

GUIDO MARTINI, SANDRO SACCHELLI

Analisi dell'idoneità territoriale per attività di terapia forestale in provincia di Trento: un modello GIS per la quantificazione delle emissioni di composti organici biogenici volatili (BVOC)

Introduzione

Forest bathing e Forest Therapy

Le foreste sono ecosistemi complessi costituiti da una varietà di interazioni tra elementi abiotici, flora e fauna. A seconda del tipo di foresta e delle caratteristiche dell'ecosistema, le aree boscate possono fornire all'umanità numerosi prodotti e benefici, noti come servizi ecosistemici (MEA, 2005; WATSON *et al.*, 2018). La quantità e il tipo di servizi ecosistemici forniti dipendono da diversi fattori, tra cui le caratteristiche forestali (LI *et al.*, 2023; HE *et al.*, 2013), le condizioni climatiche (OFFIT *et al.*, 2021) e la gestione forestale (TONG *et al.*, 2020; TYUKAVINA *et al.*, 2015). Oltre alle funzioni ecologiche, a quelle di approvvigionamento e a quelle di regolazione, le foreste offrono benefici culturali, sociali e ricreativi (CHIABAI *et al.*, 2011; BRAVO-OVIEDO *et al.*, 2014). Tra questi, il bagno di foresta (o *Forest bathing* – FB) e la

terapia forestale (o *Forest Therapy* – FT) sono importanti servizi ecosistemici riconosciuti per i loro effetti benefici sulla salute umana.

I termini FB e FT sono spesso trattati come sinonimi. Tuttavia, il FB si riferisce genericamente a pratiche basate sulla natura sviluppate in aree forestali per il miglioramento del benessere, mentre la FT riguarda pratiche strutturate promosse da professionisti formati per lavorare a livello terapeutico (KIM *et al.*, 2021). In diversi paesi asiatici, come Giappone, Corea del Sud, Cina e Taiwan, i bagni di foresta sono una pratica consolidata e vengono utilizzati da tempo per migliorare lo stato di salute e ridurre i livelli di stress (SONG *et al.*, 2016). La ricerca scientifica evidenzia che trascorrere del tempo in foresta o in spazi verdi urbani apporta numerosi benefici per la salute (LI, 2019; TWOHIG-BENNETT *et al.*, 2018), inclusi effetti positivi dal punto di vista psicologico, come la riduzione di stress e ansia, il miglioramento delle interazioni sociali e dello stile di vita. Per quan-

ATTI DEL WORKSHOP “BENESSERE IN FORESTA”

to riguarda i benefici mentali, la ricerca sugli effetti di FB/FT su individui affetti da *burnout* ha mostrato risultati positivi e un'ottimizzazione delle risposte allo stress (IKEI *et al.*, 2017). Inoltre, la FT aiuta a regolare la produzione di ormoni chiave come cortisolo, adrenalina, noradrenalina, dopamina e serotonina (OCHIAI *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2016) e comporta miglioramenti dal punto di vista cardiovascolare, metabolico, immunitario e antiinfiammatorio (DODEV *et al.*, 2020). Numerosi studi hanno infine evidenziato, a seguito di attività di FB/FT, un efficientamento del sistema immunitario aumentando il numero di cellule *natural killer* (NK), responsabili della lotta contro tumori e infezioni virali (TSAO *et al.*, 2018).

I Composti Organici Biogenici Volatili (BVOC) e scopo del lavoro

Parte di questi benefici sono strettamente legati ad alcune molecole di origine vegetale note come BVOC, ovvero “Composti Organici Biogenici Volatili” (MENEGUZZO *et al.*, 2019). I BVOC includono monoterpenoidi volatili e altri composti emessi dalle piante (CHO *et al.*, 2017; ZHOU e PICHESKY, 2020).

I BVOC sono molto importanti per l'ecologia degli alberi, poiché facilitano la comunicazione tra gli stessi in risposta a fattori ambientali. Inoltre, facilitano l'attrazione di impollinatori come gli insetti (SHARIFI-RAD *et al.*, 2017). La presenza di BVOC contribuisce inoltre alla stabilità dell'ecosistema e aumenta la resilienza ai cambiamenti climatici (SEIDL *et al.*, 2017).

I benefici per la salute derivanti dall'inalazione di BVOC sono ben noti e scientificamente supportati (CHO *et al.*, 2017; DE ALVARENGA *et al.*, 2023). A livello nazionale recenti indagini hanno evidenziato che l'inalazione di monoterpeni emessi dalle piante e in particolare di α -pinene, può produrre uno specifico effetto ansiolitico (DONELLI *et al.*, 2023).

I BVOC comprendono un'ampia varietà di molecole appartenenti a diverse classi e gruppi chimici. In generale, sono composti a basso peso molecolare appartenenti principalmente

alla famiglia degli isoprenoidi, che rappresentano circa il 50% delle emissioni. Gli idrocarburi monoterpenici, tra cui α -pinene e β -pinene, β -ocimene, d-limonene, sabinene, mircene e canfene, costituiscono circa il 35-40% delle emissioni totali (NIINEMETS *et al.*, 2013).

Le emissioni di BVOC dipendono da molti fattori quali il meteo, l'altitudine, l'ora del giorno e la stagionalità (MENEGUZZO *et al.*, 2019), oltre che dalla specie arborea e da altre componenti ambientali (BOURTSOUKIDIS *et al.*, 2019).

La stima della quantità di BVOC è diventata un argomento sempre più discusso nella comunità scientifica. Le misurazioni in campo possono prevedere l'impiego di rilevatori di fotoionizzazione oppure campionamenti e successive analisi di laboratorio al gascromatografo, associato allo spettrometro di massa (GC-MS) (MENEGUZZO e ZABINI, 2022). Diverse strumentazioni, come le tecnologie lidar e fotogrammetriche montate su droni sono state inoltre sviluppate per soddisfare questa esigenza (DUAN *et al.*, 2024). Un altro approccio largamente seguito è quello della modellistica. Tuttavia, molti studi evidenziano come la stima dei BVOC comporti solitamente un'incertezza, che varia dal 90% al 120% (WANG *et al.*, 2021; HARTLEY *et al.*, 2017) in primis dipendente dalla difficoltà di eseguire esperimenti sul campo ad ampia scala e alla definizione di modelli previsionali accurati.

Lo sviluppo di modelli di stima dei BVOC è iniziato negli anni '90, con i primi sforzi come quelli di GUENTHER *et al.* (1995). Da allora, sono stati sviluppati molti studi che hanno considerato numerose variabili di input adatte a diversi obiettivi. ZEMANKOVA e BRECHLER (2010), ad esempio, hanno confrontato le emissioni naturali di BVOC e quelle antropogeniche nella Repubblica Ceca, evidenziando come le emissioni naturali rappresentassero circa il 50% delle emissioni antropogeniche. Analogamente, SIMON *et al.* (2001) hanno utilizzato un modello per stimare la quantità di BVOC emessa dalle foreste francesi in base a diversi tipi di vegetazione forestale. Le variabili chiave utilizzate nei modelli di stima dei BVOC includono il tipo di foresta, la specie, la copertura

forestale, i fattori di emissione specie-specifici, la densità fogliare, la radiazione solare, la temperatura ambientale, la temperatura fogliare e vari coefficienti e fattori di correzione ambientale empirici (SIMON *et al.*, 2001; ZEMANKOVA e BRECHLER, 2010). Gli studi evidenziano che la produzione di BVOC dipende principalmente dall'attività fogliare, il che significa che le emissioni seguono andamenti stagionali. Sebbene i singoli composti siano prodotti in modo diverso, in generale, il trend delle emissioni di BVOC raggiunge il picco in primavera ed estate e diminuisce nelle stagioni più fredde, come autunno e inverno (ZEMANKOVA e BRECHLER, 2010). In generale, gli studi suggeriscono che le variabili più impattanti sulle emissioni di BVOC sono la temperatura, la radiazione solare e la specie arborea. Pertanto, i modelli di stima dei BVOC si basano principalmente su questi fattori.

Date queste premesse, l'obiettivo dell'articolo è quello di sviluppare un modello GIS (Geographic Information System) per stimare le emissioni di BVOC e analizzare i fattori ambientali che ne influenzano la produzione, al fine di identificare le aree potenzialmente più idonee ad attività di FB/FT in provincia di Trento in base alla presenza di tali composti.

Materiali e metodi

Inquadramento del lavoro

Il modello è stato sviluppato utilizzando QGIS (versione 3.28.11) per la pre-elaborazione dei dati spaziali grezzi e GRASS GIS (versione 8.30) per l'esecuzione dell'algoritmo. L'algoritmo di base è stato sviluppato in Python, utilizzando Visual Studio Code.

I calcoli del modello si basano sulle equazioni e sulle ipotesi sviluppate in letteratura. In particolare, il lavoro di riferimento è quello di PACHECO *et al.* (2014), opportunamente integrato e ricalibrato per l'area di studio.

Come accennato, le emissioni dei BVOC dipendono da molti fattori e condizioni ambien-

tali. A seconda della specie forestale la produzione di isoprenoidi può essere direttamente collegata alla sintesi dei cloroplasti; in questo caso, le emissioni sono influenzate sia dalla luce che dalla temperatura e il relativo algoritmo di calcolo prende il nome di "algoritmo L+T". Altre specie, invece, sintetizzano isoprenoidi e li immagazzinano rilasciando BVOC in un secondo momento. Questo processo si basa solo sulla temperatura e il relativo algoritmo viene definito "algoritmo T". Le emissioni totali possono essere dunque stimate come la somma delle emissioni di L+T e T (PACHECO *et al.*, 2014; GUENTHER *et al.*, 1993) (equazione 1):

$$E_{tot} = E_{(L+T)} + E_{(T)} \quad [1]$$

dove E_{tot} rappresenta l'emissione totale, $E_{(L+T)}$ è l'emissione derivante da luce e temperatura ed $E_{(T)}$ è l'emissione derivante dalla sola temperatura.

Le emissioni mensili per i gruppi $E_{(L+T)}$ ed $E_{(T)}$ possono essere stimate dalle seguenti equazioni (equazioni 2 e 3):

$$E_{(L+T)} = BEF_{L+T} \cdot Db \cdot Nd \cdot Nl \quad [2]$$

$$E_{(T)} = BEF_T \cdot Db \cdot Nd \cdot Nl \cdot Nn \quad [3]$$

dove BEF_{L+T} e BEF_T sono le emissioni giornaliere (*Basal Emission Factors*) per ciascun algoritmo, Db è la densità di biomassa fogliare calcolata in funzione dell'indice di area fogliare (*Leaf Area Index* – LAI) e del valore specie-dipendente dell'area fogliare specifica (*Specific Leaf Area* – SLA), Nd è il numero di giorni per mese, Nl il numero di ore di luce al giorno e Nn il numero di ore notturne al giorno.

Il modello sviluppato è adatto per specie che emettono isoprene e per alcune specie che emettono monoterpeni, comprese piante semperverdi e decidue (PACHECO *et al.*, 2014). I geodati e le variabili applicate per l'implementazione del modello sono elencati nel paragrafo seguente.

ATTI DEL WORKSHOP “BENESSERE IN FORESTA”

Il Sistema Informativo Territoriale

Il Sistema Informativo Territoriale (SIT) su cui si basa il modello di analisi è composto da un set di variabili geografiche amministrative, infrastrutturali, ambientali, climatiche e vegetazionali della provincia di Trento elencate in tabella 1.

Sono stati inoltre incorporati e utilizzati nel modello due set di dati non spaziali:

- valori dei fattori di emissione basale (BEF) ($\text{ug g(DW)}^{-1} \text{ h}^{-1}$). I valori di BEF rappresentano le emissioni empiriche (potenziali) di BVOC per ogni specie ed esprimono la capacità delle piante di emettere isoprenoidi. Sono stati considerati 10 composti organici e 20 tipologie forestali, per un totale di 200 BEF.
- Area fogliare specifica (SLA) ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$). La SLA rappresenta il rapporto tra area fogliare e massa fogliare per ciascuna specie. Entrambi i valori di BEF e SLA sono stati

ricavati da PACHECO *et al.* (2014) e derivano da misurazioni di laboratorio. La combinazione di LAI e SLA ha permesso di computare la densità di biomassa fogliare (*Db*). Per determinare quali operazioni eseguire, considerando i numerosi fattori che influenzano le decisioni, sono state create alcune mappe maschera vettoriali dipendenti dai tipi forestali e sulle quali eseguire il flusso completo di algoritmi. Le mappe vettoriali realizzate sono:

- *Algoritmo*: definisce se la specie principale segue l'algoritmo T+L o quello T.
- *Habitus*: identifica quando la specie principale è una conifera sempreverde, una latifolia sempreverde (*Quercus ilex*) o una specie decidua.
- *Classe*: per facilitare l'ulteriore elaborazione, assegna un valore numerico a ciascun tipo forestale, raggruppando le aree con la stessa specie principale e secondaria (se presente).

Tabella 1 – Sistema Informativo Territoriale del modello.

Geodato	Formato	Fonte ed eventuali note
Confine dell'area di studio	Vettoriale	Fonte: Sistema Informativo Ambiente e Territorio (SIAT), Provincia Autonoma di Trento. URL: https://siat.provincia.tn.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/home
Irradianza globale	Raster	Fonte: Climate Monitoring Satellite Application Facility. URL: https://www.cmsaf.eu/EN/Home/home_node.html . Rappresenta la media mensile 2007-2016. U.M.: W/m^2 . Il dataset fornisce mappe di irradianza globale media, che rappresentano la quantità di radiazione solare che raggiunge una superficie orizzontale. Questi valori sono stati utilizzati per determinare l'intensità della luce solare e il suo effetto sull'algoritmo L+T.
Tipologia forestale	Vettoriale	Fonte: Sistema Informativo Ambiente e Territorio (SIAT), Provincia Autonoma di Trento. URL: https://siat.provincia.tn.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/home . Rappresenta le specie forestali e la loro distribuzione all'interno della provincia di Trento; aggiornata al 2024.
Indice di area fogliare (LAI)	Raster	Fonte: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) - MOD15A2H Versione 6.1. URL: https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod15a2h-061 . Mappa dal passo temporale composito di 8 giorni. Il set di dati rappresenta l'area fogliare totale per unità di suolo. U.M.: m^2/m^2 .
Temperatura superficiale terrestre	Raster	Fonte: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) - MOD15A2H Versione 6.1. URL: https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod15a2h-061 . Mappa dal passo temporale composito di 8 giorni per il periodo 2010-2021. Questo set di dati fornisce i valori della temperatura superficiale, che nel modello sono stati utilizzati per calcolare i valori della temperatura fogliare. La mappa della temperatura giornaliera è stata ottenuta come media delle temperature nell'intervallo 9.00-16.00.

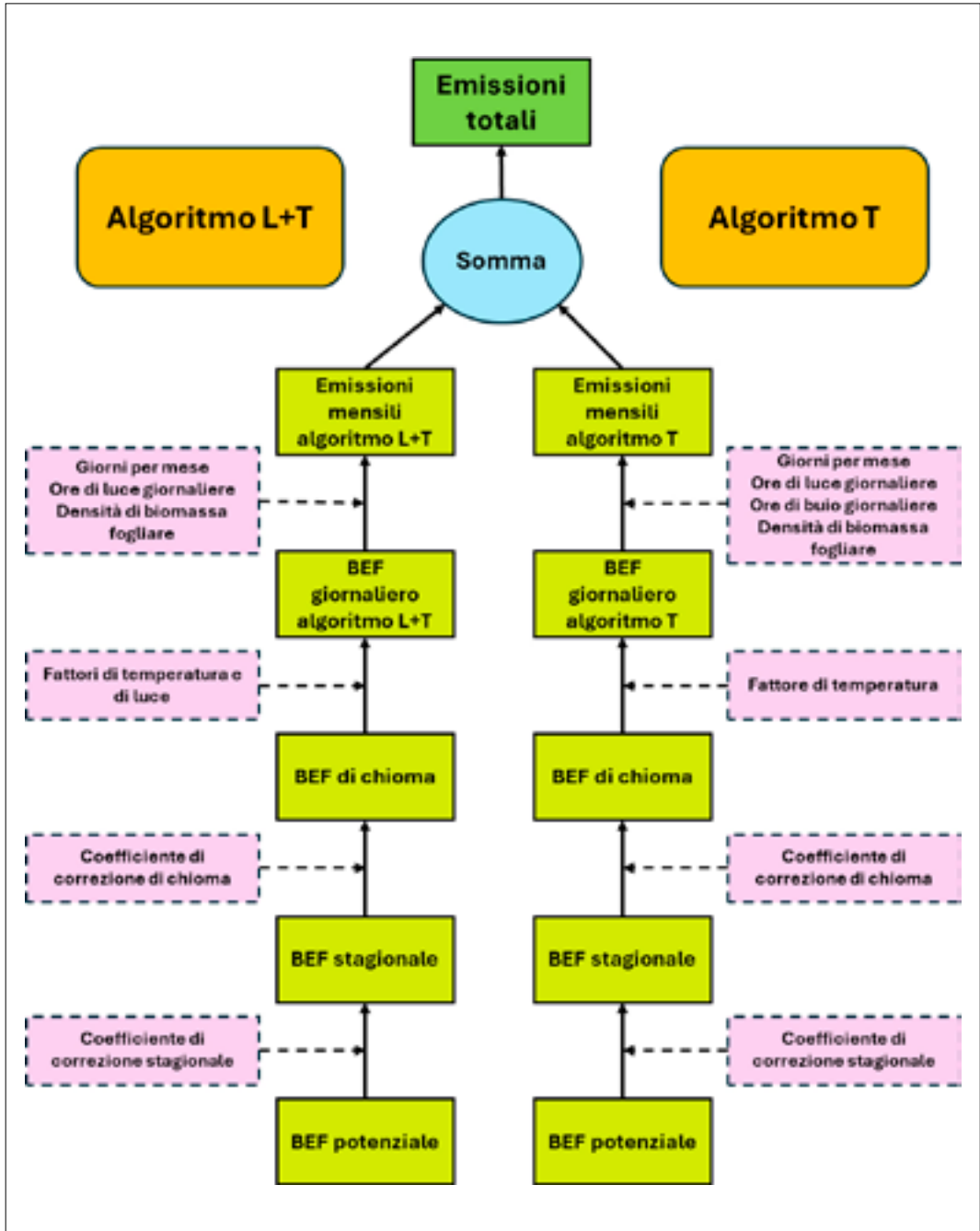


Figura 1 – Flusso di lavoro generale del modello.

ATTI DEL WORKSHOP “BENESSERE IN FORESTA”

Dopo la riclassificazione, queste tre mappe sono state convertite in mappe raster con risoluzione 40x40m.

In sintesi, partendo dalle emissioni potenziali (valori di BEF) sono state apportate delle calibrazioni legate alla stagionalità e alla presenza di foglie/aghi; inoltre, in funzione dell’algoritmo applicato (L+T o T) si è giunti alla quantificazione delle emissioni giornaliere con l’introduzione di coefficienti di luce e/o temperatura. Infine, l’applicazione delle equazioni 2 e 3 e la relativa sommatoria (equazione 1) hanno permesso di determinare la produzione mensile e annua di BVOC.

Il flusso di lavoro completo e le operazioni eseguite sono elencati in figura 1. Per un approfondimento sui dettagli metodologici, si veda MARTINI (2025).

Risultati e discussione

3.1 Emissioni di BVOC

Considerando le emissioni di isoprenoidi, il composto più abbondante è l’isoprene, segui-

to dai monoterpeni legati all’attività fotosintetica, principalmente sabinene, α -pinene e β -pinene (tabella 2).

I risultati confermano come le emissioni di BVOC dipendano fortemente dalle variazioni stagionali, aumentando durante il periodo primaverile ed estivo. Il picco di emissioni si verifica durante l’estate, con la maggior produttività in luglio e agosto, mesi che contribuiscono per quasi il 60% alle emissioni annuali totali (rispettivamente con il 30% e il 29%). Inoltre, l’inizio dell’estate e l’inizio dell’autunno contribuiscono moderatamente, con giugno (16%) e settembre (14%), che insieme ai mesi estivi rappresentano oltre l’80% delle emissioni annuali totali. I restanti mesi insieme contribuiscono per circa l’11%.

Tale variabilità stagionale è ben nota e già documentata in studi precedenti (CICCIOLI *et al.*, 2003; PACHECO *et al.*, 2014). Secondo questi studi, le emissioni di isoprenoidi iniziano con lo sviluppo delle nuove foglie e aumentano fino a raggiungere il picco nel periodo estivo. Poiché la produzione di BVOC è legata alla fotosintesi, con l’inizio della caduta delle foglie – generalmente da settembre/ottobre –

Tabella 2 – Totale emissione per BVOC e mese dell’anno (U.M.: kg)

Mese	Limonene	1,8-Cineol	a-Pinene	b-Pinene	Camphene	Linalool	Myrcene	Sabinene	tr-b-Ocimene	Isoprene
Gen	11050	66	37763	12903	5347	2706	11032	24697	5696	9089
Feb	9420	69	24622	10591	4959	2847	10717	25235	5830	7178
Mar	18210	138	61196	23993	9379	5243	20153	45642	14805	1,56E+05
Apr	23697	240	68018	29978	11804	6506	24352	57589	20086	136187
Mag	67580	997	172915	77819	31897	20408	63883	183575	73185	4,06E+05
Giu	147616	5040	5,66E+05	226237	68353	34074	123711	411480	166470	3,26E+06
Lug	200678	10161	9,13E+05	332672	89690	45620	166577	608165	270886	6,77E+06
Ago	165429	6011	8,47E+05	274408	71829	43575	142124	436494	273590	6,64E+06
Set	96462	1956	4,47E+05	147286	43173	26032	86775	239398	131365	2,97E+06
Ott	33520	279	1,29E+05	44527	15566	8535	32671	72237	34077	5,81E+05
Nov	5067	43	15410	5481	3168	1718	6320	13947	7005	61036
Dic	22038	187	49975	22805	11400	7482	25302	66301	14540	8457

accompagnato dalla diminuzione delle ore di luce e delle temperature, anche le emissioni di BVOC si riducono (FARES *et al.*, 2009).

Per questo, è opportuno considerare come le emissioni di BVOC non siano correlate solo alla presenza dell'apparato fogliare. Le conifere sempreverdi, come *Abies alba* e *Pinus sylvestris*, riducono le loro emissioni durante i periodi freddi, a volte interrompendosi completamente.

Rispetto agli output ottenuti da PACHECO *et al.* (2014), i risultati di questo studio indicano livelli di emissione superiori di circa dieci volte. Ciò può essere dovuto alla variabilità dei dati di input e alle limitazioni illustrate nel paragrafo 3.3. Tuttavia, le distribuzioni spaziali si allineano bene con le condizioni ecologiche e ambientali dell'area di studio, e le proporzioni relative delle emissioni sono simili a quelle riportate da PACHECO *et al.* (2014). Inoltre, in letteratura è stata spesso evidenziata una forte variabilità di risultati applicando differenti modelli per la stima dei BVOC. CICCIOI *et al.* (2023), confrontando i risultati del *Plant Specific Emission Model* (PSEM) e del *Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature* (MEGAN v.2) per un caso di studio (Campania, Italia), evidenziano differenze significative sia nell'entità che nella distribuzione spaziale dei risultati, con il modello MEGAN che sembra stimare emissioni di isoprene di un ordine di grandezza superiore alla valutazione prodotta dal PSEM e quest'ultimo che quantifica emissioni di monoterpeni e sesquiterpeni più elevate rispetto al MEGAN (CICCIOI *et al.*, 2023).

Analogamente a PACHECO *et al.* (2014), i risultati della presente applicazione confermano che le specie maggiormente responsabile delle emissioni sono quelle ripariali (*Alnus* spp in primis e *Populus nigra*), che ne rappresentano il 51%, principalmente grazie all'isoprene. Seguono *Larix decidua* con un contributo del 13% e *Pinus sylvestris* con un contributo del 12%. Il querceto misto emette il 9% dei BVOC valore che, rispetto ai risultati di PACHECO *et al.* (2014), appare piuttosto

basso. Altri contributi significativi includono *Picea abies* (4%), *Pinus cembra* (3%) e *Fraxinus excelsior* (3%).

Analisi dei singoli composti emessi

Di seguito viene esaminata la distribuzione dei diversi BVOC. Per ciascun composto è stata condotta una breve analisi considerando le principali specie responsabili della sua produzione. I composti sono ordinati in modo decrescente, dal più prodotto al meno prodotto.

Isoprene

Tra tutti i composti, l'isoprene è quello maggiormente emesso. Tuttavia, non molte specie sono responsabili della sua emissione e meno della metà del territorio forestale è coperto da vegetazione produttrice di isoprene. Ciononostante, quando si verificano emissioni, queste sono eccezionalmente elevate. L'isoprene rappresenta il 68% delle emissioni totali di BVOC nella provincia di Trento.

Sebbene diverse querce siano responsabili delle sue emissioni, solo alcune di esse sono presenti in modo costante nella provincia di Trento. Si tratta di *Quercus petraea* e *Quercus robur*.

Populus nigra e *Alnus* ssp. sono i principali emettitori di isoprene. *Abies alba* e *Picea abies* ne emettono invece una quantità molto limitata.

α -pinene

L' α -pinene è il secondo composto più prodotto nella provincia, rappresentando l'11% delle emissioni totali. Molti tipi di foresta contribuiscono alla sua produzione e le sue emissioni sono diffuse in tutta la regione. Le due specie principalmente responsabili della produzione di α -pinene sono *Quercus ilex* e *Populus nigra*.

Anche *Larix decidua*, *Pinus sylvestris* e *Picea abies* contribuiscono in modo significativo, sebbene presentino fattori di BEF inferiori per questo composto.

ATTI DEL WORKSHOP “BENESSERE IN FORESTA”

Sabinene

Il sabinene è un altro composto con emissioni diffuse in tutta la provincia. Quasi tutta l'area è caratterizzata da emissioni di sabinene. Diverse specie sono responsabili delle sue emissioni, ma le più rappresentative sono *Larix decidua*, *Pinus sylvestris* e *Fagus sylvatica*. Le emissioni di sabinene rappresentano il 7% delle emissioni totali nell'area.

β -pinene

In provincia di Trento, il β -pinene rappresenta il 4% delle emissioni totali. Sebbene quasi tutte le specie della provincia lo emetta-

no, viene rilasciato in piccole quantità. Le specie che lo emettono maggiormente sono *Pinus cembra* e *Pinus sylvestris*. Anche molte altre conifere contribuiscono alle sue emissioni.

tr- β -ocimene

È uno dei BVOC con la minore distribuzione nel territorio. Ciononostante, è il quinto composto più prodotto, rappresentando il 3% delle emissioni totali. Tra le specie selezionate per lo studio, solo *Carpinus betulus*, *Castanea sativa* e *Fraxinus excelsior* emettono il composto. Tra questi, il principale emettitore di *tr*- β -ocimene è *Carpinus betulus*.

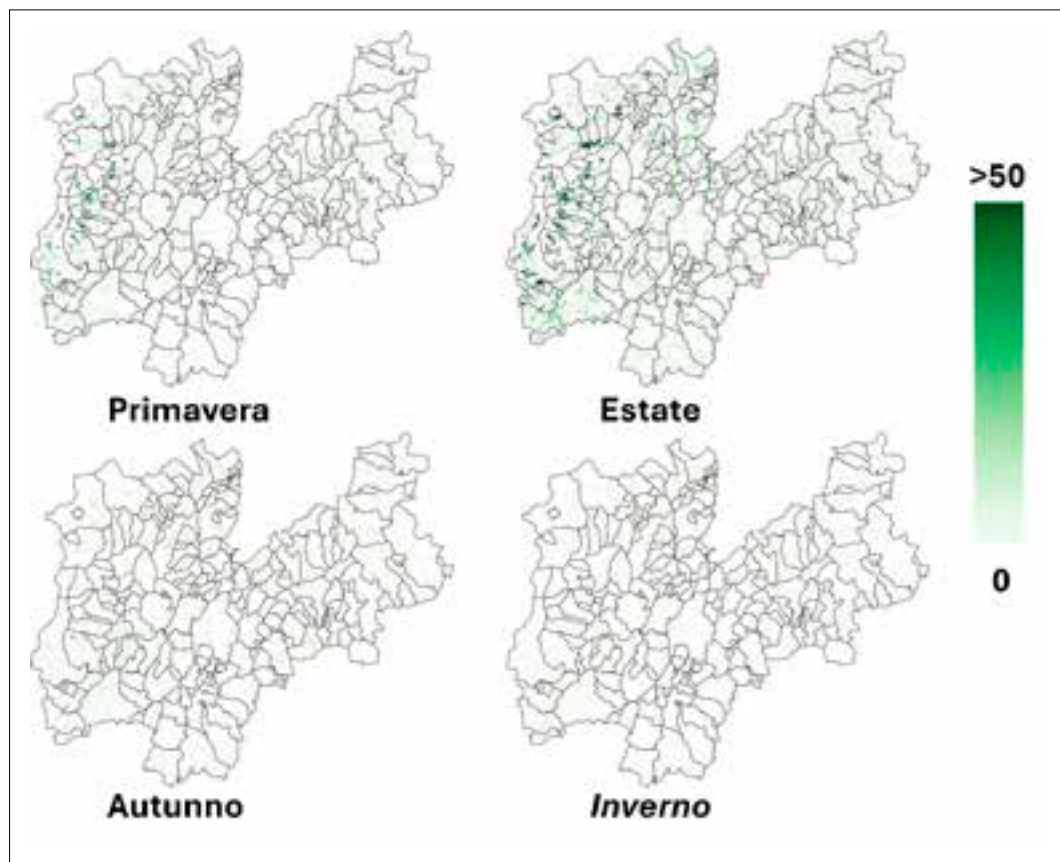


Figura 3 – Localizzazione delle emissioni di BVOC per stagione (U.M.: kg/pixel; risoluzione mappe 40x40m).

Limone

Il limonene rappresenta il 3% delle emissioni totali. Quasi tutte le specie arboree lo emettono, ma le emissioni sono basse. Le uniche specie che non emettono limonene sono *Carpinus betulus*, *Fraxinus excelsior* e le querce caducifoglie.

Mircene

Il mircene segue un andamento simile al limonene. Sebbene molte specie lo emettano, le emissioni sono generalmente basse per tutti i tipi di foresta. L'emissione totale di mircene rappresenta il 2% del totale. Tra le specie che lo emettono, la più produttiva è *Pinus sylvestris*.

Canfene

Il canfene rappresenta solo l'1% delle emissioni totali, nonostante sia prodotto in un'ampia parte della provincia. Le principali specie che emettono canfene sono *Quercus ilex* e *Abies alba*.

Linalolo

Il linalolo rappresenta solo l'1% delle emissioni totali. La sua distribuzione è limitata e solo poche specie sono responsabili delle sue emissioni. Tra queste, *Carpinus betulus* è l'emettitore più significativo.

1,8-cineolo

L'1,8-cineolo è il composto meno emesso, contribuendo a meno dell'1% delle produzioni totali. Viene prodotto solo da poche specie (*Castanea sativa* e *Fagus sylvatica*) e in piccole quantità.

Emissioni totali

Secondo i risultati, le aree con le emissioni più elevate sono dominate da alcune specie ripariali e querce miste. Le tipologie forestali con la più alta diversità di BVOC sono quelle a dominanza di *Larix decidua* e *Pinus sylvestris*, seguite da *Picea abies* e *Pinus cembra*. Considerando la presenza di tutte le specie che emettono BVOC nella provincia di Trento e le differenziazioni stagionali, sono state cre-

ate quattro mappe per identificare le aree più idonee per la presenza di tali composti volatili (figura 3).

Potenzialità di applicazione e limiti del modello

La mappatura delle emissioni di BVOC in provincia di Trento pone le basi per una verifica delle aree e dei periodi nel corso dell'anno che potenzialmente possono essere idonei all'effettuazione di attività di FB/FT. Ovviamente la completa applicabilità dei risultati dell'analisi spaziale deve necessariamente tenere in considerazione tutta una serie di variabili di altra natura. Aspetti logistici, infrastrutturali, normativi, geomorfologici, di rischio e legati alla presenza di ulteriori elementi naturali/artificiali dal possibile impatto positivo o negativo sull'impiego di aree forestali per il miglioramento del benessere individuale dovrebbero essere inclusi nella valutazione. Inoltre, la ricerca medica e specialistica dovrebbe indagare con maggior dettaglio la relazione esposizione-effetto connessa alle diverse tipologie di BVOC; questo al fine di garantire sessioni di FB/FT mirate per gruppi di utenti o pazienti con particolari esigenze e/o per target di benefici psico-fisici.

Le principali limitazioni del modello sono legate al calcolo dei BEF. Alcuni valori di BEF specie-specifici non sono disponibili in letteratura e, quando lo sono, possono variare a causa di diversi fattori, rendendone difficile il calcolo accurato. Per questo motivo, le specie sono state classificate in diverse categorie in base ai dati disponibili.

Le emissioni di monoterpeni dipendono sia dalla temperatura che dai meccanismi luminosi, rendendole soggette a molteplici fattori di influenza. Per questo motivo, l'emissione può variare significativamente al variare della latitudine, del clima, delle caratteristiche del suolo e di altre condizioni ambientali. Ulteriori fattori dovrebbero essere considerati per ottenere risultati più accurati. Ad esempio, ove possibile, la raccolta di dati sul campo potrebbe aumentare l'accuratezza dei risultati. Gli strumenti lidar

ATTI DEL WORKSHOP “BENESSERE IN FORESTA”

potrebbero migliorare significativamente la misurazione di questi valori in modo diretto e con maggiore precisione. Inoltre è importante notare che alcune mappe utilizzate in questo studio, come quelle legate a parametri climatici, potrebbero essere influenzate dalla magnitudo e dalla rapidità degli effetti legati al *climate change*. Infine, alcune variabili come il *Leaf Area Index* sono spesso registrate ad intervalli di tempo non regolari. La possibilità di accesso a dati geografici più completi e verificati in campo potrebbe migliorare l'accuratezza del modello finale e la qualità del risultato.

Conclusioni

Questo studio mira a quantificare le emissioni di BVOC per specie arborea nella provincia di Trento e ad analizzarne la distribuzione spaziale. La quantificazione delle emissioni di BVOC è fondamentale per definire la gestione forestale, in particolare quella orientata alla terapia forestale. La quantificazione delle emissioni di BVOC può essere complessa a causa della variabilità degli ecosistemi e della necessità di considerare diverse specie e parametri. La modellizzazione delle emissioni totali delle aree forestali presenta ancora margini di incertezza, poiché influenzata da fattori come latitudine, clima e tipo di suolo. Sia le specie decidue che quelle sempreverdi emettono BVOC tuttavia, in generale, i BVOC sono emessi principalmente dalle specie decidue. Le loro emissioni sono strettamente legate all'attività fotosintetica, pertanto la produzione di BVOC nella provincia di Trento è maggiore in estate e all'inizio dell'autunno, e diminuisce in inverno e all'inizio della primavera. Inoltre, solitamente, le specie che emettono isoprene non emettono mono- o sesquiterpeni. Un'eccezione è l'abete rosso (*Picea abies*), che emette isoprene insieme a β -pinene, α -pinene e limonene. Le specie responsabili delle emissioni a più ampia scala sono il larice (*Larix decidua*) e il pino silvestre (*Pinus sylvestris*), seguiti dall'abete rosso (*Picea abies*) e dal pino cembro (*Pinus cembra*).

Tra i BVOC studiati, i più abbondanti nell'area sono isoprene, α -pinene e sabine. L'isoprene rappresenta circa il 50% delle emissioni totali. In provincia di Trento molte specie contribuiscono alle emissioni, evidenziando l'importanza di mantenere ecosistemi forestali diversificati altresì per ottenere un profilo di emissioni più eterogeneo. Anche le specie a bassa emissione di BVOC possono creare differenze ecologiche e rispondere a diversi input ambientali: pertanto, in un contesto di terapia forestale, le foreste con una più alta diversità di specie sono preferibili visto che una maggior variabilità di BVOC può aumentare i benefici terapeutici.

Gli sforzi futuri nella mappatura e nella manutenzione dei percorsi di terapia forestale dovrebbero quindi tenere in considerazione questi aspetti.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto PRIN 2022EW9WAM “The role of forests for wellbeing improvement: advances from psychophysiological analysis and technologies” (FOR.WELL) (www.for-well.it), CUP B53D23017560006, finanziato dall'Unione Europea con fondi NextGenerationEU M4 C2.1.1.

BIBLIOGRAFIA

BRAVO-OVIEDO A., PRETZSCH H., AMMER C., ANDENMATTEN E., BARBATI A., BARREIRO S., BRANG P., BRAVO F., COLL L., CORONA P., DEN OUDEN J., DUCEY M. J., FORRESTER D. I., GIERGICZNY M., JACOBSEN J. B., LESINSKI J., LÖF M., MASON W. L., MATOVIC B., METSLAND M., MORNEAU F., MOTIEJUNAITE J., O'REILLY C., PACH M., PONETTE Q., DEL RIO M., SHORT I., SKOVSGAARD J. P., SOLIÑO M., SPATHELF P., STERBA H., STOJANOVIC D., STRELCOVA K., SVOBODA M., VERHEYEN K., VON LÜPKE N., e ZLATANOV, T., 2014 – *European Mixed Forests: definition and research perspectives*. Forest Systems, 23(3): 518-533.

- BOURTSOUKIDIS E., BEHRENDT T., YAÑEZ-SERRANO A.M., HELLÉN H., DIAMANTOPOULOS E., CATÃO E., ASHWORTH K., POZZER A., QUESADA C.A., MARTINS D.L., ARAUJO M.S.A., BRITO J., ARTAXO P., KESSELMEIER J., LELIEVELD J., e WILLIAMS J., 2018 – *Strong Sesquiterpene Emissions from Amazonian Soils*. *Nature Communication*, 9: 2226.
- CHIABAI A., TRAVISI C.M., MARKANDYA, A., DING H., e NUNES P. A. L. D., 2011 – *Economic Assessment of Forest Ecosystem Services Losses: Cost of Policy Inaction*. *Environmental and Resource Economics*, 50: 405-445.
- CHO K.S., LIM Y.R., LEE K., LEE J., LEE J.H., e LEE I.S., 2017 – *Terpenes from Forests and Human Health*. *Toxicology Research*, 33: 97-106.
- CICCIOLI P., BRANCALONI E., FRATTONI M., MARTA S., BRACHETTI A., VITULLO M., TIRONE G., e VALENTIN R., 2003 – *Relaxed eddy accumulation, a new technique for measuring emission and deposition fluxes of volatile organic compounds by capillary gas chromatography and mass spectrometry*. *Journal of Chromatography A*, 985(1-2): 283-296.
- CICCIOLI P., FINARDI S., PEPE N., CICCIOLI P., RAPPARINI F., NERI L., FARES S., BRILLI F., MIRCEA M., MAGLIULO E., e BARALDI R., 2023 – *The potential impact of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) from terrestrial vegetation on a Mediterranean area using two different emission models*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 328: 109255.
- DE ALVARENGA J. F. R., GENARO B., COSTA B. L., PURGATO E., MANACH C., e FIAMONCINI J., 2021 – *Monoterpenes: current knowledge on food source, metabolism, and health effects*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(10): 1352-1389.
- DODEV Y., ZHIYANSKI M., GLUSHKOVA M., SHIN W. S., 2020 – *Forest welfare services – the missing link between forest policy and management in the EU*. *Forest Policy and Economics*, 118: 102249.
- DONELLI D., MENEGUZZO F., ANTONELLI M., ARDISSINO D., NICCOLI G., GRONCHI G., BARALDI R., NERI L., e ZABINI F., 2023 – *Effects of Plant-Emitted Monoterpenes on Anxiety Symptoms: A Propensity-Matched Observational Cohort Study*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20: 2773.
- DUAN X., CHANG M., WU G., SITU S., ZHU S., ZHANG Q., HUANGFU Y., WANG W., CHEN W., YUAN B., e WANG X., 2024 – *Estimation of biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions in forest ecosystems using drone-based lidar, photogrammetry, and image recognition technologies*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17: 4065-4079.
- FARES S., MEREU S., SCARASCIA MUGNOZZA G., VITALE M., MANES F., FRATTONI M., CICCIOLI P., GEROSA G., e LORETO F., 2009 – *The ACCENT-VOCBAS field campaign on biosphere-atmosphere interactions in a Mediterranean ecosystem of Castelporziano (Rome): site characteristics, climatic and meteorological conditions, and eco-physiology of vegetation*. *Biogeosciences*, 6: 1043-1058.
- GUENTHER A.B., ZIMMERMAN P.R., HARLEY P.C., MONSON R.K. e FALL R., 1993 – *Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D7): 12609-12617.
- GUENTHER A., HEWITT C.N., ERICKSON D., FALL R., GERON C., GRAEDEL T., HARLEY P., KLINGER L., LERDAU M., MCKAY W.A. e PIERCE T., 1995 – *A global model of natural volatile organic compound emissions*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D5): 8873-8892.
- HARTLEY A., MACBEAN N., GEORGIEVSKI G., e BONTEMPS S., 2017 – *Uncertainty in plant functional type distributions and its impact on land surface models*. *Remote Sensing of Environment*, 203: 71-89.
- HE Y., QIN L., LI Z., LIANG X., SHAO M., e TAN L., 2013 – *Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China*. *Forest Ecology and Management*, 295: 193-198.
- IKEI H., SONG C., MIYAZAKI Y., 2017 – *Physiological effects of touching coated wood*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14: 773.
- LI Q., KOBAYASHI M., KUMEDA S., OCHIAI T., MIURA T., KAGAWA T., IMAI M., WANG Z., OTSUKA T., e KAWADA T., 2016 – *Effects of Forest Bathing on Cardiovascular and Metabolic Parameters in Middle-Aged Males*. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2016: 1-7.
- LI Q., 2019 – *Effect of forest bathing (shinrin-yoku) on human health: A review of the literature*. *Sante Publique (Paris)*, 31: 135-143.
- LI X., RAMOS AGUILA L.C., WU D., LIE Z., XU W., TANG X., LIU J., 2023 – *Carbon sequestration and storage capacity of Chinese fir at different stand ages*. *Science of the Total Environment*, 904: 166962.
- MARTINI G., 2025 – *A GIS-based approach to quantifying biogenic volatile organic compounds (BVOC) emissions in Trento's province for forest therapy*. *Tesi di Laurea Magistrale in Scienze e tecnologie dei sistemi forestali*, Scuola di Agraria, Università degli Studi di Firenze, <https://sol.unifi.it/tesi/consultazione>.
- MEA, 2005 – *Ecosystems and human well-being Synthesis: a report of the Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: Island Press, <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0666/2005010265-d.html>.
- MENEGUZZO F., ALBANESE L., BARTOLINI G., e ZABINI F., 2019 – *Temporal and Spatial Variability of Volatile Organic Compounds in the Forest Atmosphere*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16: 4915.
- MENEGUZZO F., e ZABINI F., (A CURA DI), 2022 – *Terapia Forestale 2*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Cnr Edizioni, ISBN 978 88 8080 499 4 (electronic edition).
- NIINEMETS Ü., e MONSON R.K., 2013 – *Biology, Controls and Models of Tree Volatile Organic Compound Emissions*. Springer Science & Business Media, ISBN 9789400766068.

ATTI DEL WORKSHOP “BENESSERE IN FORESTA”

OCHIAI H., IKEI H., SONG C., KOBAYASHI M., TAKAMATSU A., MIURA T., KAGAWA T., LI Q., KUMEDA S., IMAI M., e MIYAZAKI Y., 2015 – *Physiological and psychological effects of forest therapy on middle-aged males with high-normal blood pressure*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12: 2532-2542.

OFITI N.O.E., ZOZZO C.U., SOONG J.L., SOLLY E.F., TORN M.S., WIESENBERG G.L., e SCHMIDT M.W., 2014 – *Warming promotes loss of subsoil carbon through accelerated degradation of plant-derived organic matter*. Soil Biology and Biochemistry, 156: 108185.

PACHECO C. K., FARES S., e CICCIOLO P., 2014 – *A highly spatially resolved GIS-based model to assess the isoprenoid emissions from key Italian ecosystems*. Atmospheric Environment, 96: 50-60.

SEIDL R., THOM D., KAUTZ M., MARTIN-BENITO D., PELTONIEMI M., VACCHIANO G., WILD J., ASCOLI D., PETR M., HONKANENIEMI J. e LEXER M.J., 2017 – *Forest disturbances under climate change*. Nature climate change, 7(6): 395-402.

SHARIFI-RAD J., SUREDA A., TENORE G.C., DAGLIA M., SHARIFI-RAD M., VALUSSI M., TUNDIS R., SHARIFI-RAD M., LOIZZO M.R., ADEMILUYI A.O., SHARIFI-RAD R., AYATOLLAHI S.A., e IIRITI M., 2017 – *Biological Activities of Essential Oils: From Plant Chemoecology to Traditional Healing Systems*. Molecules, 22: 70.

TONG X., BRANDT M., YUE Y., CIAIS P., RUDBECK JEPSEN M., PENUELAS J., WIGNERON J.P., XIAO X., SONG X.P., HORION S., RASMUSSEN K., SAATCHI S., FAN L., WANG K., ZHANG B., CHEN Z., WANG Y., LI X., e FENSHOLT R., 2020 – *Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration*. Nature Communications, 11: 129.

TSAO T.M., TSAI M.J., HWANG J.S., CHENG W.F., WU C.F., CHOU C.C.K., e SU T.C., 2018 – *Health effects of a forest environment on natural killer cells in humans: An observational pilot study*. Oncotarget, 9: 16501-16511.

TWOHIG-BENNETT C., e JONES A., 2018 – *The health benefits of the great outdoors: A systematic review and meta-analysis of greenspace exposure and health outcomes*. Environmental Research, 166: 628-637.

TYUKAVINA A., BACCINI A., HANSEN M.C., POTAPOV P.V., STEHMAN S.V., HOUGHTON R.A., KRYLOV A.M., TURUBANOVA S., e GOETZ S.J., 2015 – *Aboveground carbon loss in natural and managed tropical forests from 2000 to 2012*. Environmental Research Letters, 10: 074002.

SIMON V., LUCHETTA L., e TORRES L., 2001 – *Estimating the emission of volatile organic compounds (VOC) from the French forest ecosystem*. Atmospheric Environment, 35(1): S115-S126.

WANG H., WU Q., GUENTHER A.B., YANG X., WANG L., XIAO T., LI J., FENG J., XU Q., e CHENG H., 2021 – *A long-term estimation of biogenic volatile organic compound (BVOC) emission in China from 2001-2016: the roles of land cover change and climate variability*. Atmospheric Chemistry and Physics, 21: 4825-4848.

WATSON J.E.M., EVANS T., VENTER O., WILLIAMS B., TULLOCH A., STEWART C., THOMPSON I., RAY J.C., MURRAY K., SALAZAR A., McALPINE C., POTAPOV P., WALSTON J., ROBINSON J.G., PAINTER M., WILKIE D., FILARDI C., LAURANCE W.F., HOUGHTON R.A., MAXWELL S., GRANTHAM H., SAMPER C., WANG S., LAESTADIUS L., RUNTING R.K., SILVA-CHÁVEZ G.A., ERVIN J., e LINDENMAYER D., 2018 – *The exceptional value of intact forest ecosystems*. Nature Ecology and Evolution, 2(4): 599-610.

ZEMANKOVA K., e JOSEF BRECHLER, 2010 – *Emissions of biogenic VOC from forest ecosystems in central Europe: Estimation and comparison with anthropogenic emission inventory*. Environmental Pollution, 158(2) : 462-469.

ZHOU F., e PICHERSKY E., 2020 – *More is better: the diversity of terpene metabolism in plants*. Current Opinion in Plant Biology, 55: 1-10.

Guido Martini

Sandro Sacchelli

E-mail: sandro.sacchelli@unifi.it

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie,
Alimentari, Ambientali e Forestali
Università degli Studi di Firenze
Piazzale delle Cascine, 18 – 50144 Firenze

PAROLE CHIAVE: servizi forestali culturali, idoneità spaziale, benessere psico-fisico

RIASSUNTO

Tra i servizi ecosistemici forestali culturali, la foresta terapia sta acquisendo sempre più importanza anche a seguito delle numerose ricerche che hanno caratterizzato e quantificato i benefici psico-fisici derivanti dalla frequentazione di popolamenti boscati. In quest'ottica i composti organici volatili biogenici (o *Biogenic Volatile Organic Compounds* – BVOC) emessi dalle piante per diverse funzioni ecologiche, forniscono numerosi benefici anche per la salute umana. La quantificazione e la localizzazione dei BVOC possono quindi risultare di interesse per valutazioni propedeutiche all'analisi di idoneità di aree forestali per attività di *forest bathing* e *forest therapy*. La modellizzazione delle emissioni dei BVOC risulta però complessa data la numerosità di variabili che interagiscono tra di loro. Con queste premesse, il presente lavoro ha avuto l'obiettivo di implementare un modello GIS (Geographic Information System) calibrato sulla provincia di Trento per la quantificazione, con dettaglio mensile, dei BVOC. I risultati evidenziano, dal punto di vista spaziale e temporale, l'importanza delle diverse specie forestali sul territorio trentino in termini di produzione di BVOC permettendo di porre le basi per una pianificazione mirata alla diversificazione dell'offerta di servizi forestali e alla valorizzazione di aree montane interne e marginali.

KEY WORDS: cultural forest services, spatial suitability, psycho-physical well-being

ABSTRACT

Among the cultural forest ecosystem services, forest therapy is becoming increasingly important, also as a result of the numerous researches that have characterized and quantified the psycho-physical benefits deriving from the frequentation of forest areas. In this perspective, Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by plants for different ecological functions, provide numerous benefits also for human health. The quantification and localization of BVOC can therefore be of interest for preliminary assessments for the analysis of the suitability of forest areas for forest bathing and forest therapy activities. However, the modelling of BVOC emissions is complex given the number of variables that interact each other. With these premises, the present work aimed to implement a GIS (Geographic Information System) model calibrated on the province of Trento for the quantification, with monthly detail, of BVOC. The results highlight, from spatial and temporal point of view, the importance of the different forest species in the Trentino area in terms of BVOC production, allowing to lay the foundations for a planning focused at diversifying the offer of forestry services and at valorising internal and marginal mountain areas.