

Abbattimento del particolato aerodisperso (PM_{10} e $PM_{2.5}$) in tre aree protette e due ville storiche della città di Roma nei mesi di *lockdown* (marzo-aprile 2020)

Stefano Petrella

Removal of airborne particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) in three protected areas and two historic parks in the city of Rome during the lockdown period (March-April 2020)

Airborne particulate matter (PM) has been widely demonstrated to play a role in the increase in mortality linked to cardio-respiratory diseases, in the reduction of immune system defense mechanisms, and in the transmission of pathogens. Equally accepted is the role that trees play in fine particulate matter absorption in urban areas. This study examined the capacity of particulate reduction in three protected areas in Rome within the park and nature reserve system managed by the regional organization “RomaNatura” (Riserva Naturale della Marcigliana, Riserva Naturale della Valle dell’Aniene and Parco Regionale Urbano di Aguzzano) and two historic Roman parks (Villa Ada and Villa Borghese). The study was held in March and April 2020 during the COVID 19 lockdown period. Due to the impossibility of physically gathering data and recording measurements in the field in order to define the biophysical characteristics of the areas under study, remote sensing techniques were utilized. Although such techniques may be influenced by a degree of uncertainty in the absence of calibration procedures based on in-field inspection and verification, they still constitute a preliminary phase for further investigation, especially for studying difficult-to-access areas or for project research with limited resources. The average quantities of fine and ultrafine particulate matter captured during the two-month period were $4,330.22 \pm 1,429.54$ Kg di PM_{10} and 373.33 ± 124.01 Kg di $PM_{2.5}$. This data is not directly comparable to the results of similar studies conducted in much larger areas over longer periods of time. It nevertheless shows that remote sensing techniques based on free access databases and open source software can be employed by a community of motivated citizens with basic technical and scientific knowledge; it can also be a powerful means of awareness-building and involvement in the conservation of urban forests.

Keywords: Urban Forests, Particulate Matter, PM_{10} , $PM_{2.5}$, Remote Sensing, Reflectance

Introduzione

La correlazione tra la concentrazione atmosferica delle polveri sottili e la diffusione del coronavirus SARS-CoV-2 responsabile della malattia respiratoria COVID-19, è tuttora dibattuta. Nel *position paper* della Società Italiana di

Medicina Ambientale (Setti et al. 2020) si sostiene il ruolo di *carrier* del particolato per il trasporto di molti contaminanti chimici e biologici, inclusi i virus e si ipotizza che la elevata concentrazione atmosferica delle polveri sottili in particolari aree geografiche possa aver avuto un ruolo importante come impulso alla diffusione dell’epidemia COVID-19. Tuttavia altri studi (Re & Facchini 2020) ritengono che tale ipotesi debba essere ancora scientificamente dimostrata. È invece noto il ruolo del particolato atmosferico nell’aumento significativo della mortalità legata a patologie cardio-respiratorie (Liu et al. 2019, Forastiere et al. 2020, Mo et al. 2018), nella riduzione delle difese immunitarie (Feng et al. 2016) e nella trasmissione di patogeni (Qin et al. 2020, Cao et al. 2014). Altrettanto nota è la funzione che gli alberi possono svolgere nella rimozione delle polveri sottili (Qin et al. 2019, Fares et al. 2020), in particolare nell’ambiente urbano.

Il presente studio è stato condotto nei mesi di marzo e aprile 2020 durante il periodo di *lockdown* imposto dall’emergenza COVID-19, per calcolare la capacità dei boschi urbani di catturare il particolato atmosferico PM_{10} e $PM_{2.5}$. Tuttavia l’impossibilità di svolgere rilevazioni e misurazio-

□ Associazione Casale Podere Rosa, v. Diego Fabbri, I-00137 Roma (Italy)

@ Stefano Petrella (s.petrella56@gmail.com)

Ricevuto: 07 Lug 2020 - Accettato: 04 Ago 2020

Citazione: Petrella S (2020). Abbattimento del particolato aerodisperso (PM_{10} e $PM_{2.5}$) in tre aree protette e due ville storiche della città di Roma nei mesi di *lockdown* (marzo-aprile 2020). *Forest@* 17: 78-87. - doi: [10.3832/efor3577-017](https://doi.org/10.3832/efor3577-017) [online 2020-08-27]

Editor: Silvano Fares

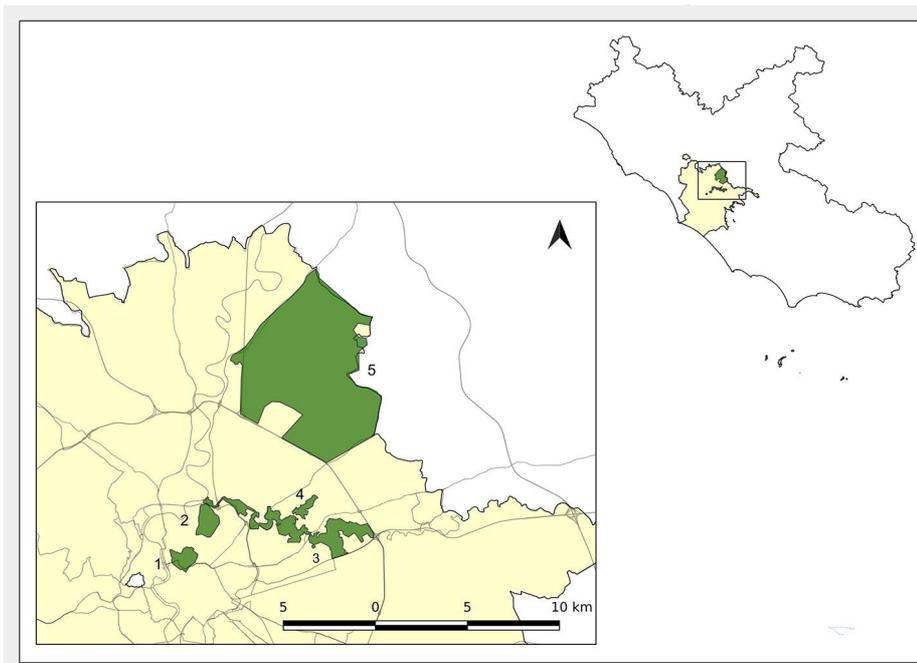


Fig. 1 - Area di studio (1. Villa Borghese; 2. Villa Ada; 3. R.N. Valle dell'Aniene; 4. P.R.U. Aguzzano; 5. R.N. Marcigliana).

ni dirette sul campo dovuta alla condizione di *lockdown* ha richiesto la definizione di un metodo alternativo alle normali procedure di studio dei parametri biofisici forestali. Il metodo adottato si basa interamente su tecniche di *remote sensing* e sull'uso di immagini ottiche multispettrali in alta risoluzione per individuare e mappare la superficie dei boschi urbani e la loro tipologia prevalente (conifere e latifoglie) e per stimare l'indice di superficie fogliare, indipendentemente dalle misurazioni dirette sul campo. Tale approccio può rivelarsi risolutivo in presenza di particolari condizioni ambientali che rendono difficile o impossibile l'accesso alle aree di studio, ovvero fornire informazioni preliminari per progetti di ricerca più approfonditi.

L'esame ha riguardato tre aree protette romane inserite nel sistema dei parchi e delle riserve naturali gestite dall'ente regionale RomaNatura, Riserva Naturale della Marcigliana, Riserva Naturale della Valle dell'Aniene e Parco Regionale Urbano di Aguzzano, e due ville storiche romane, Villa Ada e Villa Borghese (Fig. 1).

Villa Ada

La villa si estende per circa 155 ha nel settore nord della città, tra la via Olimpica, via Salaria, via Panama e via della Moschea. Circa 133 ha (l'86% della superficie) è coperto da aree boscate, la restante parte ospita edifici, vaste aree a prato e un laghetto artificiale. La vegetazione, rappresentata da strutture arboree e arbustive ricche di specie, è distribuita in estese fasce di essenze omogenee o in associazioni di specie, interrotte da aree di prato, radure e zone arbustive. Caratteristiche sono le formazioni dominate dal leccio (*Quercus ilex* L.), le formazioni arboree di alloro (*Laurus nobilis* L.) e le formazioni di quercia da sughero (*Quercus suber* L.). Caratteristica è anche la presenza di specie alloctone relativamente rare come *Metasequoia glyptostroboides* Hu & Cheng. Gli impianti di conifere dominati da *Pinus pinea* L. con esemplari sparsi di *Pinus pinaster* Aiton si estendono principalmente nel settore settentrionale (Monte Antenne), in quello sud occidentale (Villa Polisenna) e in parte del settore centrale (Colle delle Cavalle Madri). Le fitocenosi seminaturali, in buono stato di conservazione e con discreta capacità rigenerativa, consistono in una macchia molto fitta con uno strato arboreo alto da 10 a 15 m (copertura superiore all'85%) ed in un sottobosco pluristratificato nel quale si aprono mo-

deste radure (settori centrali, occidentali e meridionali). Dal punto di vista floristico le aree boscate sono caratterizzate dalla prevalenza del leccio e dell'alloro, accompagnati nel sottobosco da *Hedera helix* L., *Clematis vitalba* L., *Rhamnus alaternus* L., *Crataegus monogyna* Jacq. e *Viburnum tinus* L. Nei settori maggiormente umidi è presente *Sambucus nigra* L. e *Pteridium aquilinum* L. (Kuhn). Tra le latifoglie caducifoglie è da segnalare *Ulmus minor* Mill., *Fraxinus ornus* L. e *Tilia cordata* Mill. (Di Giovine 1996).

Riserva Naturale della Valle dell'Aniene

La riserva ha una superficie di circa 646 ha con sviluppo lineare in direzione E-W, dal Grande Raccordo Anulare alla confluenza del fiume Aniene nel Tevere. Poco più della metà dell'area protetta è coperta da formazioni arboree e arbustive con rilevante presenza di specie alloctone invasive, mentre la parte restante è costituita per il 5% da acque correnti (fiume Aniene e fosso della Cervelletta), terreni agricoli, verde urbano attrezzato, insediamenti abitativi, edifici militari (caserma Gandin), industriali (depuratore Roma est) e storici (casale e torre della Cervelletta). La riserva si sviluppa quasi esclusivamente sui fondovalle alluvionali e questo fa sì che le tipologie vegetazionali più strettamente legate al fiume e alla superficialità della falda si esprimano qui in maniera marcata. La vegetazione arborea igrofila costituita da pioppi e salici, con rara presenza locale di farnia, occupa il 6.5% del territorio e si sviluppa linearmente, compresa dalle superfici coltivate soprattutto lungo le sponde dell'Aniene e del fosso della Cervelletta. Altrove, lungo le sponde e sugli argini fluviali sono presenti comunità arbustive e alto-erbacee caratterizzate da cannuccia di palude, tifa e numerose specie erbacee. Nelle parti più alte e più aride degli argini prevale la canna *Arundo pliniana* Turra, il sambuco nero, l'ebbio e il rovo. Grande assente nella riserva è il querceto: vi sarebbe buona possibilità per il bosco di farnia ma l'intenso uso del territorio ne ha quasi completamente eliminato le tracce. Negli ambiti di pertinenza del querceto a farnia si sviluppa invece la vegetazione arborea di sostituzione a robinia e olmo (circa il 5% della superficie). Al di fuori dei fondovalle alluvionali troviamo la vegetazione erbacea delle praterie soggette a sfalcio e/o pascolo, degli incolti recenti, degli incolti più strutturati e degli ambienti ruderali. La riserva presenta una limitata estensione di formazioni forestali autoctone che si distribuiscono su superfici

esigie con forme allungate e presentano pertanto un elevato grado di vulnerabilità (Cafiero 2003a).

Parco Regionale Urbano di Aguzzano

Il Parco si estende in direzione NE-SW per circa 60 ha nel settore nord est della capitale. È compreso tra le vie consolari SP22/a Nomentana e SS5 Tiburtina e si affaccia sui quartieri di Rebibbia, Casal de' Pazzi, Podere Rosa e San Basilio. Il territorio del parco occupa per gran parte il fondovalle del fosso di San Basilio prima della confluenza nel collettore fognario e in parte minore le ultime propaggini delle diramazioni secondarie del crinale di Aguzzano. L'area non presenta cenosi vegetali di elevata qualità ambientale e risente di un evidente grado di alterazione rispetto all'assetto potenziale. La vegetazione ripariale lungo il fosso di San Basilio con *Salix alba* L. e *Populus alba* L. rappresenta l'elemento maggiormente caratterizzante a cui si associano compatte formazioni con *Rubus ulmifolius* Shott, *Arundo pliniana* Turra, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. e *Arundo donax* L. Le aree di prateria secondaria, oltre il 50% dell'intera superficie, in passato intensamente sfruttate per il pascolo, sono caratterizzate da *Lychnis alba* Mill., *Eruca sativa* Mill., *Galega officinalis* L., *Verbascum sinuatum* L., *Malva sylvestris* (L.) Mill., *Taraxacum officinale* (L.) Weber ex Wigg. e *Daucus carota* L. Sono inoltre presenti alberature di impianto antropico a *Pinus pinea* L. anche di rilevanti dimensioni e *Quercus ilex* L. e, gestiti a ceppaia, *Platanus × acerifolia* L. e *Populus × canadensis* Moench. Diffuse, soprattutto nelle aree più marginali e degradate, le specie alloctone invasive *Robinia pseudoacacia* L. e *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle (Petrella et al. 2018).

Riserva Naturale della Marcigliana

I 4970 ha di superficie della riserva sono destinati prevalentemente ad uso agricolo (circa il 75%), spesso a monoculture estese senza mosaico con appezzamenti di incolti o prati-pascolo. La cerreta, governata per la maggior parte a ceduo matricinato, è la tipologia forestale più diffusa e occupa oltre il 9% del territorio. A causa dell'attività agricola questi boschi si sono mantenuti quasi esclusivamente in corrispondenza dei versanti del sistema collinare. Oltre al cerro vi si ritrovano l'orniello, l'acero oppio, la rovere, il carpino nero. Al piede dei versanti, le cerrete si arricchiscono con la farnia. Una frazione molto limitata del territorio (0.02%) è coperta da boschi di roverella con sporadiche presenze di leccio e albero di Giuda. Il 2.6% del territorio è coperto da boscaglie costituite da vegetazione arborea di sostituzione a olmo e robinia e il 2% da arbusteti di sostituzione caratterizzati dalla ginestra nelle stazioni più soleggiate o da rovi e olmi nei settori più freschi. Lungo i fossi principali della riserva si ritrovano lembi di vegetazione arborea igrofila con salici e pioppi ad estensione prevalentemente lineare, che occupano poco più dell'1% del territorio. Altrove alla vegetazione arborea ripariale si sostituiscono comunità arbustive e alto-erbacee estese per lo 0.7% del territorio (canneti, sambuco, raramente tifa). Il 3.5% è occupato da prati stabili su terreni non alluvionali, mentre meno diffuse (0.5%) sono le praterie stabili di fondovalle. Dal punto di vista floristico la notevole estensione della riserva determina la presenza di una elevata diversità di specie prevalentemente autoctone (Cafiero 2003b).

Villa Borghese

Villa Borghese con i suoi 126 ha è una delle grandi ville storiche della capitale posta al centro della città tra via Pinciana, viale del Muro Torto, Piazzale Flaminio e via Aldrovandi. Caratterizzata per i suoi edifici storici, fontane e monumenti, possiede però anche una ricca vegetazione arborea principalmente di impianto antropico che occupa il 59% della sua superficie ed è dominata tra le conifere dal pino domestico e tra le latifoglie sempreverdi dal leccio a cui si associa l'alloro in forma arborea. Il resto della villa ospita edifici di notevole interesse storico-artistico (Galleria Borghese), culturale (Casa del Cinema), ricreativo (Silvano Toti Globe Theatre), oltre al Bioparco di Roma, al galoppatoio di Piazza di Siena e a vaste aree a prato di fruizione pubblica. Recentemente l'amministrazione comunale ha avviato il monitoraggio delle alberature vetuste, soprattutto pini domestici senescenti, volto a mettere in sicurezza il patrimonio arboreo e ridurre il rischio di crolli. Notevole è anche la presenza di specie alloctone, introdotte per motivi ornamentali. Gli strati arbustivo e erbaceo risultano particolarmente degradati a causa del fortissimo e continuo calpestio che si verifica anche al di fuori dei viali di percorrenza.

Materiali e metodi

Per valutare la capacità di rimozione del particolato aerodisperso nelle cinque aree di studio sono stati condotti tre tipi di analisi: (i) il calcolo della superficie (A) dei boschi urbani; (ii) la stima dell'indice di area fogliare (LAI) relativo ai mesi di marzo e aprile 2020; (iii) il calcolo del flusso del particolato (F) intercettato dagli alberi e della quota riemessa in atmosfera (r_g).

Per le analisi sono state utilizzate immagini multispettrali prodotte dal satellite Sentinel-2A del programma Copernicus dell'Agenzia Spaziale Europea (i prodotti delle missioni Sentinel A e B 1, 2 e 3 sono accessibili dal portale Copernicus Open Access Hub dopo registrazione gratuita). In precedenti studi sui servizi ecosistemici e sulla capacità di rimozione del PM₁₀ condotti nella città di Roma (Manes et al. 2014), sono state utilizzate immagini LANDSAT 5 TM che tuttavia mostrano una risoluzione spaziale di 30 m, meno dettagliata di quella dei prodotti Sentinel-2 (Tab. 1). Diversamente, la risoluzione spettrale dei prodotti Sentinel-2 è in genere più stretta di quella dei sensori LANDSAT, e ciò permette una migliore riduzione delle interferenze atmosferiche. Inoltre la risoluzione radiometrica dei sensori Sentinel è di 12 bit che corrisponde a 4096 livelli di intensità luminosa (livelli di grigio) per ciascuna banda, di-

Tab. 1 - Bande, lunghezze d'onda centrale, larghezza della banda e risoluzione spaziale delle immagini multispettrali acquisite dal satellite Sentinel 2A.

Banda	Lunghezza d'onda centrale (nm)	Larghezza (nm)	Risoluzione spaziale (m)	Descrizione
B1	443	20	60	Ultra blue (Coastal and Aerosol)
B2	490	65	10	Blue
B3	560	35	10	Green
B4	665	30	10	Red
B5	705	15	20	Visible and Near Infrared (VNIR)
B6	740	15	20	Visible and Near Infrared (VNIR)
B7	783	20	20	Visible and Near Infrared (VNIR)
B8	842	115	10	Visible and Near Infrared (VNIR)
B8a	865	20	20	Visible and Near Infrared (VNIR)
B9	940	20	60	Short Wave Infrared (SWIR)
B10	1375	30	60	Short Wave Infrared (SWIR)
B11	1610	90	20	Short Wave Infrared (SWIR)
B12	2190	180	20	Short Wave Infrared (SWIR)



Fig. 2 - Particolare dell'area di studio osservata in color composite 8 4 3. Secondo la composizione RGB alla banda B8 (infrarosso vicino) viene assegnato il colore fondamentale rosso, alla banda B4 (rosso) il colore fondamentale verde e alla banda B3 (verde) il colore fondamentale blu. Poiché la clorofilla presenta un'alta riflettanza nell'infrarosso vicino, più bassa nel rosso e variabile nel verde a seconda del contenuto di acqua, la vegetazione apparirà di colore rosso. Nell'immagine si nota Villa Ada a sinistra e parte della R.N. Valle dell'Aniene al centro.

versamente dai sensori LANDSAT che registrano immagini con intensità luminosa di 6 bit (64 livelli di grigio). Queste considerazioni hanno fatto ritenere opportuno l'utilizzo, nell'ambito dei prodotti non commerciali e di libero accesso, delle immagini multispettrali in alta risoluzione Sentinel-2.

Calcolo della superficie dei boschi urbani

Per quantificare l'area coperta degli alberi e degli arbusti nelle cinque aree di studio è stata effettuata una classificazione supervisionata di una immagine multispettrale Sentinel 2A acquisita il 30 giugno 2019. Per la classificazione supervisionata è stato utilizzato il software open source

SNAP 7.0.0 rilasciato dall'ESA appositamente per l'analisi e il trattamento dei prodotti Sentinel. Il sistema mette a disposizione dell'utente diversi algoritmi di classificazione supervisionata in base al tipo di dati di cui si dispone e alla precisione dei risultati che si desidera ottenere. Nel presente studio è stato utilizzato il metodo statistico "Random Forest" che si è rivelato il più robusto ed affidabile per individuare gli ambienti naturali e seminaturali e al loro interno le formazioni di conifere e le formazioni di latifoglie. Poiché lo studio prende in esame solo il periodo primaverile, si è deciso di non operare un'ulteriore suddivisione tra latifoglie decidue e sempreverdi. Per un esame approfondito della procedura statistica Random Forest e delle tecniche di machine learning si rimanda a Hastie et al. (2009) e Breiman (2001); in particolare per le applicazioni in Ecologia si veda Elith et al. (2008).

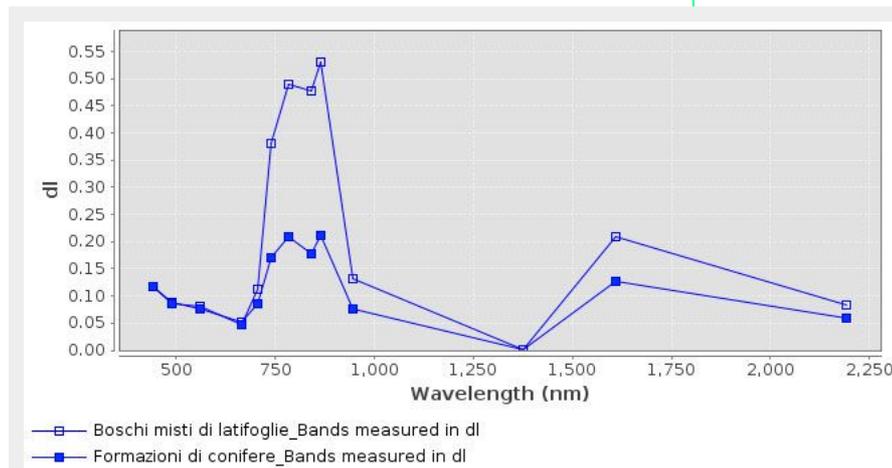


Fig. 3 - Firme spettrali per latifoglie e conifere. Le firme spettrali rappresentano la riflettanza, cioè la percentuale dell'energia radiante incidente su un corpo in ciascuna lunghezza d'onda, che viene riflessa. La vegetazione assume valori di riflettanza particolarmente elevati intorno agli 800 nm, nell'infrarosso vicino. In questa regione le firme spettrali delle latifoglie e delle conifere mostrano anche la loro massima separazione. La motivazione fisica di questo fenomeno è dovuta alle caratteristiche morfologiche delle foglie. Le foglie aghiformi delle conifere hanno una superficie ridotta rispetto alle latifoglie e quindi la radiazione incidente su di esse verrà riflessa in misura minore. Nel grafico la riflettanza non è espressa in % ma in dl (dimensionless) poiché i prodotti Sentinel di livello 1 C non sono calibrati "Bottom of Atmosphere" (Weiss & Baret 2016).

La prima fase dell'analisi, definita "fase di training" ha richiesto l'individuazione di un certo numero di aree di training, cioè zone campione rappresentative delle classi d'uso del suolo, necessarie per addestrare l'algoritmo di classificazione. Sono state definite le seguenti sette classi:

- acque interne (Tevere, Aniene e altre raccolte naturali e artificiali di acque);
- aree agricole (varie tipologie, irrigue e non irrigue);
- formazioni di conifere con forte prevalenza di *Pinus pinea* L.;
- tessuto urbano (edifici, infrastrutture industriali, aree commerciali);
- formazioni di latifoglie dominate da *Quercus ilex* L. e, nei settori ripariali, da *Salix alba* L. e *Populus* spp.;
- terreno nudo (affioramenti rocciosi e formazioni artificiali prive di vegetazione);
- vie di comunicazione (rete stradale, autostradale e ferroviaria).

Nell'impossibilità di effettuare rilevamenti sul terreno a causa del lockdown, le aree di training sono state tracciate sulla base dell'immagine mul-

tispettrale. In particolare per l'esame della vegetazione è risultata particolarmente utile l'osservazione in color composite B8, B4 e B3 poiché sovrapponendo queste tre bande i pixel associati alla vegetazione appaiono di colore rosso brillante e si differenziano in modo netto dalle altre classi di uso del suolo (Fig. 2). Inoltre è stato possibile separare in prima approssimazione le conifere dalle latifoglie, per i diversi valori di riflettanza nell'infrarosso vicino (Fig. 3).

Per verificare l'accuratezza della classificazione il software SNAP 7.0.0 mette a disposizione una procedura per il calcolo della matrice di confusione. Sono stati utilizzati 72 punti di controllo al suolo selezionati sulla base delle ortofotocarte ad alta risoluzione disponibili dal Portale Cartografico della Regione Lazio ed è stata generata la matrice riportata in Tab. 2 che indica una accuratezza dell'82.35% nella classificazione delle conifere e del 100% nella classificazione delle latifoglie (le altre cinque classi di uso del suolo sono state raggruppate sotto la voce "Altro").

Da ultimo, limitando l'esame alle sole conifere e latifoglie è stato calcolato il coefficiente k (Landis & Koch 1977, Montserud & Leamans 1992) che è risultato pari a 0.776, indicando una sostanziale concordanza nell'attribuzione delle due classi con la realtà al suolo riportata nell'immagine multispettrale.

Indice di area fogliare (LAI)

L'indice di area fogliare (LAI – Leaf Area Index) è definito come rapporto tra metà della superficie fogliare totale verde e la superficie orizzontale del terreno su cui si proietta l'ombra della chioma (Fang & Liang 2008) ed è quindi un indice adimensionale [$m^2 m^{-2}$]. La superficie delle foglie che svolge la fotosintesi è l'interfaccia per lo scambio di energia e massa tra la copertura vegetale e l'atmosfera, pertanto l'indice LAI è uno dei più importanti parametri biofisici utilizzati nei modelli ecologici. I metodi di stima del LAI possono basarsi su rilevazioni di campo (*ground-based methods*), ad esempio attraverso l'analisi delle fotografie emisferiche riprese alla base degli alberi, o attraverso tecniche di *remote sensing*. Per questo secondo approccio esistono sostanzialmente due modalità: (i) il calcolo dei principali indici di vegetazione (RVI, NDVI, SAVI, EVI) e la ricerca di relazioni empiriche tra questi e il LAI attraverso tecniche di regressione lineare e non-lineare; (ii) l'uso dei dati normalizzati di riflettanza spettrale della vegetazione e del suolo e l'applicazione di modelli di calcolo basati sullo sviluppo di reti neurali (Verrelst & Rivera 2017).

Sentinel Toolbox® attraverso il processore Biophysical Processor dispone di algoritmi specifici per la stima delle variabili biofisiche della vegetazione (LAI, FAPAR, FVC, CCC, CWC) basati sull'implementazione di reti neurali (Weiss et al. 2002) ed è stato pertanto utilizzato nel presente studio per il calcolo dell'indice LAI. Per un esame dettagliato degli algoritmi implementati in Biophysical Processor si rimanda a Weiss & Baret (2016).

La stima dell'indice di area fogliare nelle aree di studio è stata effettuata sulla base di due immagini multispettrali acquisite dal satellite Sentinel 2A, il 16 marzo 2020 e il 10 aprile 2020.

Concentrazione atmosferica del particolato (C)

Le concentrazioni atmosferiche orarie del particolato fine e ultrafine nei due mesi di studio sono state ottenute

Tab. 2 - Matrice di confusione. Nelle righe è riportato il numero di pixel di controllo riconosciuti dall'operatore come appartenenti alla classe in esame e assegnati correttamente o meno dall'algoritmo di classificazione. La colonna "a" riporta il totale dei pixel di controllo relativi a ciascuna classe. Lungo la diagonale è presente il numero di pixel di controllo identificati correttamente dall'algoritmo, mentre nella colonna "c" è riportato per ciascuna classe il numero di pixel assegnati in maniera errata. L'accuratezza della classificazione è riportata nella colonna "b" ed è calcolata come rapporto tra numero di pixel correttamente assegnati e numero totale di pixel della classe in esame. L'accuratezza totale è la media delle accuratezze di ciascuna classe.

	Conifere	Latifoglie	Altro	a	b	c
Conifere	14	0	3	17	82.35%	3
Latifoglie	0	10	0	10	100%	0
Altro	1	0	44	45	97.78%	1
-	15	10	47	72	93.38%	-

dalla media dei valori delle stazioni di rilevamento ARPA Lazio più vicine alle aree di studio: Villa Ada, Tenuta del Cavaliere, Bufalotta e Tiburtina per il PM_{10} e Villa Ada e Tenuta del Cavaliere per il $PM_{2.5}$ (Tab. 3).

Inoltre sono stati acquisiti i dati orari di piovosità e velocità del vento dal primo marzo al 30 aprile 2020 tramite la stazione di rilevamento del Servizio Integrato Agrometeorologico dell'ARSIAL di Roma, v. Laciani 38.

Rimozione del particolato

La rimozione del particolato atmosferico da parte degli alberi non è direttamente correlata alle funzioni fisiologiche di traspirazione e fotosintesi. In assenza di piogge le foglie intercettano meccanicamente le polveri sottili, una quota delle quali viene risospesa in atmosfera e la restante parte viene trattenute dai peli e dalla cuticola cerosa per tornare al suolo dopo la caduta delle foglie. La vegetazione può essere quindi considerata un "filtro transitorio" del particolato aerodisperso, riuscendo tuttavia in particolari condizioni a ridurre sensibilmente la concentrazione atmosferica locale.

In presenza di piogge, quando le precipitazioni raggiungono il valore soglia di 0.2 mm (Wang et al. 2008, Hirabayashi 2012) si ritiene che tutto il particolato venga dilavato dalle foglie e rilasciato al suolo e la capacità di rimozione risulti nulla. Lo studio pertanto prende in esame la deposizione del particolato sulle foglie nei giorni privi di precipitazioni o con quantità di pioggia ≤ 0.2 mm.

L'efficienza di cattura del particolato da parte della vegetazione è legata alle caratteristiche delle piante, alla struttura morfo-anatomica delle foglie e alla particolare distribuzione spaziale dei boschi (Sæbø et al. 2012). Inoltre, numerosi fattori ambientali quali l'umidità e la temperatura dell'aria, la velocità del vento e la concentrazione atmosferica del particolato, influenzano direttamente la capacità di abbattimento svolto dagli alberi.

Tab. 3 - Stazioni di rilevamento ARPA Lazio utilizzate.

Stazione	Tipo	Lat N	Long E	Quota (m s.l.m.)
Villa Ada	Background urbano	41.932874	12.506971	50
Cavaliere	Background suburbano	41.929383	12.658363	48
Bufalotta	Background urbano	41.947649	12.533682	41
Tiburtina	Traffico urbano	41.910257	12.548870	32

Tab. 4 - Velocità di deposizione del PM_{2.5} e percentuale di risospensione in funzione della velocità del vento, per unità di superficie fogliare.

Velocità del vento (m s ⁻¹)	Velocità di deposizione V _{dPM2.5} (cm s ⁻¹)			Risospensione (r%)
	media	minimo	massimo	
0	0	0	0	0.0
1	0.03	0.006	0.042	1.5
2	0.09	0.012	0.163	3.0
3	0.15	0.018	0.285	4.5
4	0.17	0.022	0.349	6.0
5	0.19	0.025	0.414	7.5
6	0.2	0.029	0.478	9.0
7	0.56	0.056	1.506	10.0
8	0.92	0.082	2.534	11.0
9	0.92	0.082	2.534	12.0
10	2.11	0.57	7.367	13.0
11	2.11	0.57	7.367	16.0
12	2.11	0.57	7.367	20.0
13	2.11	0.57	7.367	23.0

Nowak et al. (2014) indicano la quantità totale di polveri sottili e ultrasottili rimosse dagli alberi, Q [µg], come il prodotto, calcolato su tutto il periodo di osservazione, T [h], del flusso delle particelle intercettate dalle foglie, F [µg m⁻² h⁻¹], dell'indice di superficie fogliare, LAI [m² m⁻²] e dell'area coperta dagli alberi, A [m²], meno la percentuale di polveri sottili risospese in atmosfera, r%. Il flusso F a sua volta è dato dal prodotto della velocità di deposizione V_d [m h⁻¹] e della concentrazione atmosferica del particolato, C [µg m⁻³].

PM_{2.5}

Per calcolare la rimozione del PM_{2.5} è necessario conoscere le seguenti variabili: (i) V_{d, PM2.5 t} (velocità di deposizione del PM_{2.5} al tempo t); (ii) C_{PM2.5 t} (concentrazione atmosferica del PM_{2.5} al tempo t); (iii) r%_{2.5t} (percentuale di PM_{2.5} risospeso in atmosfera al tempo t).

La velocità di deposizione del PM_{2.5} e la percentuale di risospensione sono stati calcolati da diversi autori (Beckett et al. 2000, Freer-Smith et al. 2004, Pullman 2009) come funzione della velocità del vento (Tab. 4). Nel presente studio le velocità medie di deposizione e le percentuali di risospensione sono state ottenute per interpolazione utilizzando i valori effettivi di velocità oraria del vento.

Secondo Hirabayashi et al. (2015), il flusso di particolato che raggiunge le foglie al tempo t è dato da (eqn. 1):

$$f_t = V_{d, PM_{2.5}t} \cdot C_{PM_{2.5}t} \quad (1)$$

Tab. 5 - Superfici delle aree di studio. Nella categoria "Altro" sono comprese le aree agricole, gli incolti, le superfici asfaltate, gli edifici, le aree di servizio, i sentieri e le vie di comunicazione.

Area	Superficie (ha)				Tot. aree boscate	% aree boscate
	Tot. sito	Conifere	Latifoglie	Altro		
Villa Ada	155	67.27	65.76	21.96	133.04	85.83
P.R.U. Aguzzano	60	5.21	24.18	30.61	29.39	48.99
R.N. Valle dell'Aniene	646	86.78	265.25	293.97	352.03	54.49
R.N. Marcigliana	4970	278.15	1001.59	3690.27	1279.73	25.75
Villa Borghese	126	53.87	20.8	51.33	74.67	59.26
Totale	5957	491.28	1377.58	4088.14	1868.86	31.37

La quota di particolato risospeso in atmosfera al tempo t (R_t) è data dal particolato accumulato al tempo t-1 e quindi già presente sulle foglie (Q_{t-1}), più il flusso di particolato intercettato al tempo t (f_t), moltiplicato per la percentuale di risospensione al tempo t (r%_t - eqn. 2):

$$R_t = Q_{t-1} + f_t \cdot r_t \quad (2)$$

Dopo la risospensione del particolato in atmosfera, la quantità di PM_{2.5} rimasta sulle foglie al tempo t è data da (eqn. 3):

$$Q_t = Q_{t-1} + f_t - R_t \quad (3)$$

e il flusso del PM_{2.5} al netto della quota risospesa in atmosfera è dato da (eqn. 4):

$$F_t = f_t - R_t \quad (4)$$

Se F_t assume valori negativi dovuti a un'elevata quota di risospensione e il valore assoluto di f_t supera la concentrazione atmosferica del particolato, si pone F_t = f_t.

La quantità di particolato trattenuta dalle foglie sarà quindi (eqn. 5):

$$Q = \sum_{i=1}^T F_i \cdot LAI \cdot A \quad (5)$$

PM₁₀

Per il PM₁₀, Lovett (1994) indica i seguenti valori delle velocità di deposizione relativi ad un indice LAI_{PM10} di 6 m² m⁻²: (i) V_{d,media} = 0.0064 m s⁻¹; (ii) V_{d,min} = 0.0025 m s⁻¹; (iii) V_{d,max} = 0.01 m s⁻¹, da cui si ricavano le effettive velocità di deposizione media, minima e massima con la formula (eqn. 6):

$$V_{d,effettiva} = \frac{LAI}{LAI_{PM10}} \cdot V_d \quad (6)$$

La percentuale di risospensione in atmosfera è pari al 50% del flusso (Zinke 1967).

La quantità di PM₁₀ trattenuta dalle foglie si ottiene quindi con la formula (eqn. 7):

$$Q_{PM10} = \sum_{i=1}^T V_{d,effettiva} \cdot C_{PM10} \cdot LAI \cdot A \cdot r \% \quad (7)$$

Risultati e conclusioni

Le immagini multispettrali utilizzate sono state ricampionate alla risoluzione spaziale delle bande B8, B4 e B3 (10 × 10 m). Attraverso la classificazione dell'immagine di giugno 2019, per ciascuna area di studio è stata prodotta in ambiente GIS (QGIS 3.10) una mappa raster della distribuzione dei boschi misti di latifoglie e delle formazioni di conifere (Fig. 4) e calcolate le rispettive superfici (Tab. 5). Le immagini di marzo e aprile 2020 sono state utilizzate per generare due mappe raster di distribuzione dell'indice LAI. Successivamente queste mappe sono state filtrate con i layer di distribuzione delle tipologie vegetazionali nelle aree di studio e per ciascuna tipologia è stato calcolato il valore medio dell'indice LAI (Tab. 6, Fig. 5).

Utilizzando questi dati, le quantità medie delle polveri sottili e ultrasottili complessivamente rimosse risultano essere 4330.22 ± 1429.54 Kg di PM₁₀ e

Fig. 4 - Distribuzione dei boschi urbani. In verde scuro le conifere, in verde chiaro le latifoglie.



373.33 ± 124.01 Kg di PM_{2.5} (Tab. 7).

Questi risultati, per la brevità dell'intervallo di tempo esaminato, non sono direttamente confrontabili con studi condotti per periodi di tempo maggiori (Bottalico et al. 2016, Nowak et al. 2006, Nowak et al. 2013). È tuttavia possibile confrontare le quantità di PM₁₀ rimosse per ha a Villa Ada con i risultati di uno studio analogo condotto da Silli et al. (2015) nel medesimo sito. In quest'ultimo studio, come atteso, le quantità di PM₁₀ rimosse per ha durante l'intera stagione primaverile (21 marzo-21 giugno) mostrano valori più elevati di quelli del solo periodo 1 marzo-30 aprile, con una differenza più marcata tra le latifoglie (sempreverdi + decidue) che non tra le conifere

(Tab. 8). Ciò trova una spiegazione nel fatto che secondo Silli e colleghi il contributo delle specie decidue nell'abbattimento del PM₁₀ inizia solo intorno alla metà di aprile per

Tab. 6 - Indice LAI nelle aree di studio. L'incremento dei valori nel mese di aprile è dovuto alla crescita di nuove foglie e quindi all'aumento della superficie fogliare per unità di superficie del terreno.

Area	Marzo		Aprile	
	Conifere	Latifoglie	Conifere	Latifoglie
Villa Ada	1.28 ± 0.33	1.36 ± 0.35	1.50 ± 0.30	1.67 ± 0.35
P.R.U. Aguzzano	1.33 ± 0.45	1.21 ± 0.39	1.69 ± 0.49	1.67 ± 0.46
R.N. Valle dell'Aniene	0.83 ± 0.48	1.05 ± 0.38	1.19 ± 0.38	1.46 ± 0.44
R.N. Marcigliana	1.13 ± 0.55	1.17 ± 0.43	1.55 ± 0.62	1.74 ± 0.49
Villa Borghese	1.11 ± 0.39	1.03 ± 0.36	1.29 ± 0.36	1.33 ± 0.33

Tab. 7 - PM₁₀ e PM_{2.5} rimossi nel periodo di studio.

PM	Area	Conifere	Latifoglie	Conifere	Latifoglie
		(Kg)		(Kg ha ⁻¹)	
PM ₁₀	Villa Ada	159.75 ± 36.49	185.46 ± 42.39	2.37 ± 0.54	2.82 ± 0.64
	P.R.U. Aguzzano	14.58 ± 4.51	60.96 ± 18.14	2.80 ± 0.87	2.52 ± 0.75
	R.N. Valle dell'Aniene	107.58 ± 45.83	507.68 ± 165.86	1.24 ± 0.53	1.91 ± 0.63
	R.N. Marcigliana	607.26 ± 266.27	2556.83 ± 810.32	2.18 ± 0.96	2.55 ± 0.81
	Villa Borghese	94.68 ± 29.47	35.43 ± 10.27	1.76 ± 0.55	1.70 ± 0.49
	<i>Subtotale</i>	<i>983.86 ± 382.56</i>	<i>3346.37 ± 1046.97</i>	<i>10.35 ± 3.44</i>	<i>11.51 ± 3.32</i>
<i>Totale</i>	<i>4330.22 ± 1429.54</i>		-		
PM _{2.5}	Villa Ada	13.56 ± 3.10	14.47 ± 3.31	0.20 ± 0.05	0.22 ± 0.05
	P.R.U. Aguzzano	1.14 ± 0.35	5.05 ± 1.50	0.22 ± 0.07	0.21 ± 0.06
	R.N. Valle dell'Aniene	12.73 ± 5.42	48.30 ± 15.78	0.15 ± 0.06	0.18 ± 0.06
	R.N. Marcigliana	54.05 ± 23.70	211.11 ± 66.91	0.19 ± 0.09	0.21 ± 0.07
	Villa Borghese	9.34 ± 2.91	3.56 ± 1.03	0.17 ± 0.05	0.17 ± 0.05
	<i>Subtotale</i>	<i>90.83 ± 35.48</i>	<i>282.50 ± 88.53</i>	<i>0.94 ± 0.32</i>	<i>0.99 ± 0.29</i>
<i>Totale</i>	<i>373.33 ± 124.01</i>		-		

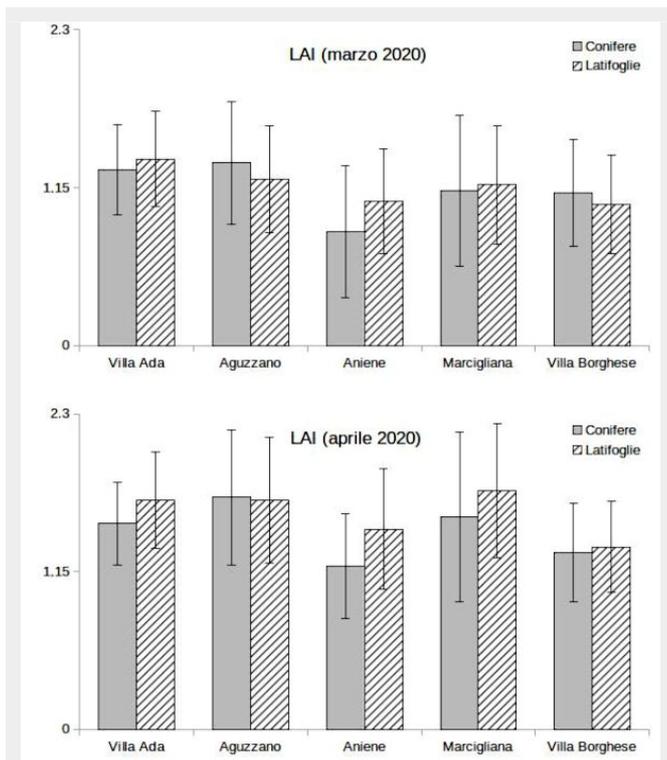


Fig. 5 - Valori dell'indice LAI nei mesi di marzo e aprile 2020.

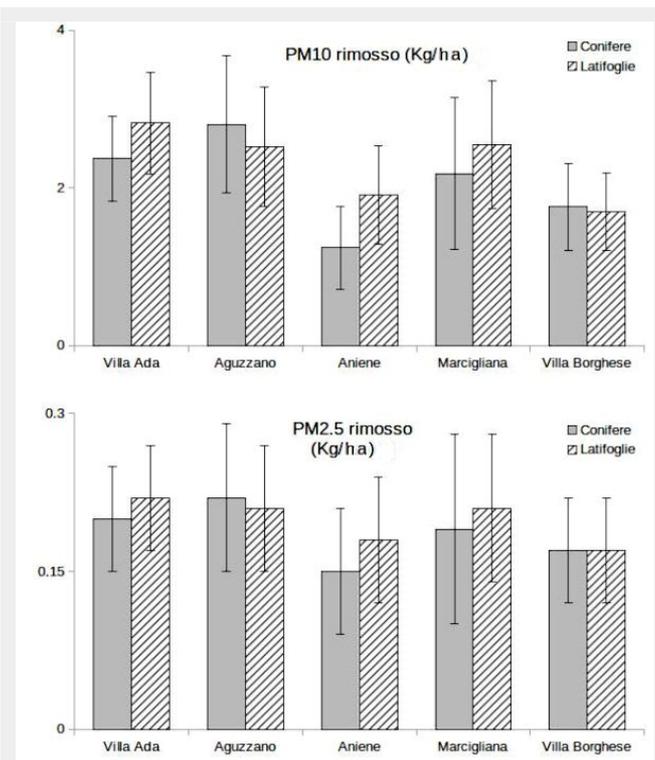


Fig. 6 - PM₁₀ e PM_{2.5} rimosso per ha di superficie boscata.

crescere progressivamente durante tutta la primavera e parte dell'estate. È quindi plausibile che l'indagine conclusa alla fine di marzo, a causa del contributo ancora modesto fornito dalle specie decidue, abbia registrato valori di cattura del particolato per ha nelle latifoglie più bassi di quelli calcolati per l'intero periodo primaverile.

Va aggiunto inoltre che nello studio del 2015 per valutare la superficie coperta dalle specie sempreverdi, decidue e conifere viene effettuata una classificazione supervisionata tramite il metodo *Maximum Likelihood* di una immagine multispettrale LANDSAT con una risoluzione spaziale di 30 m, dalla quale l'area boscata totale risulta essere di 116.4 ha. Nel presente studio è stato utilizzato un diverso metodo di classificazione supervisionata (Random Forest) e immagini multispettrali Sentinel 2 con risoluzione di 10 m, che hanno fornito una stima della superficie boscata pari a 133.04 ha. Applicando questo valore ai calcoli del 2015 le quantità di PM₁₀ rimosse per ha si avvicinano ulteriormente. Per quanto riguarda le conifere, che nel presente studio coprono una superficie maggiore di quella calcolata da Silli e colleghi (67.27 ha contro 42.2 ha), i valori ricalcolati per il periodo primaverile 2015 coincidono con il limite superiore dei valori stimati nel presente studio (2.91 Kg ha⁻¹), mentre per quanto riguarda le latifoglie, come atteso dalle considerazioni esposte, i valori ricalco-

lati del periodo primaverile 2015 (4.46 Kg ha⁻¹) rimangono al di sopra di quelli calcolati dal 1 marzo al 30 aprile 2020.

Tutto ciò conferma l'attendibilità del metodo adottato e la sostanziale concordanza dei risultati ottenuti con quelli presentati in altri studi, almeno per quanto riguarda l'abbattimento del PM₁₀ a Villa Ada.

Nel periodo esaminato le aree di indagine hanno mostrato una sostanziale omogeneità nella capacità di rimozione per ha del particolato fine e ultrafine (Fig. 6). È da notare la *performance* relativamente più elevata delle latifoglie rispetto alle conifere come risulta, per il periodo primaverile, anche da altri studi condotti nella città di Roma (Marando et al. 2016). Costituiscono una parziale eccezione il parco di Aguzzano e Villa Borghese. Questo dato, coerente con i valori dell'indice LAI, può trovare una spiegazione per quanto riguarda il parco di Aguzzano nella particolare composizione floristica (per Villa Borghese non si dispone di censimenti aggiornati e attendibili). Nel parco di Aguzzano circa il 95% delle latifoglie è costituito da specie decidue (Petrella et al. 2018) che all'inizio della stagione primaverile contribuiscono ancora in maniera ridotta all'incremento della biomassa fogliare, per poi aumentare il loro contributo con l'avanzare della stagione. Infatti i valori LAI delle latifoglie passano da 1.21 ± 0.39 di marzo a 1.67 ± 0.46 di aprile (+38%) e diventano quasi coincidenti con quelli delle conifere. È verosimile che con il progredire della stagione primaverile il valore LAI delle latifoglie, grazie al contributo della nuova biomassa fogliare prodotta dalle specie caducifoglie, raggiunga e superi quello delle conifere, uniformandosi alla tendenza presente nelle altre aree.

Tra le cinque aree esaminate è anche da rilevare la modesta capacità di cattura per ha del particolato nella riserva della Valle dell'Aniene. Qui, come nella riserva della Marcigliana, le attività

Tab. 8 - Confronto tra i valori riportati da Silli et al. (2015) e quelli riportati nel presente studio: superfici delle aree boscate e rimozione per ha del PM₁₀ a Villa Ada.

Periodo di studio	Superficie (ha)			Rimozione PM ₁₀ (Kg ha ⁻¹)	
	Conifere	Latifoglie	Tot. aree boscate	Conifere	Latifoglie
03-21 / 06-21, 2015	42.2	74.2	116.40	3.33	5.11
03-01 / 04-30, 2020	67.3	65.8	133.04	2.37 ± 0.54	2.82 ± 0.64

agricole hanno modificato ed impoverito profondamente l'assetto vegetazionale. Ma mentre alla Marcigliana la riserva si sviluppa a ridosso del sistema collinare a nord di Roma e le attività agricole non hanno compromesso pesantemente le cerrete, nella riserva della Valle dell'Aniene la particolare morfologia pianeggiante e strettamente peri-fluviale della riserva, pressata da insediamenti urbani e attività agricole che in taluni casi giungono a lambire le stesse sponde fluviali, rende molto più marcata la frammentazione ambientale e problematico l'affermarsi di formazioni di bosco maturo.

Il presente studio sulle capacità di abbattimento del particolato atmosferico da parte dei boschi urbani condotto da remoto a causa del lockdown, ha mostrato che tecniche di remote sensing basate su banche dati di libero accesso e sull'utilizzo di software gratuiti e open source permettono anche a realtà associative esterne al mondo della ricerca scientifica di fornire un contributo al miglioramento delle conoscenze degli ambienti naturali e seminaturali e dei servizi ecosistemici. Questo aspetto è rilevante perché consente alle comunità locali, spesso prive di mezzi e di potere di contrattazione, di dotarsi di robusti argomenti a sostegno delle iniziative per la tutela del territorio e nel contempo può restituire al mondo scientifico elementi di conoscenza precisi, dettagliati e a grande scala.

Questo approccio a lungo sottovalutato, si sta rivelando originale ed interessante e in qualche caso insostituibile per la stessa ricerca scientifica e per la conservazione delle risorse naturali (Hill et al. 2020). È auspicabile che anche la conservazione dei boschi urbani e il miglioramento della resilienza delle città sappiano avvalersi dell'interazione a vari livelli tra stakeholders, comunità scientifica, decisori politici e comunità locali motivate e capaci di dotarsi di strumenti di indagine e conoscenze scientifiche adeguate.

Bibliografia

Beckett KP, Freer PH, Taylor G (2000). Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology* 6: 995-1003. - doi: [10.1046/j.1365-2486.2000.00376.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00376.x)

Bottalico F, Chirici G, Giannetti F, Di Marco A, Nocentini S, Paoletti E, Salbitano F, Sanesi G, Serenelli C, Travaglini D (2016). Air pollution removal by green infrastructures and urban forests in the city of Florence. *Agriculture and Agricultural Science Proceedings* 8: 243-251. - doi: [10.1016/j.aaspro.2016.02.099](https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.099)

Breiman L (2001). Random Forests. *Machine Learning* 45: 5-32. - doi: [10.1023/A:1010933404324](https://doi.org/10.1023/A:1010933404324)

Cafiero C (2003a). Ambienti fluviali e comunità urbane. *La Riserva naturale della Valle dell'Aniene. Urbanistica Quaderni* 37: 195-207.

Cafiero C (2003b). Agricoltura e natura intorno alla città di Crustumerium. *La Riserva naturale della Marcigliana. Urbanistica Quaderni* 37: 177-194.

Cao C, Jiang W, Wang B, Fang J, Lang J, Tian G, Jiang J, Ting F, Zhu TF (2014). Inhalable microorganisms in Beijing's PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants during a severe smog event. *Environmental Science and Technology* 48 (3): 1499-1507. - doi: [10.1021/es4048472](https://doi.org/10.1021/es4048472)

Di Giovine M (1996). Villa Ada: il piano per l'acquisizione pubblica. In "Quaderni dell'Ambiente n. 4" (Roma - Ufficio Tutela Ambiente eds). Edizioni Grafiche Manfredi, Roma, pp. 33-34.

Elith J, Leathwick JR, Hastie T (2008). A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* 77: 802-813. - doi: [10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x)

Fang H, Liang S (2008). Leaf area index models. In "Encyclopedia of Ecology" (Jorgensen SE, Fath B eds). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. [ISBN 9780080914565]

Fares S, Sanesi G, Vacchiano G, Salbitano F, Marchetti M (2020). Le foreste urbane ai tempi del COVID-19 ci proteggono dalle polveri sottili. *Forest@* 17: 48-51. - doi: [10.3832/efor3494-017](https://doi.org/10.3832/efor3494-017)

Feng C, Li J, Sun W, Zhang Y, Wang Q (2016). Impact of ambient fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure on the risk of influenza-like illness: a time-series analysis in Beijing, China. *Environmental Health* 15: 17. - doi: [10.1186/s12940-016-0115-2](https://doi.org/10.1186/s12940-016-0115-2)

Forastiere L, Carugno M, Baccini M (2020). Assessing short-term impact of PM₁₀ on mortality using a semiparametric generalized propensity score approach. *Environmental Health* 19: 46. - doi: [10.1186/s12940-020-00599-6](https://doi.org/10.1186/s12940-020-00599-6)

Freer-Smith PH, El-Khatib AA, Taylor G (2004). Capture of particulate pollution by trees: a comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species. *Water, Air, and Soil Pollution* 155: 173-187. - doi: [10.1023/B:WATE.0000026521.99552.f0](https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000026521.99552.f0)

Hastie T, Tibshirani R, Friedman J (2009). *The elements of statistical learning* (2nd edn). Springer, Switzerland, pp. 745. [online] URL: <http://books.google.com/books?id=tVlJmNS3Ob8C>

Hill R, Adem C, Alangui WV, Molnár Z, Aumeeruddy-Thomas Y, Bridgewater P, Tengö M, Thaman R, Adou Yao CY, Berkes F, Carino J, Carneiro Da Cunha M, Diaw MC, Díaz S, Figueroa VE, Fisher J, Hardison P, Ichikawa K, Kariuki P, Karki M, Lyver POB, Malmer P, Masardule O, Oteng Yeboah AA, Pacheco D, Patari-dze T, Perez E, Roué MM, Roba H, Rubis J, Saito O, Xue D (2020). Working with indigenous, local and scientific knowledge in assessments of nature and nature's linkages with people. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 43: 8-20. - doi: [10.1016/j.cosust.2019.12.006](https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.12.006)

Hirabayashi S (2012). i-Tree Eco precipitation interception model descriptions. [online] URL: <http://www.itreetools.org/support/resources-overview/i-tree-methods-and-files/i-tree-eco-and-ufore-resources>

Hirabayashi S, Kroll CN, Nowak DJ (2015). i-Tree Eco dry deposition model descriptions. USDA Forest Service, Syracuse, NY, USA.

Landis JR, Koch GG (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33 (1): 159-174. - doi: [10.2307/2529310](https://doi.org/10.2307/2529310)

Liu C, Chen R, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Guo Y, Tong S, Coelho MSZS, Saldiva PHN, Lavigne E, Matus P, Valdes Ortega N, Osorio Garcia S, Pascal M, Stafoggia M, Scortichini M, Hashizume M, Honda Y, Hurtado-Diaz M, Cruz J, Nunes B, Teixeira JP, Kim H, Tobias A, Iñiguez C, Forsberg B, Aström C, Ragettli MS, Guo YL, Chen BY, Bell ML, Wright CY, Scovronick N, Garland RM, Milojevic A, Kysely J, Urban A, Orru H, Indermitte E, Jaakkola JJK, Rytö NRI, Katsouyanni K, Analitis A, Zanobetti A, Schwartz J, Chen J, Wu T, Cohen A, Gasparrini A, Kan H (2019). Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *The New England Journal of Medicine* 381: 705-715. - doi: [10.1056/NEJMoa1817364](https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364)

Lovett GM (1994). Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: an ecological perspective. *Ecological Applications* 4: 629-650. - doi: [10.2307/1941997](https://doi.org/10.2307/1941997)

Manes F, Silli V, Salvatori E, Incerti G, Galante G, Fusaro L, Perrino C (2014). Urban ecosystem services: tree diversity and stability of PM₁₀ removal in the metropolitan area of Rome. *Annali di Botanica* 4: 19-26.

Marando F, Salvatori E, Fusaro L, Manes F (2016). Removal of PM₁₀ by forests as a nature-based solution for air quality improvement in the Metropolitan City of Rome. *Forests* 7 (7): 150. - doi: [10.3390/f7070150](https://doi.org/10.3390/f7070150)

Mo Z, Fu Q, Zhang L, Lyu D, Mao G, Wu L, Xu P, Wang Z, Pan X, Chen Z, Wang X, Lou X (2018). Acute effects of air pollution on respiratory disease mortalities and outpatients in Southeastern China. *Scientific Reports* 8: 3461. - doi: [10.1038/s41598-018-19939-1](https://doi.org/10.1038/s41598-018-19939-1)

Montserud RA, Leamans R (1992). Comparing global vegetation map with the kappa statistic. In: "Ecological Modelling vol. 62" (Fath BD ed). Springer, pp. 275-293.

Nowak DJ, Crane DE, Stevens JC (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening* 4: 115-123. - doi: [10.1016/j.ufug.2006.01.007](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007)

- Nowak DJ, Hirabayashi S, Bodine A, Hoehn R (2013). Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution* 178: 395-402. - doi: [10.1016/j.envpol.2013.03.050](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.050)
- Nowak DJ, Hirabayashi S, Bodine A, Greenfield E (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution* 193: 119-129. - doi: [10.1016/j.envpol.2014.05.028](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028)
- Petrella S, Cau F, Galli G, Riccardi M (2018). Valutazione dei servizi ecosistemici nel Parco regionale urbano di Aguzzano. [online] URL: <http://casalepoderosa.org/servizi-ecosistemici-del-parco-di-aguzzano/>
- Pullman M (2009). Conifer PM_{2.5} deposition and re-suspension in wind and rain events. Master's thesis. Cornell University, USA, pp. 51.
- Qin H, Hong B, Jiang R, Yan S, Zhou Y (2019). The effect of vegetation enhancement on particulate pollution reduction: CFD simulations in an urban park. *Forests* 10 (5): 373. - doi: [10.3390/f10050373](https://doi.org/10.3390/f10050373)
- Qin N, Liang P, Wu C, Wang G, Xu Q, Xiong X, Wang T, Zolfo M, Segata N, Qin H, Knight R, Gilbert JA, Zhu TF (2020). Longitudinal survey of microbiome associated with particulate matter in a megacity. *Genome Biology* 21: 55. - doi: [10.1186/s13059-020-01964-x](https://doi.org/10.1186/s13059-020-01964-x)
- Re S, Facchini A (2020). Potential effects of airborne particulate matter on spreading, pathophysiology and prognosis of a viral respiratory infection. E&P Repository. [online] URL: <http://repo.epiprev.it/688>
- Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin HM, Gawronska H, Gawronski SW (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment* 427-428: 347-354. - doi: [10.1016/j.scitotenv.2012.03.084](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084)
- Setti L, Passarini F, De Gennaro G, Di Gilio A, Palmisani J, Buono P, Fornari G, Perrone MG, Piazzalunga A, Barbieri P, Rizzo E, Miani A (2020). Relazione circa l'effetto dell'inquinamento da particolato atmosferico e la diffusione di virus nella popolazione. Position paper della Società Italiana di Medicina Ambientale. [online] URL: http://www.simaonlus.it/?page_id=694
- Silli V, Salvatori E, Manes F (2015). Removal of airborne particulate matter by vegetation in an urban park in the city of Rome (Italy): an ecosystem services perspective. *Annali di Botanica* 5: 69-76. [online] URL: <http://annalidibotanica.uniroma1.it/index.php/Annalidibotanica/article/view/13077>
- Verrelst J, Rivera JP (2017). A global sensitivity analysis toolbox to quantify drivers of vegetation radiative transfer models - Chapter 16. In: "Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling" (Petropoulos GP, Srivastava PK eds). Elsevier, pp. 319-339. - doi: [10.1016/B978-0-12-803011-0.00016-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803011-0.00016-1)
- Wang J, Endreny TA, Nowak DJ (2008). Mechanistic simulation of urban tree effects in an urban water balance model. *Journal of American Water Resource Association* 44 (1): 75-85. - doi: [10.1111/j.1752-1688.2007.00139.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00139.x)
- Weiss M, Baret F, Leroy M, Hautecoeur O, Bacour C, Prévot L, Bruguier N (2002). Validation of neural net techniques to estimate canopy biophysical variables from remote sensing data. *Agronomie* 22: 547-554. - doi: [10.1051/agro:2002036](https://doi.org/10.1051/agro:2002036)
- Weiss M, Baret F (2016). S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER - version 1.1. [online] URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox/sentinel-2-toolbox-features/>
- Zinke PJ (1967). Forest interception studies in the United States. In: "Forest Hydrology" (Sopper WE, Lull HW eds). Pergamon Press, Oxford, UK, pp. 137-161.