Equazione 1: formula di Richards (Vitullo et al., 2007)

$$I_t = \frac{dgss}{dt} \cdot A = \left( \frac{k}{\nu} \cdot gss \left[ 1 - \left( \frac{gss}{\alpha} \right)^\nu \right] + gss_0 \right) \cdot A$$

Dove:

$I_t$ : incremento di biomassa [m<sup>3</sup>·anno<sup>-1</sup>]

$gss_t$ : stock di biomassa presente nell'anno  $t$  per ettaro di superficie [m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>] (è stimato in funzione dello stock e delle utilizzazioni forestali nell'anno  $t$ ).

$gss_0$ : incremento di stock di biomassa per ettaro di superficie in assenza di biomassa [m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·anno<sup>-1</sup>]

$\alpha$ : parametro >0 [m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>]

$k$ : parametro [anni<sup>-1</sup>] > 0

$\nu$ : parametro adimensionale  $-1 \leq \nu \leq \infty$ ;  $\nu \neq 0$

$A$ : superficie forestale [ha]



Nello scenario basato su interventi selvicolturali “climate-smart”, è stato necessario modificare le curve incrementali fornite a CO2FIX, per tenere conto dell’effetto positivo dei diradamenti sull’accrescimento individuale e del popolamento, in seguito al rilassamento della competizione per la luce. A questo scopo, il CAI relativo a ciascuna specie e classe di età è stato moltiplicato per un fattore >1 in funzione della riduzione percentuale del numero di piante per ettaro in ciascuna particella (Tabella 6).

Tabella 5: coefficienti di competizione e mortalità utilizzati nelle simulazioni

Coefficienti di competizione		Coefficienti di mortalità	
Biomassa relativa	Moltiplicatore CAI	Età	Mortalità annua
0	1.5	0	0.01
0.2	1.45	20	0.04
0.4	1.4	40	0.02
0.6	1.35	60	0.015
0.8	1.2	80	0.02
1	1	100	0.04
		120	0.05

### 2.2.3 Carbonio presente a inizio simulazione e altri input

L’altro fondamentale parametro di input del modulo biomassa è il carbonio presente a inizio simulazione nei quattro compartimenti arborei (fusti, foglie, rami e radici) di ogni coorte. Questo input è stato ricavato suddividendo nei quattro compartimenti gli stock di carbonio epigeo, già calcolati per ciascuna particella e area di studio. La compartimentazione è stata effettuata calcolando la distribuzione relativa di biomassa epigea nei quattro comparti a partire da un dataset di equazioni allometriche specie-specifiche (Zianis *et al.*, 2005), che forniscono il volume o la biomassa epigea di ciascun comparto in funzione del diametro e dell’altezza di ciascun albero (Tab. 7).

Tabella 7: percentuale di biomassa in fusto, rami e foglie rispetto alla biomassa epigea totale (100%).

	Faggio	Querce, Carpino nero	Abeti, Douglasia	Pini	Castagno
<b>Fusto</b>	81%	77%	82%	74%	78%
<b>Rami</b>	17%	18%	13%	18%	18%
<b>Foglie</b>	2%	5%	5%	8%	4%

Ulteriori parametri di input sono:

- il coefficiente di densità di carbonio è stato assunto pari a 0.47 tC/t s.s. (IPCC, 2019)
- la densità del legno [t s.s./m<sup>3</sup>] delle specie di interesse è stata fissata a 0.68 per il faggio, 0.60 per il querce, 0.70 per il carpino nero, 0.60 per il castagno, 0.39 per l’abete rosso, 0.38 per l’ abete bianco, 0.48 per la douglasia, 0.46 per il pino nero e silvestre

- i coefficienti di allocazione, necessari a ricavare l'incremento di biomassa nei comparti di foglie, rami e radici in funzione di quello del fusto, sono stati mutuati da Schelhaas *et al.* (2004). In alberi giovani la maggior parte della biomassa viene allocata in foglie, rami e radici, così come ad età matura; quando invece l'incremento del fusto è massimo, l'allocazione agli altri compartimenti diminuisce fino a un minimo del 20-30%.
- il *turnover rate* (tasso annuo di mortalità) di foglie, rami e radici è stato ricavato da un recente studio modellistico per le foreste italiane (Pilli *et al.*, 2013): 0.0025 per il fusto, 0.03 per i rami, 0.2 e 0.95 per le foglie rispettivamente di conifere e latifoglie, e 0.1 per le radici.
- la mortalità naturale annua è stata quantificata nel 2.5% del volume in piedi, utilizzando il valore medio del range 1 – 4% calcolato per boschi non diradati di foreste temperate (Harmon *et al.*, 2001).

#### 2.2.4 Scenari selvicolturali

Uno dei parametri più importanti durante le simulazioni riguarda gli scenari selvicolturali. In CO2FIX è possibile simulare diradamenti e tagli di maturità, per i quali va indicata l'età della particella al momento dell'intervento, la frazione di biomassa che viene rimossa e il tipo di prodotti a cui verrà destinata quest'ultima. Nello scenario BAU, le informazioni circa la frazione di biomassa da rimuovere e le epoche di intervento sono stati ricavati dai piani dei tagli nei PAF limitatamente al loro periodo di validità, mentre per il periodo non coperto sono state utilizzate assunzioni generiche circa la frazione di biomassa mediamente rimossa e i turni di taglio per categoria forestale, stabilite insieme ai gestori delle tre aree di studio (Tab. 8).

Nello scenario con implementazione degli interventi "climate-smart" sono stati simulati interventi addizionali, ricadenti in particelle forestali ad alta priorità di intervento (a causa di un maggior pericolo di incendio, schianto da vento e/o un minor assorbimento annuale di carbonio) individuate durante il primo anno di progetto (Vacchiano e Nevola, 2021a, 2021b). Gli interventi addizionali espandono su una superficie di 90-100 ha per area di studio quelli che saranno effettivamente eseguiti nel secondo anno di progetto su una superficie pilota di circa 20ha per area di studio. Gli interventi riguardano principalmente avviamenti all'alto fusto in cedui invecchiati, asportazione di biomassa secca in eccesso e diradamenti selettivi di intensità maggiori rispetto a quelli attualmente previsti dai PAF, suggeriti dai deliverable di progetto e concordati con i gestori delle aree di studio (Tab. 7).

Per quanto riguarda l'allocazione della biomassa rimossa, CO2FIX consente di separare la frazione di fusto e rami che verrà destinata a *logwood* (tronchi da sega), *pulpwood* (cellulosa) o *slashwood* (redisui), e la parte di questi ultimi che sarà soggetta a combustione. Rispetto ai valori BAU, concordati con i gestori delle aree di studio, nello scenario con prodotti legnosi a più lunga durata è stata aumentata la frazione destinata a *logwood* e diminuita quella di *slashwood* (Tab. 9).

Tabella 8: frazione rimossa e epoca di taglio simulati per gli interventi selvicolturali dello scenario BAU quando non diversamente specificato a livello di particella, e variazione negli scenari "climate-smart" (frazione rimossa in più/meno e superficie di intervento).

Area studio	Specie o tipo forestale	Intervento BAU (frazione rimossa e età per l'intervento)	Intervento aggiuntivo
Foresta regionale di Fusine (UD)	Piceo-faggete	<i>indicazioni da PAF specifiche a livello di particella per l'intero periodo di simulazione</i>	+0.1/+0.2 (90ha)
	Peccete		-
	Abieti-piceo-faggeti		-
Comunali di Baselica e Pontolo (PR)	Fustaia di faggio	0.25 – 15 anni (diradamenti) 0.9 (taglio di maturità)	+0.15/+0.25/+0.35 (44ha)
	Fustaia di conifere	0.2 – 20 anni (diradamenti) 0.9 (taglio di maturità)	+0.2 (49ha)
	Ceduo di castagno	0.2 – 25 anni	-
	Ceduo di faggio	0.3 – 35 anni	-
	Ceduo di nocciolo	0.2 – 30 anni	-
Complesso Demaniale Fantella-Galeata (FC)	Fustaia di conifere	0.35 – 20 anni (diradamenti) (0.45 taglio di maturità)	+0.2 (46ha)
	Cedui	0.85 – 30 anni	-0.5 (55ha) Avviamento ad alto fusto
	Fustaia di latifoglie	0.3 – 30 anni (diradamenti)	-
	Fustaia di protezione	0.2 – 30 anni (diradamenti)	-

Tabella 9: frazione di biomassa allocata in logwood-pulpwood-slashwood (% ardere) per tipo forestale e tipo di intervento (diradamento/maturità) nello scenario BAU e variazione apportata (frazione aggiunta a logwood) nello scenario con prodotti a più lunga durata.

Area studio	Specie o tipo forestale	Allocazione BAU	Variazione logwood
Foresta regionale di Fusine (UD)	Faggete	0/0.2 – 0/0 – 1/0.8 (70/85%)	+0.1
	Peccete	0/0.8 – 0.7/0 – 0.3/0.2 (20%)	+0.1
Comunali di Baselica e Pontolo (PR)	Fustaia di faggio	0 – 0.5/0.7 – 0.5/0.3 (80%)	+0.1
	Popolamenti di conifere	0 – 0.5/0.6 – 0.5/0.4 (50%)	+0.1
	Ceduo di castagno	0 – 0.1 – 0.9 (90%)	+0.1
	Ceduo di faggio	0 – 0.1/0.2 – 0.9/0.8 (80%)	+0.1
	Ceduo di nocciolo	0 – 0 – 1 (80%)	+0.1
Complesso Demaniale Fantella-Galeata (FC)	Fustaie di conifere	0 – 0.5/0.6 – 0.5/0.4 (80%)	+0.1
	Cedui	0 – 0.1/0.2 – 0.9/0.8 (80%)	+0.1
	Fustaie di latifoglie	0 – 0.2/0.4 – 0.8/0.6 (80%)	+0.1

### 2.2.5 Suolo

Il modulo *soil* simula la dinamica del carbonio nel suolo mediante il modello Yasso (Liski *et al.*, 2003), che include tre comparti di lettiera (non legnosa, fine e grossolana) e cinque comparti per i processi di decomposizione e humificazione (estratti, cellulosa, lignina e due di humus). I parametri forniti come input sono dati climatici (temperature mensili medie e precipitazione totale durante la stagione vegetativa), con i quali CO2FIX stima l'evapotraspirazione potenziale, e gli apporti annuali di biomassa da foglie, rami, radici e fusto ai comparti della lettiera [t/ha/anno] per ogni particella, che utilizzati da CO2FIX per calcolare il carbonio inizialmente presente nei vari comparti del suolo.

Questi valori sono stati ricavati utilizzando i *turnover rate* fissati nel modulo *biomass* e applicati agli stock di carbonio precedentemente stimati per i vari comparti di biomassa epigea.

### 2.2.6 Prodotti legnosi

Il modulo dei prodotti traccia i flussi di carbonio nella biomassa legnosa da quando essa viene rimossa tramite gli interventi selvicolturali (con perdite standard di lavorazione del 6% della massa) fino a fine vita. Per utilizzare il modulo è necessario definire l'impiego cui i prodotti sono destinati e l'uso che se ne fa a fine vita (riciclo, discarica o combustione per bioenergia). La biomassa rimossa appartenente alle frazioni *logwood* e *pulpwood* può essere ora ulteriormente frazionata per la produzione di segati, tavole, carta o a biomassa da combustione (Tab. 10). Le informazioni riguardo la destinazione dei prodotti sono state ricavate dai gestori delle tre aree di studio; per l'allocazione dei prodotti a fine vita, gli anni di vita dei vari prodotti e il riciclo sono invece stati utilizzati i parametri di default forniti dal manuale di CO2FIX (Schelhaas et al., 2004) (Tab. 11).

Tabella 10: suddivisione della biomassa legnosa asportata per frazione e prodotto di destinazione

Area studio	Frazione	Segati	Tavole	Carta	Combustione
Foresta Regionale di Fusine (UD)	Logwood	0.6	0.2	0.1	0.1
	Pulpwood	-	0.3	0.4	0.3
Comunali parmensi di Baselica e Pontolo (PR)	Logwood	0	0	0	1
	Pulpwood	-	0.6	0	0.4
Demanio Forestale di Fantella-Galeata (FC)	Logwood	0	0	0	1
	Pulpwood	-	0.4	0	0.6

Tabella 11: valori di default utilizzati per altri parametri del modulo prodotti

Destinazione (frazione)	Lungo termine	Medio termine	Breve termine
Segato	0.5	0.25	0.25
Tavole	0.3	0.5	0.2
Carta	0.01	0.1	0.89
<b>Fine vita (frazione)</b>			
	<b>Riciclo</b>	<b>Energia</b>	<b>Interramento</b>
Lungo termine	0.3	0.1	0.6
Medio termine	0.1	0.1	0.8
Breve termine	0.4	0.5	0.1
<b>Riciclo (frazione)</b>			
	<b>Lungo termine</b>	<b>Medio termine</b>	<b>Breve termine</b>
Lungo termine	0.1	0.3	0.6
Medio termine	-	0.1	0.9
Breve termine	-	-	0



	Emivita (anni)
Lungo termine	30
Medio termine	15
Breve termine	1
Discarica	5
Interramento	145

### 2.2.7 Bioenergia

Il modulo della bioenergia stima la riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> come conseguenza della sostituzione di combustibili fossili con biomassa legnosa, o di un aumento dell'efficienza della tecnologia di combustione. La mitigazione totale dipende quindi dalla quantità di biomassa che annualmente viene destinata a questo uso (proveniente da *slashwood* avviato a combustione e scarti della lavorazione primaria), dal contenuto energetico della biomassa utilizzata e dall'efficienza della tecnologia impiegata. A causa della ridotta disponibilità di informazioni riguardo questi parametri per le aree di studio analizzate, per tutti gli input necessari alla parametrizzazione del modulo bioenergia sono stati utilizzati i valori di default forniti dal manuale del software (Schelhaas *et al.*, 2004) (Tab. 12).

Tabella 12: valori di default utilizzati per la parametrizzazione del modulo bioenergia

Parametri legna da ardere			
Potere calorifico (MJ/kg)		15	
Potenziale di riscaldamento globale dei gas serra			
CO <sub>2</sub>	1	CH <sub>4</sub>	23
N <sub>2</sub> O	270	CO	2
TNMOC	12		
Combustibile da sostituire, tecnologia di combustione sue emissioni (g/kg combustibile)			
Combustibile da sostituire	Carbone	Potere calorifico (MJ/kg)	28
Tecnologia	Stufa	Efficienza (%)	24
CO <sub>2</sub>	2550	CH <sub>4</sub>	7.98
N <sub>2</sub> O	0.0372	CO	66.2
TNMOC	0.02		

Tecnologia per combustione di biomassa e sue emissioni (g/kg combustibile)			
<b>Tecnologia</b>	Stufa moderna	<b>Efficienza (%)</b>	25
<b>CO<sub>2</sub></b>	1550	<b>CH<sub>4</sub></b>	7.92
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0.06	<b>CO</b>	69.5
<b>TNMOC</b>	6.84		

## 2.2.8 Altri moduli

*Finance.* Il modulo finanza permette di considerare i costi e i profitti della gestione selvicolturale. Considerando che il progetto cui questo lavoro contribuisce prevede delle apposite azioni dedicate alla parte finanziaria, si è deciso di non simulare questo modulo in quanto più precisi risultati a riguardo verranno appunto forniti in una fase successiva del progetto.

*Carbon.* Il modello dei crediti di carbonio tiene traccia di tutti flussi da e per l'atmosfera nei diversi scenari simulati per stimare il risparmio in termini di carbonio rispetto allo scenario BAU. L'anno di inizio crediting è stato posto al 2022, così come l'anno della prima verifica. La durata del periodo di crediting è invece di 20 anni.

## 3. Risultati e Discussione

### 3.1 C stock e sink

La stima della quantità di carbonio attualmente stoccata ed assorbita dai popolamenti forestali delle tre aree di studio, effettuata mediante le tre metodologie precedentemente descritte, è riportata in sintesi nelle seguenti tabelle (Tab. 13, 14, 15) e grafici (Fig. 2, 3 e 4).

#### Foresta Regionale di Fusine

Tabella 13: valori medi in t/ha dei 5 pool di C e degli C stock e sink totali nella Foresta Regionale di Fusine

Metodologia	C epigeo (t/ha)	C ipogeo (t/ha)	C lettiera (t/ha)	C necromassa (t/ha)	C suolo (t/ha)	Stock C (t/ha)	Sink CO <sub>2</sub> (t/ha/anno)
<b>IPCC</b>	61.1	15.89	3.71	38.14	81	199.83	5.17
<b>INFC</b>	113.83	29.59	3.70	6.23	70.64	223.99	16.37
<b>Rilievi</b>	113.68	22.11	13.03	19.62	135.67	302.42	8.75

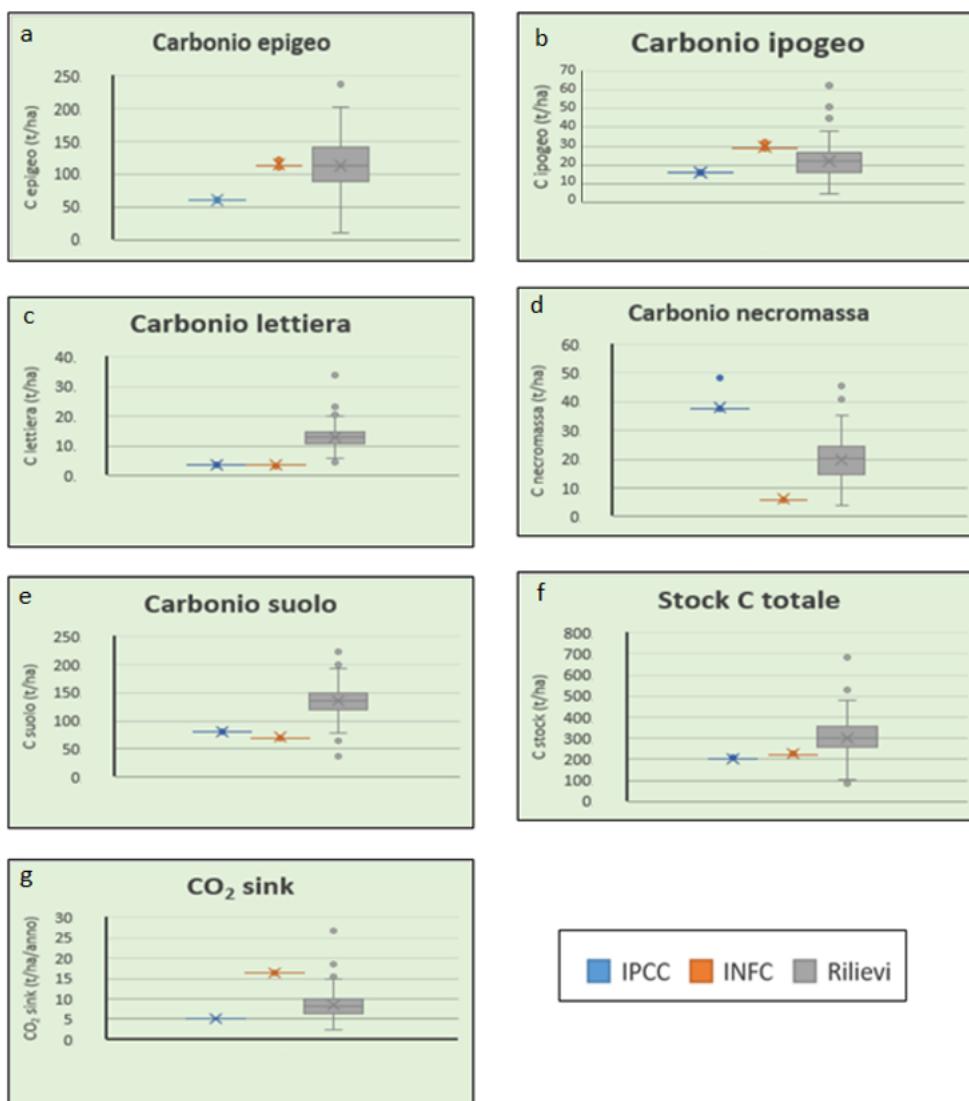


Figura 2: risultati dei 5 pool di carbonio e di stock e sink per la Foresta Regionale di Fusine con le tre metodologie utilizzate

### Comunalie parmensi di Baselica e Pontolo

Tabella 14: valori medi dei 5 pool di C e dei C stock e sink totali nelle Comunalie parmensi di Baselica e Pontolo

Metodologia	C epigeo (t/ha)	C ipogeo (t/ha)	C lettiera (t/ha)	C necromassa (t/ha)	C suolo (t/ha)	Stock C (t/ha)	Sink CO <sub>2</sub> (t/ha/anno)
IPCC	56.4	13.2	23.5	23.5	64.0	184.2	6.9
INFC	68.0	16.0	2.9	8.3	81.9	176.9	8.8
Rilievi	135.1	25.4	13.4	21.9	164.4	362.8	18.6

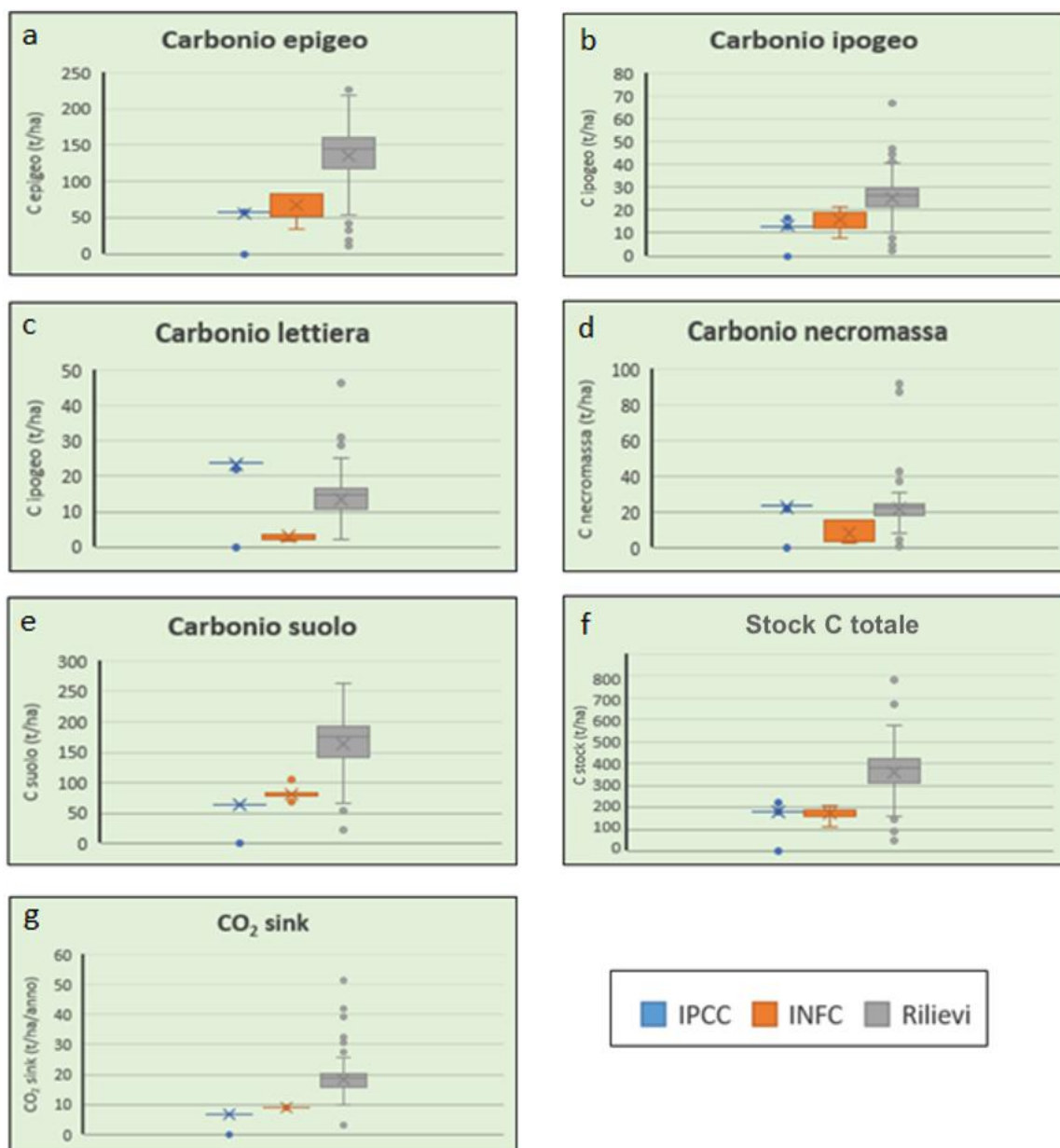


Figura 3: risultati dei 5 pool di carbonio e di stock e sink per le Comunalie parmensi di Baselica e Pontolo con le tre metodologie utilizzate

### Complesso Demaniale Fantella-Galeata

Tabella 15: valori medi dei 5 pool di C e dei C stock e sink totali nel Complesso demaniale Fantella-Galeata

Metodologia	C epigeo (t/ha)	C ipogeo (t/ha)	C lettiera (t/ha)	C necromassa (t/ha)	C suolo (t/ha)	Stock C (t/ha)	Sink CO <sub>2</sub> (t/ha/anno)
IPCC	56.4	13.9	35.8	23.2	64.0	193.3	6.9
INFC	49.8	12.7	3.7	2.8	80.1	149.9	7.1
Rilievi	44.3	25.7	17.2	6.5	119.7	114.7	14.7



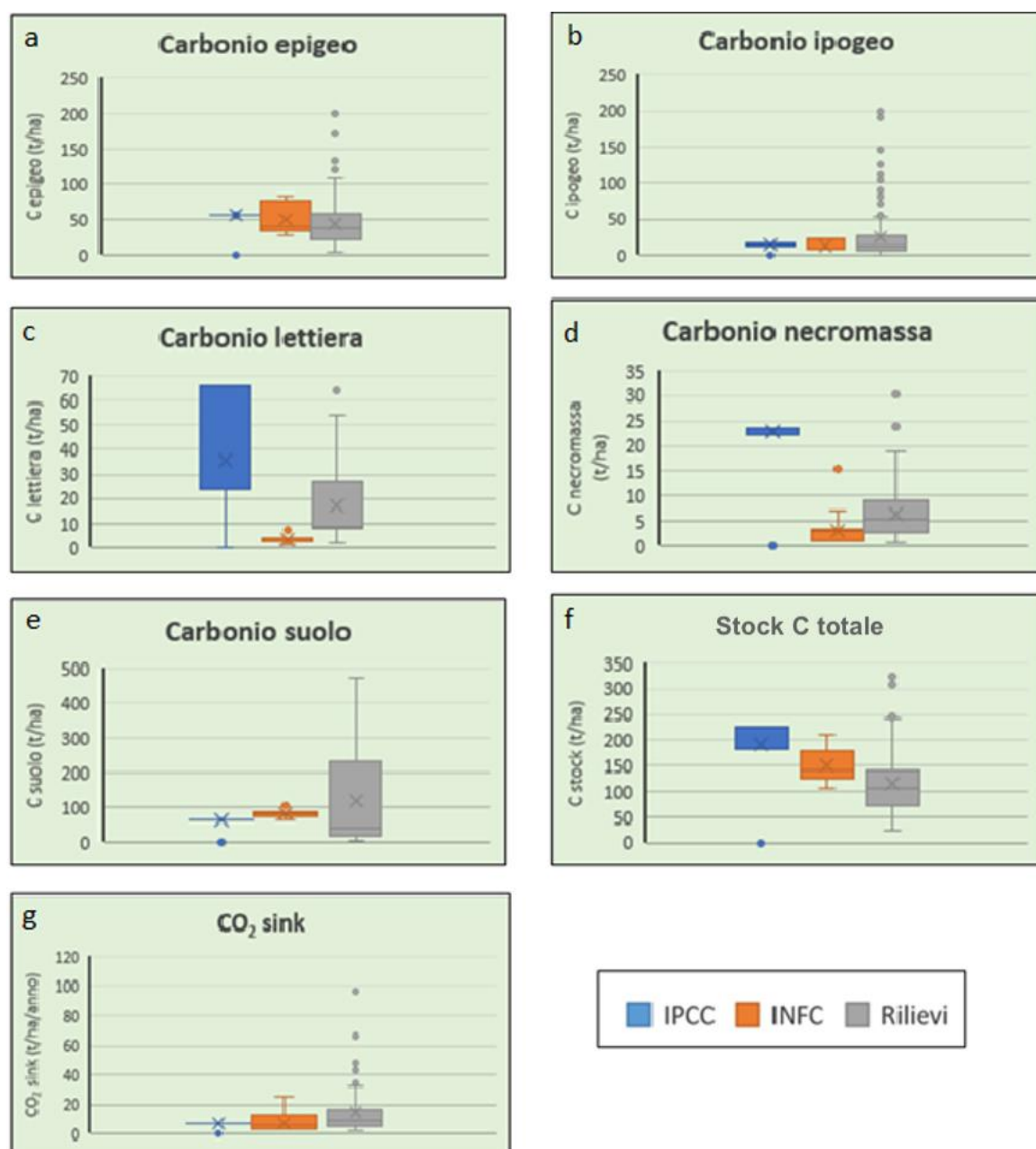


Figura 4: risultati dei 5 pool di carbonio e di stock e sink per il Complesso demaniale Fantella-Galeata con le tre metodologie utilizzate

I risultati ottenuti evidenziano sia similarità che differenze tra le tre metodologie (1: valori IPCC, 2: valori INFC, 3: rilievi di campo e dati PAF) con cui sono state effettuate le stime dei pool e degli assorbimenti di carbonio per ogni area di studio. Questa sintesi dei risultati ottenuti rende quindi evidente come non vi sia una coerenza nel confronto tra le tre metodologie utilizzate: talvolta una certa metodologia fornisce stime molto maggiori o minori delle altre due, mentre in alcuni casi tutte e tre forniscono risultati simili o diversi.

Innanzitutto va considerato che le tre metodologie utilizzano per i calcoli dei valori ricavati con prassi differenti e validi su scale diverse (rispettivamente internazionale, regionale e locale). Non deve

perciò sorprendere se i risultati ottenuti risultano talvolta dissimili tra loro. Tuttavia, mentre in alcuni casi queste differenze sono trascurabili, in altri i valori sono il doppio di quelli ottenuti con un'altra metodologia (Fig. 2d; Fig. 3a; Fig. 4d). Un altro motivo di divergenza fra le stime potrebbe essere l'anno di riferimento temporale: mentre i rilievi in campo sono stati effettuati nell'autunno 2020, i valori della metodologia 2 fanno invece riferimento a rilievi effettuati per l'Inventario Forestale Nazionale del 2005, con una differenza quindi di più di un decennio, periodo durante il quale i pool forestali sono certamente variati.

Il sink di carbonio misurato da dati in campo e PAF è risultato sempre maggiore di quello stimato con coefficienti standard IPCC, ed è da ritenersi più affidabile. In due casi su tre, anche lo stock totale di carbonio è risultato sottostimato dalla metodologia IPCC rispetto alle evidenze di campo o di piano, mentre il serbatoio di carbonio nel suolo risulta sempre sottostimato sia dalla metodologia IPCC che dai coefficienti INFC rispetto alle evidenze di campo.

Nell'area alpina, i valori regionali medi da INFC sovrastimavano il sink totale, probabilmente perché comprensivi di valori di incremento in volume superiori a quelli dell'area di studio di Fusine per aree coperte dalla stessa categoria forestale in siti più fertili o con climi più miti nella regione autonoma Friuli Venezia-Giulia. Il carbonio nella lettiera e nella necromassa risulta invece sempre sovrastimato dalla metodologia IPCC, che non tiene conto della specifica realtà delle foreste italiane rispetto alla media delle foreste temperate globali per quanto riguarda la modesta quantità di biomassa in questi comparti, risultato dell'intenso sfruttamento forestale che ha caratterizzato la storia del nostro paese fino al secolo scorso. Tale differenza ha il potere di rendere incoerenti i valori di C stock totale anche dove i tre metodi hanno prodotto stime molto simili per gli stock nella biomassa epigea (Fantella-Galeata).

Ciò considerato si può quindi infine ritenere che, sebbene i cavallettamenti siano stati effettuati solamente in alcune particelle forestali e perciò potrebbero non rispecchiare la variabilità ecologica totale delle aree di studio, la metodologia basata su rilievi in campo e dati PAF risulta essere la più accurata delle tre in quanto utilizza valori sito-specifici ovvero ricavati nei popolamenti forestali per cui sono state svolte le analisi.

### 3.2 CO2FIX

Le simulazioni dei serbatoi e dei flussi di carbonio forestali effettuate tramite il modello CO2FIX hanno permesso di ricostruire la variazione del carbonio in biomassa, suolo, prodotti legnosi e bioenergia nei prossimi 50 anni (Fig. 5-6-7 a,b,c), e di stimarne la differenza tra lo scenario BAU e due scenari in cui sono stati rispettivamente implementati gli interventi selvicolturali “climate-smart” e migliorata la destinazione dei prodotti legnosi (Fig. 5-6-7 d).

#### Foresta Regionale di Fusine

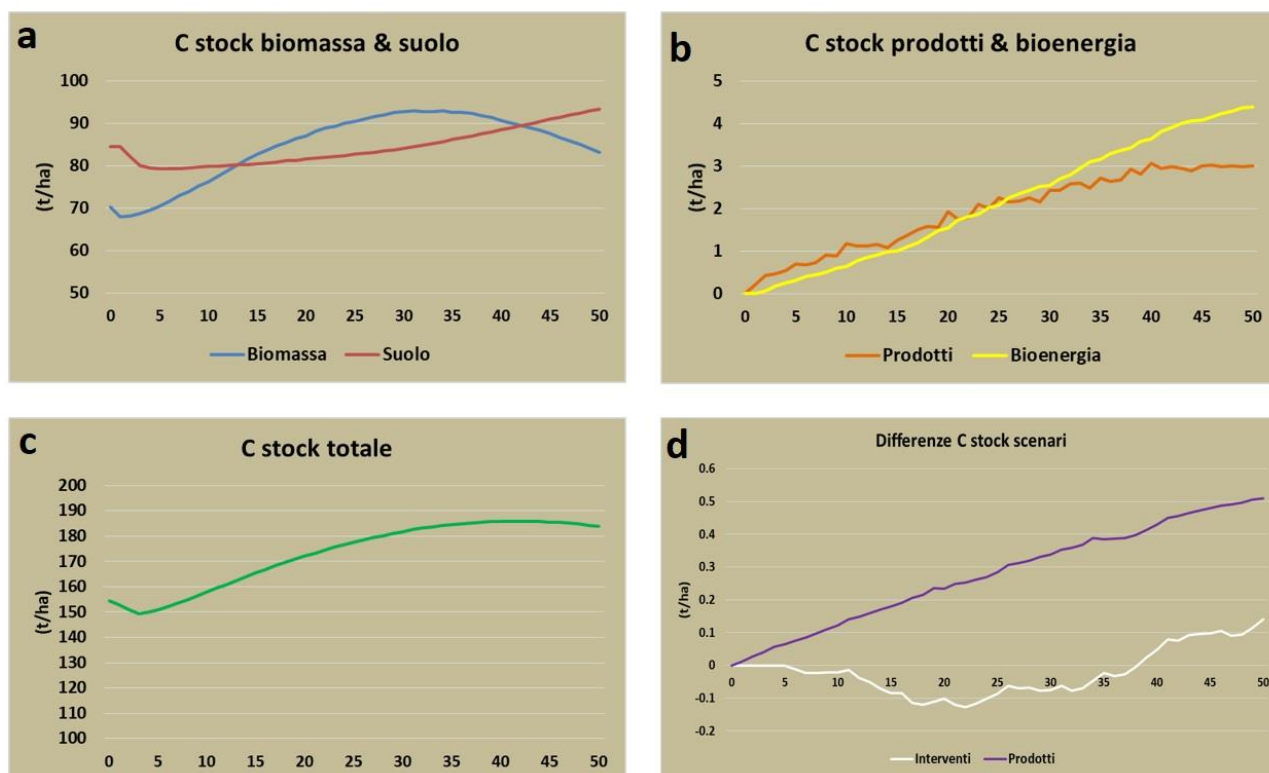


Figura 5: variazione dei pool di carbonio in 50 anni (a,b,c) e differenza tra lo scenario BAU e i due scenari alternativi simulati (d)

### Comunali parmensi di Baselica e Pontolo

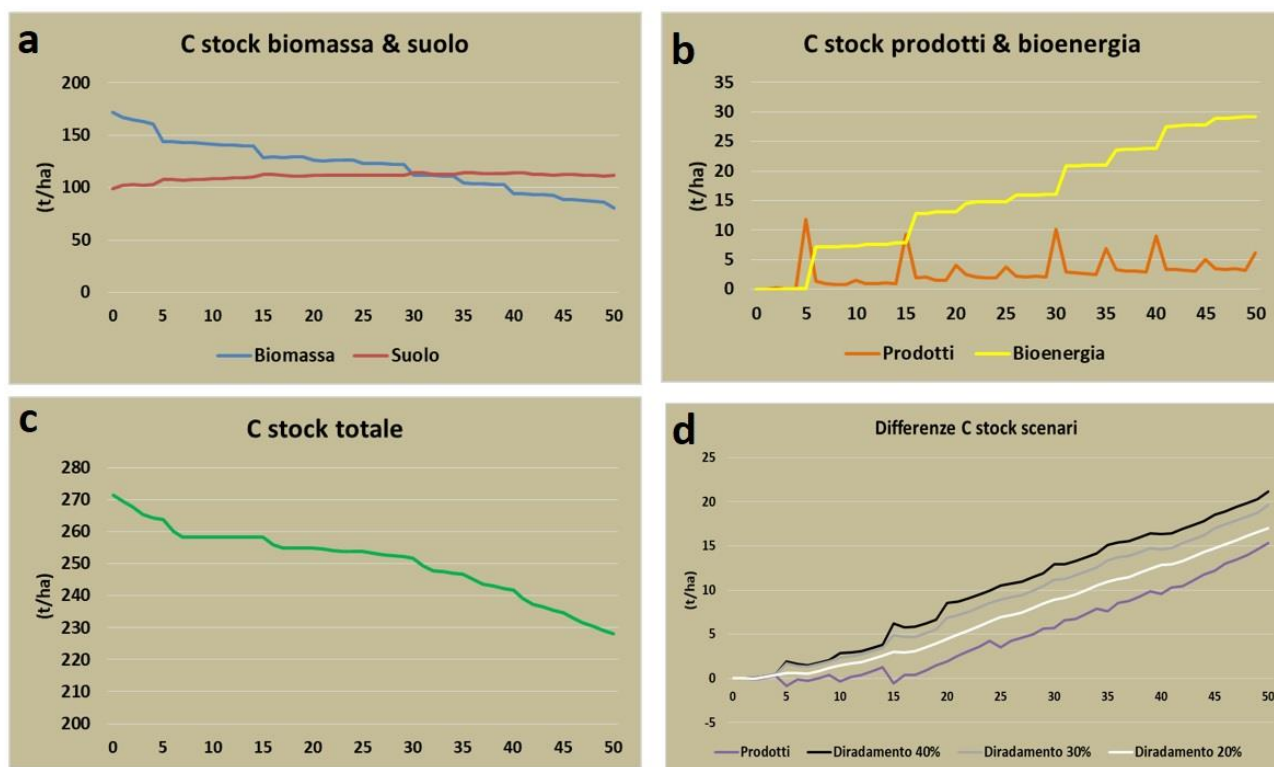


Figura 6: variazione dei pool di carbonio in 50 anni (a,b,c) e differenza tra lo scenario BAU e i due scenari alternativi simulati (d)

### Complesso Demaniale Fantella-Galeata

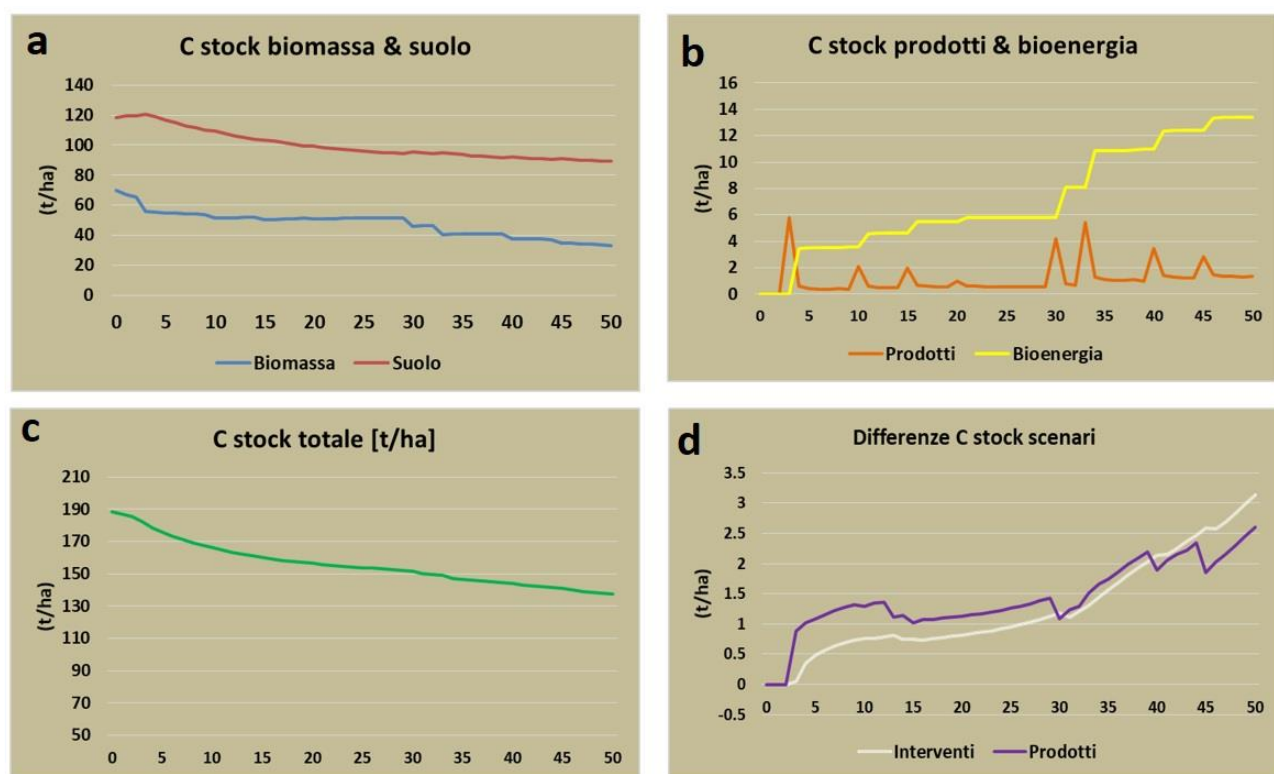


Figura 7: variazione dei pool di carbonio in 50 anni (a,b,c) e differenza tra lo scenario BAU e i due scenari alternativi simulati (d)

Le simulazioni mostrano, innanzitutto, come in tutte e tre le aree di studio il maggior pool di carbonio forestale all'anno 50 sia quello del suolo, in linea quindi con le statistiche nazionali (MIPAAFT, 2019). In particolare, in due siti su tre questo tende sempre ad aumentare durante i 50 anni di simulazione con andamento più o meno lineare, con l'eccezione del Demanio di Fantella-Galeata dove le frequenti ceduzioni generano una riduzione dello stock di carbonio del suolo, aumentando la respirazione eterotrofa in occasione dei tagli. Il secondo pool di carbonio è invece quello della biomassa, il quale mostra andamento opposto a quello del suolo con trend sempre decrescente col passare del tempo. Ciò è dovuto al fatto che il carbonio perso dalla biomassa a causa della mortalità naturale o di interventi selvicolturali è maggiore di quello acquisito con l'incremento legnoso annuo. Un motivo ulteriore può essere la elevata densità che caratterizza parte dei popolamenti forestali delle aree di studio analizzate: un'elevata densità comporta infatti intensa competizione, riducendo l'incremento corrente e l'assorbimento di carbonio, che non riescono a compensare le perdite da mortalità naturale o selvicolturale.

Diverso andamento è invece mostrato dal carbonio contenuto nei prodotti legnosi e da quello mitigato grazie all'uso della bioenergia. Il trend di questi due pool è sempre crescente: in particolare, aumenta costantemente quello della bioenergia, mentre il carbonio accumulato nei prodotti legnosi ha un andamento altalenante. Quest'ultimo è conseguenza dell'uso cui i prodotti legnosi sono destinati: negli anni in cui vengono effettuati la maggior parte degli interventi selvicolturali, il carbonio trasferito nei prodotti aumenta velocemente; tuttavia, tutte le volte in cui i prodotti vengono destinati a biomassa da combustione, il carbonio viene anche presto rilasciato in atmosfera e di conseguenza quello immagazzinato nel modulo dei prodotti legnosi cala altrettanto velocemente. In ogni caso, il serbatoio dei prodotti legnosi e degli effetti di sostituzione da bioenergia è di uno o due ordini di grandezza più piccolo rispetto a quello della biomassa viva e del suolo, su base ettaro.

Ciò considerato, nello scenario BAU lo stock totale di carbonio mostra in due delle tre aree di studio un andamento calante e andamento crescente in solo una di esse, la Foresta Regionale di Fusine. Qui i popolamenti analizzati sono caratterizzati principalmente dalla forma di governo della fustaia, hanno una densità adeguata e un'età (fase di perticaia o di fustaia giovane) in cui è alta la crescita in diametro e quindi l'assorbimento di carbonio. E' questo anche il caso delle fustaie di faggio nelle Comunalie parmensi di Baselica e Pontolo. Al contrario, la maggioranza dei popolamenti delle due aree appenniniche, in cui lo stock complessivo di carbonio diminuisce nel corso degli anni, possiedono effettivamente una densità molto elevata, con tassi di incremento legnoso limitati. Questo, insieme alla mortalità da competizione, all'età matura dei popolamenti e ai prelievi selvicolturali più o meno consistenti, non sufficientemente compensati dalla permanenza del carbonio nei prodotti legnosi o dagli effetti di sostituzione della bioenergia, determina una emissione annua di carbonio che supera gli assorbimenti: la foresta quindi non costituirebbe più un serbatoio di carbonio bensì una fonte. In caso si verificassero disturbi naturali guidati da eventi meteorologici estremi, come incendi, schianti da vento o mortalità da siccità – al momento non previsti negli scenari simulati – la perdita di carbonio sarebbe ancora più pronunciata.

Questo trend può essere in parte contrastato tramite una migliore destinazione dei prodotti legnosi, o effettuando interventi selvicolturali che, modificando la struttura dei popolamenti, diminuiscono la competizione ed aumentano quindi l'incremento legnoso annuo degli individui e conseguentemente il carbonio assorbito. Per verificare l'effettivo beneficio apportato da questi due scenari, sono state effettuate apposite simulazioni. I risultati mostrano che in tutte e tre le aree di studio sia appropriati interventi selvicolturali che una destinazione dei prodotti legnosi a più lunga durata mitigano le perdite di carbonio rispetto allo scenario business as usual (BAU). In particolare, nel caso della Foresta Regionale di Fusine una miglior uso dei prodotti legnosi sembrerebbe avere più benefici rispetto agli interventi selvicolturali; ciò potrebbe essere dovuto al fatto che in quest'area la gestione forestale è generalmente già adeguata per consentire un'appropriata crescita agli individui, con popolamenti che nella quasi totalità dei casi sono fustaie e non cedui, e densità raramente eccessive. Nel Complesso Demaniale Fantella-Galeata invece i due scenari alternativi mostrano un effetto simile tra loro: inizialmente la destinazione migliorata dei prodotti sembrerebbe avere un effetto maggiore, mentre verso la fine della simulazione gli interventi selvicolturali apportano un beneficio più elevato se confrontato con l'andamento dello stock di carbonio nello scenario BAU. In quest'area di studio, effettivamente, gli interventi selvicolturali risultano spesso assenti e di conseguenza insufficienti a garantire un'adeguata densità e incremento agli individui, e la biomassa rimossa è destinata quasi esclusivamente a legna da ardere; entrambe le soluzioni porterebbero quindi sicuramente notevoli benefici in termini di carbonio immagazzinato. Nell'area di studio delle Comunalie parmensi di Baselica e Pontolo, infine, interventi selvicolturali "climate-smart" arrecherebbero maggiori benefici rispetto ad un uso migliorato dei prodotti legnosi. In particolare, è possibile notare come ad un aumento nell'intensità dei diradamenti del 40%, 30% e 20% rispetto allo scenario BAU corrispondano aumenti proporzionali dello stock di carbonio, sempre rispetto alle pratiche selvicolturali correnti.

Quest'ultimo risultato, così come altri ottenuti durante questo studio, trova riscontro nella letteratura scientifica. In particolare, è già stato verificato come l'aumento di incremento legnoso sia maggiore quando il diradamento è più intenso (Bianchi *et al.*, 2010), con una differenza rispetto a popolamenti non diradati di circa il 20-30% quando l'intensità dei diradamenti è del 30% (Kim *et al.*, 2016). Il diradamento diminuisce il grado di copertura delle chiome e la densità arborea nonché la competizione, aumentando così la disponibilità di risorse quali radiazione luminosa al suolo, acqua e nutrienti e di conseguenza, proporzionalmente all'intensità dell'intervento, un accrescimento più vigoroso degli individui restanti (Pretzsch, 2005; Coomes & Allen, 2007). I diradamenti, inoltre, consentono di aumentare il diametro medio dei popolamenti e la stabilità fisica e biologica del soprassuolo nei confronti degli estremi climatici (van der Maaten, 2013). Questi interventi selvicolturali porterebbero quindi benefici in tutte quelle particelle forestali in stato di abbandono, con individui deperenti, densità eccessiva ed elevata vulnerabilità agli eventi meteorologici estremi. In popolamenti artificiali, i diradamenti selettivi hanno l'effetto di preparare la lettiera e il suolo a ospitare la rinnovazione delle specie native in occasione dei successivi tagli di rinnovazione, promuovendo la rinaturalizzazione verso boschi misti di latifoglie (Mondino & Bernetti, 1998). L'assenza dei diradamenti invece può portare a elevata fragilità dei popolamenti, determinando mortalità o crolli e di conseguenza compromettendo quindi anche i servizi offerti dai popolamenti quale la difesa idrogeologica (Bianchi *et al.*, 2010). Infine, come diretta conseguenza dell'aumento dell'incremento legnoso, i diradamenti consentono ai popolamenti di assorbire



maggiore quantità di carbonio dall'atmosfera (Collalti *et al.*, 2018); ciò è particolarmente rilevante per la mitigazione del cambiamento climatico. Anche nel corso di un altro progetto EU Life (LIFE FoResMit) è stato evidenziato come, nonostante una iniziale perdita di stock (20-35%) di carbonio dovuta ai diradamenti, a due anni dagli interventi sia aumentata la capacità di sequestro del carbonio rispetto alle foreste prive di cure colturali (BAU), da 17 a circa 30 t CO<sub>2</sub>/ha/anno nella biomassa e da 11 a circa 15 t CO<sub>2</sub>/ha/anno nel suolo. Grazie ai diradamenti la capacità di stoccaggio di carbonio ha quindi registrato un incremento di più del 50% rispetto allo scenario baseline.

Un ulteriore beneficio può essere apportato dall'allungamento dei turni. Uno studio sui cedui di castagno (Marziliano *et al.*, 2013), categoria forestale molto diffusa in due delle tre aree di studio, ha ad esempio dimostrato come mentre con turni di 15 anni gli assortimenti sono prevalentemente di piccole dimensioni e paleria minuta (82%), turni di 10 anni più lunghi forniscono un aumento di più del 30% della paleria grossa, che aumenta ulteriormente con un turno di 50 anni. Ciò conferma quindi come con turni più lunghi sia possibile ottenere una diversificazione dei prodotti, con assortimenti di maggior pregio, e quindi immagazzinare una maggiore quantità di carbonio nei prodotti legnosi con minori emissioni immediate da combustione di biomassa. Inoltre, turni di taglio più lunghi permetterebbero di ridurre la vulnerabilità agli incendi, aumentando il diametro dei fusti (carattere di resistenza al fuoco) e diminuendo la continuità orizzontale e verticale del combustibile a causa dell'autodiradamento e all'autopotatura dei polloni.

Nell'analisi dei risultati di questo studio vanno considerati diversi aspetti. Il primo consiste nel fatto che alcuni dati di input da usare nelle simulazioni (coefficienti allocazione, di crescita e di turnover) non erano disponibili né per le aree studio analizzate né da precedenti studi. Ciò ha ovviamente influito sull'attendibilità delle stime fornite da CO2FIX, le quali dipendono fortemente dall'accuratezza dei dati forniti come input. Un altro punto riguarda le curve incrementali: essendo queste state costruite utilizzando dati ricavati tramite cavallettamenti sul campo, ovvero a partire da un numero limitato di carote legnose prelevate, potrebbero non rispecchiare precisamente l'incremento medio reale dei popolamenti analizzati. Gli incrementi ricavati dalle carote trovano tuttavia riscontro con quelli calcolati con la funzione di Richards, con le ultime stime dell'Inventario Forestale Nazionale del 2015 (CAI medio di 4.2 m<sup>3</sup>/ha/anno) e con la letteratura: per i cedui i valori variano mediamente tra i 6-7 m<sup>3</sup>/ha/anno in popolamenti giovani e i 2-3 m<sup>3</sup>/ha/anno in popolamenti invecchiati, nelle fustaie invece oscillano attorno ai 5-6 m<sup>3</sup>/ha/anno ma decrescono nel caso di densità eccessive. Ciò conferma anche come interventi di conversione all'alto fusto possano aumentare l'incremento dei popolamenti, rallentato invece nei cedui invecchiati. Un incremento corrente di 16m<sup>3</sup>/ha/anno come quello registrato in fustaie appenniniche di conifere (douglasia) costituisce invece il potenziale massimo di popolamenti ottimamente gestiti e situati in ambienti particolarmente favorevoli per quanto riguarda la fertilità (Maetzke, 1999).

Il secondo aspetto da considerare è che gli interventi simulati interessano un'area di circa 100 ha per area di studio: il beneficio apportato dalla loro implementazione va quindi ponderato su questa superficie. Di conseguenza, se nelle aree di studio saranno implementati interventi selvicolturali su una superficie di 10-20 ha il risultato sarà essere notevolmente inferiore. Viceversa, nel caso in cui nel corso dei prossimi 50 anni si riuscisse ad effettuare interventi selvicolturali su una superficie più estesa, ad esempio 200 ha, i benefici ottenuti saranno proporzionalmente maggiori (Fig. 8).

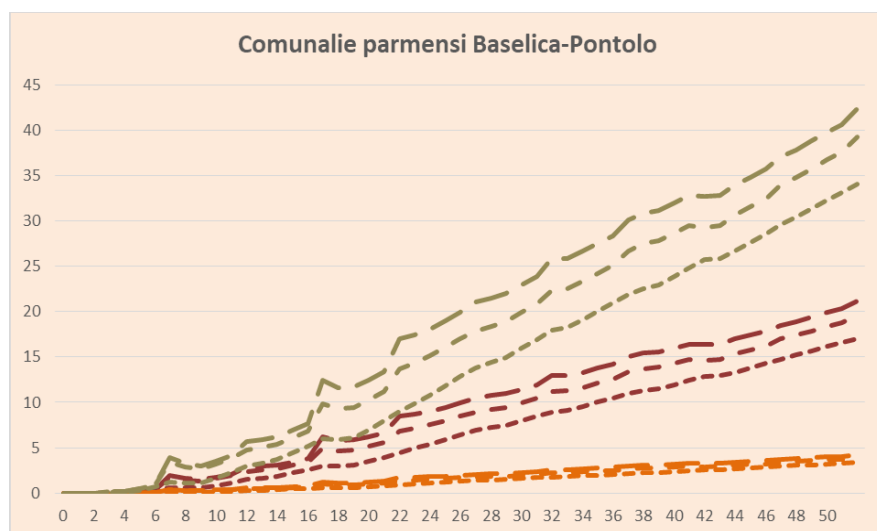
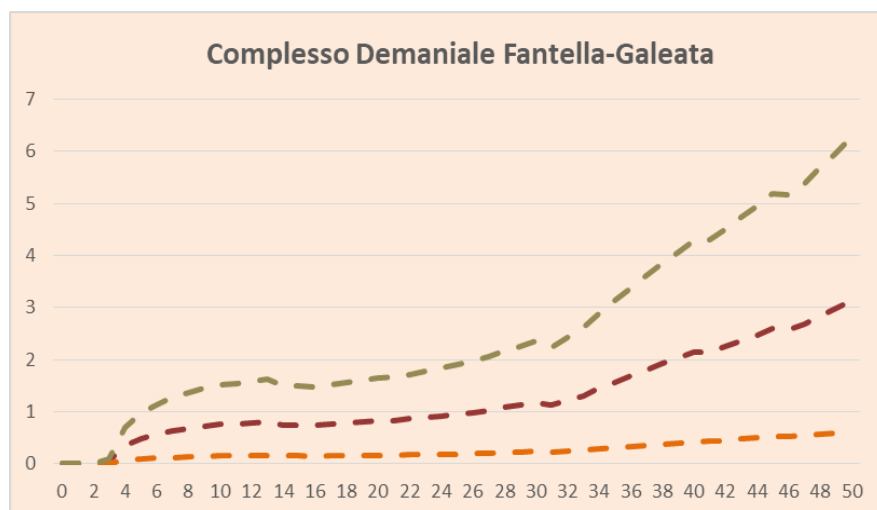
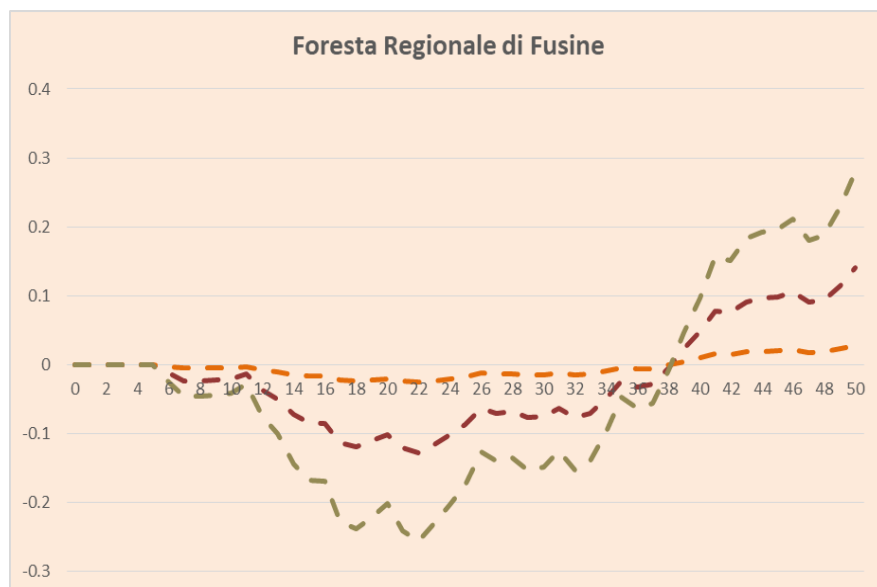


Figura 8: variazione dello stock di carbonio [tC/ha] rispetto allo scenario BAU a seconda della superficie su cui vengono implementati gli interventi selvicolturali (verde: 200 ha, rosso: 100ha, arancio: 20 ha) nelle tre aree di studio.

Il terzo aspetto riguarda invece i possibili disturbi naturali quali incendi o schianti da vento. Questi eventi infatti comportano una diminuzione dello stock di carbonio che può essere significativa, ad esempio a causa delle emissioni rilasciate in atmosfera in seguito a un incendio o al brusco rallentamento dell'assorbimento di carbonio conseguentemente all'abbattimento di numerosi individui provocato da uno schianto da vento. Questi disturbi quindi, se simulati, comporterebbero un'inevitabile diminuzione dello stock di carbonio rispetto a quello attualmente simulato, specialmente nello scenario BAU nel quale, a causa della mancata implementazione di interventi selvicolturali volti proprio a prevenire questi disturbi, il danno sarebbe maggiore.

Per una prima analisi di questo fenomeno sono state considerate stime fornite da recenti studi scientifici (Alcasena *et al.*, 2021; Pilli *et al.*, 2021) e le analisi svolte in una fase precedente di questo progetto (Vacchiano & Nevola, 2021b). Per quanto riguarda gli incendi, si è ipotizzata una frequenza di tre eventi ogni 50 anni su una superficie pari al 20% dell'area di studio. Per gli schianti da vento sono stati ipotizzati due eventi sull'1% dell'area di studio durante i 50 anni di simulazione. Per entrambi i disturbi si è ipotizzata l'emissione di 25-30 t/ha di carbonio per ogni evento, a seconda del tipo forestale, della densità di carbonio nella biomassa e della severità del disturbo; le emissioni vengono invece dimezzate in seguito alla realizzazione di appropriati interventi selvicolturali di prevenzione. Non è stato qui considerato il rallentamento dell'accrescimento annuale e quindi la minore capacità di accumulare carbonio da parte degli individui conseguentemente a un disturbo naturale. Le analisi mostrano come in caso di disturbo naturale lo stock di carbonio diminuisca notevolmente in tutte e tre le aree di studio rispetto a uno scenario BAU, e come invece questo effetto sarebbe mitigato nel caso di implementazione di interventi selvicolturali di prevenzione (Fig. 9).

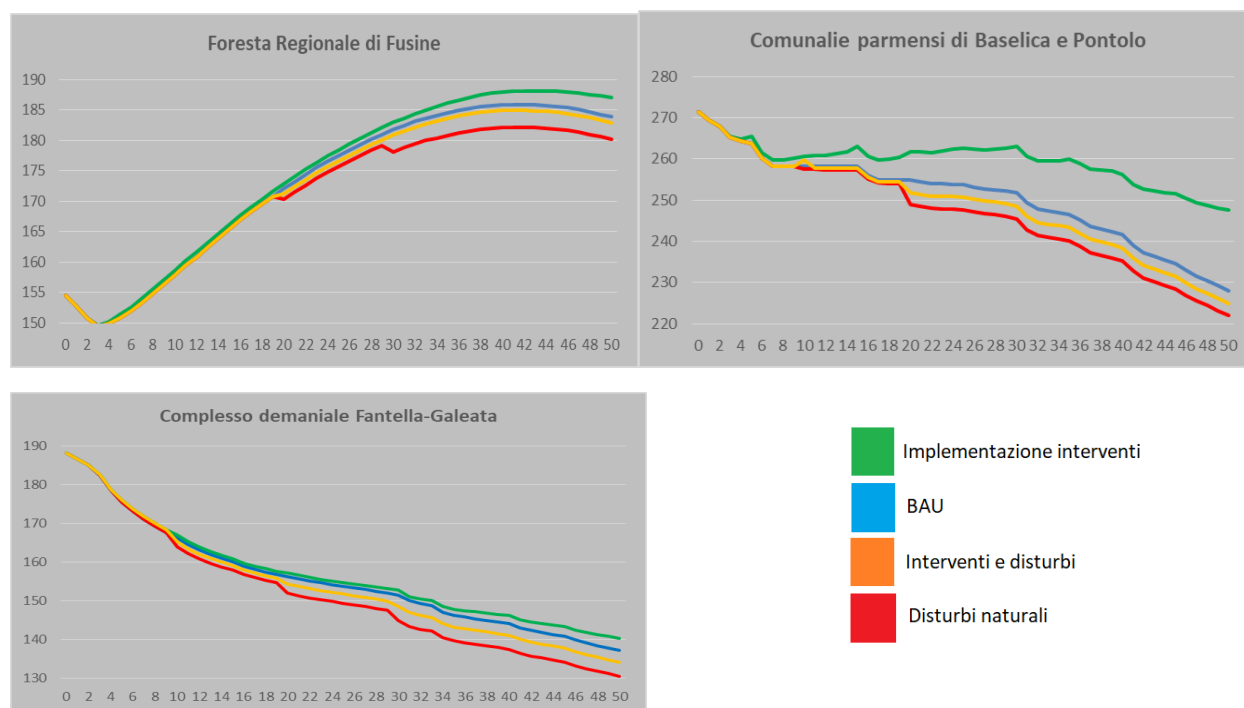


Figura 9: variazione dello stock di carbonio [tC/ha] rispetto allo scenario BAU in seguito ai disturbi naturali, con e senza implementazione di interventi selvicolturali di prevenzione

## Conclusioni

Il maggior assorbimento di carbonio generato da interventi selvicolturali “climate-smart” rispetto alla prosecuzione delle attuali pratiche selvicolturali è la base per generare crediti di carbonio per il mercato volontario, la cui vendita potrebbe supportare i costi degli interventi addizionali (Vacchiano *et al.*, 2018).. Il mercato volontario dei crediti di carbonio potrebbe così compensare i costi extra delle buone pratiche selvicolturali, favorendone la diffusione sul territorio nazionale e invertendo l’abbandono e il degrado del paesaggio che attualmente caratterizza molte foreste delle aree interne del Paese, che rischia di aumentarne la vulnerabilità climatica e diminuire ulteriormente il loro potenziale di mitigazione.

Simulazioni come quelle effettuate per questo studio permettono di contabilizzare in anticipo il carbonio extra che verrebbe assorbito rispetto allo scenario BAU e quindi di calcolare i crediti di carbonio generati dall’implementazione di un’appropriata gestione selvicolturale. CO2FIX si è complessivamente dimostrato uno dei modelli più completi ed affidabili disponibili per la simulazione dei flussi di carbonio in ecosistema forestale, e uno dei pochi in grado di simulare dettagliatamente gli effetti di diversi tipi di interventi selvicolturali sulle dinamiche del carbonio a breve termine, anche per popolamenti disetanei. Un miglioramento ulteriore dei dati di input, utilizzando informazioni calibrate a scala locale, renderà possibile supportare adeguatamente la pianificazione forestale, programmando interventi selvicolturali in grado di mantenere o migliorare la fornitura di servizi ecosistemici e il sequestro di carbonio, così da bilanciare efficacemente produttività, stabilità del suolo, protezione da disturbi naturali, integrità dell’ecosistema e mitigazione del cambiamento climatico.

## Bibliografia

- Alcasena, F., Rodrigues, M., Gelabert, P., Ager, A., Salis, M., Ameztegui, A., Cervera, T., & Vega-García, C. (2021). Fostering Carbon Credits to Finance Wildfire Risk Reduction Forest Management in Mediterranean Landscapes. *Land*, 10(10), 1104.
- Bianchi, L., Paci, M., & Bresciani, A. (2010). Effects of thinning intensities in experimental plots of Black European pine in "Foreste Casentinesi, Monte Falterona and Campigna National Park" (Tosco-Romagnolo Apennine, Italy), eight years after the felling. *Forest@*, 7, 73-83.
- Boncina, A., Kadunc, A. & Robic, D. (2007). Effects of selective thinning on growth and development of beech (*Fagus sylvatica* L.) forest stands in south-eastern Slovenia. *Annals of Forest Scienc,e* 64, 47–57.
- Bravo, F., Bravo-Oviedo, A., & Diaz-Balteiro, L. (2008). Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forests under two management alternatives: a modeling approach. *European Journal of Forest Research*, 127(3), 225-234.
- Brunner, I., Bakker, M. R., Björk, R. G., Hirano, Y., Lukac, M., Aranda, X., & Ostonen, I. (2013). Fine-root turnover rates of European forests revisited: an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. *Plant and Soil*, 362(1), 357-372.
- Collalti, A., Trotta, C., Keenan, T. F., Ibrom, A., Bond-Lamberty, B., Grote, R., Vicca, S., Reyer, C.P.O., Migliavacca, M., Veroustraete, F., Anav, A., Campioli, M., Scoccimarro, E., Sigut, L., Grieco, E., Cescatti, A., & Matteucci, G. (2018). Thinning can reduce losses in carbon use efficiency and carbon stocks in managed forests under warmer climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(10), 2427-2452.
- Coomes, D. A., & Allen, R. B. (2007). Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology*, 95(5), 1084-1097.
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C., Hauck, J., ... & Zeng, J. (2021). Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data Discussions*, 1-191.
- Gasparini, P., Di Cosmo, L., & Pompei, E. (eds.) (2013). Il contenuto di carbonio delle foreste italiane. Inventario nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC2005. Metodi e risultati dell'indagine integrativa. Ministero delle politiche agricole, alimentari e forestali, Corpo Forestale dello Stato; Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale, Trento, Italy..
- Harmon, M. E., Krankina, O. N., Yatskov, M., & Matthews, E. (2001). Predicting broad-scale carbon stores of woody detritus from plot-level data. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., & Stewart, B.A. (eds.), *Assessment methods for soil carbon*, Lewis Publishers, pp. 533-552.
- Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., Fatoyimbo, L., Hansen, M.C., Herold, M., Houghton, R.A., Potapov, P.V., Requena Suarez, D., Roman-Cuesta, R.M., Saatchi, S.S., Slay, C.M., Turubanova, S.A., & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3), 234-240.
- Hu, M., Lehtonen, A., Minunno, F., & Mäkelä, A. (2020). Age effect on tree structure and biomass allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Annals of Forest Science*, 77(3), 1-15.

- IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan.
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC, Bern, Switzerland.
- Jandl, R., Vesterdal, L., Olsson, M., Bens, O., Badeck, F., & Rock, J. (2007). Carbon sequestration and forest management. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 2(17), 1-16.
- Kim, M., Lee, W. K., Kim, Y. S., Lim, C. H., Song, C., Park, T., Son, Y., & Son, Y. M. (2016). Impact of thinning intensity on the diameter and height growth of *Larix kaempferi* stands in central Korea. *Forest Science and Technology*, 12(2), 77-87.
- Konôpka, B., Pajtík, J., Máliš, F., Šebeň, V., & Maľová, M. (2017). Carbon stock in aboveground biomass of vegetation at the High Tatra Mts. twelve years after disturbance. *Central European Forestry Journal*, 63(2-3), 142-151.
- Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M., & Sievänen, R. (2005). Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling*, 189(1-2), 168-182.
- Maetzke, F. (1999). I popolamenti di Douglasia nell'Appennino toscano: accrescimento e produzione. *Italia Forestale e Montana*, 54, 228-235.
- Magnani, F., & Raddi, S. (2014). Verso una stima della mortalità individuale e degli incrementi netti dei boschi italiani. Quale margine di sostenibilità per la gestione forestale in Italia? *Forest@*, 11: 138-148.
- Marziliano, P.A., Iovino, F., Menguzzato, G., Scalise, C., & Nicolaci, A. (2013). Aspetti dendroauxometrici, assortimentali e caratteristiche della necromassa in cedui di castagno. *Forest@*, 10(1), 14-25.
- MIPAAFT (2019). RaF Italia 2017-2018. Rapporto sullo stato delle Foreste e del settore forestale in Italia. Compagnia delle Foreste, Arezzo, Italy.
- Mondino, G.P., & Bernetti, G. (1998). I tipi forestali. Boschi e macchie di Toscana. Regione Toscana, Firenze, Italy.
- Muukkonen, P., & Lehtonen, A. (2004). Needle and branch biomass turnover rates of Norway spruce (*Picea abies*). *Canadian Journal of Forest Research*, 34(12), 2517-2527.
- Nabuurs, G.J., Delacote, P., Ellison, D., Hanewinkel, M., Lindner, M., Nesbit, M., Ollikainen, M., & Savaresi, A. (2015). A new role for forests and the forest sector in the EU post-2020 climate targets. From Science to Policy 2. European Forest Institute, Joensuu, Finland.
- Pilli, R., Grassi, G., Kurz, W. A., Smyth, C. E., & Blujdea, V. (2013). Application of the CBM-CFS3 model to estimate Italy's forest carbon budget, 1995–2020. *Ecological Modelling*, 266, 144-171.
- Pilli, R., Vizzarri, M. & Chirici, G. (2021) Combined effects of natural disturbances and management on forest carbon sequestration: the case of Vaia storm in Italy. *Annals of Forest Science*, 78, 46 (2021).



- Pretzsch, H. (2005). Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long-term experimental plots. *European Journal of Forest Research*, 124(3), 193-205.
- Scarfò, F., Mercurio, R. (2009). Il calcolo dei crediti di carbonio: il modello CO2FIX v. 3.1 applicato ad una faggeta sotto Forest Management nel sud Italia. *Forest@*, 6: 215-228.
- Schelhaas, M. J., Van Esch, P. W., Groen, T. A., De Jong, B. H. J., Kanninen, M., Liski, J., Maser, O., Mohren, G.M.J., Nabuurs, G.J., Palosuo, T., Pedroni, L., Vallejo, A., & Vilén, T. (2004). CO2FIX V 3.1 A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems (No. 1068). Alterra-Centrum Ecosystemen, Wageningen, Netherlands.
- 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.
- Thorsen, J., Mavsar, R., Tyrväinen, L., Prokofieva, I., & Stenger, A. (2014). The Provision of Forest Ecosystem Services. What Science Can Tell Us 5, volume 1. European Forest Institute, Joensuu.
- Vacchiano, G., & Nevola, E. (2021°). Baseline of the Carbon stock and sink. Life CO2 PEF&PES. Deliverable C1.2. <https://lifeco2pefandpes.eu/wp-content/uploads/2021/07/Baseline-of-the-Carbon-stock-and-sink-for-each-area.pdf>
- Vacchiano, G., & Nevola, E. (2021b). Report on risk assessment – fire, windthrow and natural hazards. Life CO2 PEF&PES. Deliverable C1.3. <https://lifeco2pefandpes.eu/wp-content/uploads/2021/07/Report-on-risk-assessment-fire-windthrow-and-natural-hazards-for-each-area.pdf>
- Vacchiano, G., Berretti, R., Romano, R., & Motta, R. (2018). Voluntary carbon credits from improved forest management: Policy guidelines and case study. *iForest*, 11, 1–10.
- van der Maaten, E. (2013). Thinning prolongs growth duration of European beech (*Fagus sylvatica* L.) across a valley in southwestern Germany. *Forest Ecology and Management*, 306, 135-141.
- Vilén, T., & Fernandes, P. M. (2011). Forest fires in Mediterranean countries: CO<sub>2</sub> emissions and mitigation possibilities through prescribed burning. *Environmental Management*, 48(3), 558-567.
- Vitullo, M., De Laurentis, R., & Federici, S. (2007). La contabilità del carbonio contenuto nelle foreste italiane. *Silvae*, 9, 91-104.
- Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R. & Mencuccini, M. (2005). Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*, 4, 1-63.