

Studio di biomonitoraggio dell'ozono in Abruzzo attraverso l'utilizzo di Kit miniaturizzati di *Nicotiana tabacum* Anno 2025

Relazione conclusiva

Dott. Sebastiano Bianco

Dott.ssa Donatella Rosoni

Dott.ssa Claudia Pisuttu

Pisa, Dicembre 2025

Indice

<i>Premessa</i>	3
1. Biomonitoraggio dell'ozono troposferico (attività 2025)	5
1.1. Allevamento delle piante bioindicatrici	5
1.2. Esposizione dei bioindicatori.....	8
1.3. Stima ed esito delle risposte biologiche	17
1.4. Scostamenti dal protocollo ANPA.....	26
2. Parametri meteo-climatici	27
3. Monitoraggio strumentale dell'ozono troposferico (attività 2025).....	50
3.1. Normativa di riferimento	50
3.2 Stazioni strumentali di riferimento	52
3.3 Elaborazione ed esito dei dati strumentali	53
4. Considerazioni conclusive.....	64
5. Bibliografia.....	67

Premessa

Da decenni l'ozono (O₃) è l'inquinante dell'aria più rilevante per il suo impatto biologico. In aggiunta agli effetti nocivi per l'uomo e gli animali e alle interazioni negative sui manufatti, a esso sono attribuiti danni alla vegetazione, che consistono in riduzioni delle prestazioni qualitative legate per lo più a effetti subliminali a carico delle membrane e dell'apparato fotosintetico. Nonostante che i meccanismi di formazione dell'O₃ (basati su reazioni tra ossidi di azoto e idrocarburi volatili, derivati specialmente dalle combustioni legate al traffico veicolare) indichino nelle aree urbane i siti preferenziali, abbondanti livelli di questo contaminante sono rinvenibili anche e, talvolta, soprattutto in aree extraurbane rurali e remote.

L'O₃ si presenta come un agente di stress peculiare: fattori genetici, ontogenetici e ambientali condizionano la sensibilità/tolleranza del vegetale a questo gas. Così, individui appartenenti alla stessa specie, ma a cultivar o cloni diversi, possono reagire in modo ben differenziato a esposizioni standardizzate. E non solo: foglie dello stesso soggetto con indice plastocronico diverso possono presentare differenze sostanziali nella risposta.

La possibilità di condurre indagini basate sull'interpretazione di specifici sintomi sulle piante, per avere indicazioni sull'inquinamento dell'aria, è stata ipotizzata da tempo e, già nel 1921, Ruston condusse osservazioni in questo senso in diverse aree industriali della Gran Bretagna. Numerose sono state le applicazioni pratiche di questa metodologia, che può essere utile anche per stimolare adeguatamente l'azione pubblica, in considerazione dei “vistosi” effetti che taluni inquinanti possono provocare sulla vegetazione (Lorenzini e Nali, 2005).

Il metodo in questione è basato sull'individuazione e la valutazione di sintomi tipici presenti su adatte specie vegetali, che sono definite “indicatrici” o “spia”. Quest'ultime, coltivate o spontanee, rispondono con effetti visibili specifici a concentrazioni molto basse di un dato inquinante. In sintesi, i principali requisiti che dovrebbe possedere una buona indicatrice sono:

- a) essere largamente distribuita nell'area geografica interessata;*
- b) avere un ciclo vegetativo il più lungo possibile;*
- c) essere ben adattata all'ambiente e dotata di buona rusticità, non essendo utilizzabili proficuamente allo scopo quelle specie che sono facilmente soggette a danni da fattori biotici (e.g. attacchi parassitari) e abiotici (quali stress termici e idrici).*

Una delle difficoltà maggiori nella diagnosi dell'effetto fitotossico degli inquinanti è legata alla possibilità che la contemporanea presenza di più sostanze porti alla formazione di effetti macroscopici misti. Per questo motivo, una pianta indicatrice ottimale dovrebbe, da una parte, essere molto sensibile a un determinato agente tossico (e, come detto, manifestare sintomi tipici e facilmente identificabili) e, dall'altra, essere molto resistente agli altri contaminanti che potrebbero determinare la comparsa di quadri sintomatici simili a quelli dovuti alla sostanza in questione. L'O₃ è noto indurre un'ampia “divergenza sintomatica”, così che colore e distribuzione delle lesioni variano anche sostanzialmente da una specie all'altra, in relazione anche alla loro maturità. Uno dei primi effetti percepibili precocemente a seguito di esposizioni severe a O₃ è la presenza di ridotte aree (1-2 mm) di aspetto idropico o “allessato”, ceroso o oleoso, che denotano stati di congestione dell'acqua negli spazi intercellulari e possono, o meno, divenire permanenti evolvendosi a necrosi. Stadi successivi sono rappresentati da “bronzatura” o dalla comparsa di necrosi puntiformi (“stippling”) o, comunque, localizzate (pochi millimetri, “flecking”), per lo più limitate al tessuto a palizzata delle regioni internervali. A questo livello, le foglie mostrano sintomi soltanto sulla pagina adassiale; se, invece, il mesofillo è indifferenziato, il danno può apparire su

entrambe le lamine. Nei casi molto acuti e nelle specie eccezionalmente sensibili, le aree necrotiche collassano, divenendo bifacciali. Si può avere la coalescenza di lesioni adiacenti e si può osservare il loro allargamento anche una volta cessata l'esposizione all'O₃, in conseguenza della degenerazione dei tessuti limitrofi. Nelle mono- e dicotiledoni, clorosi e necrosi sono tendenzialmente internervali, mentre nelle conifere i sintomi si presentano soprattutto negli aghi semi-maturi in forma di bande trasversali variamente distribuite.

1. Biomonitoraggio dell'ozono troposferico (attività 2025)

1.1. Allevamento delle piante bioindicatrici

L'allevamento dei germinelli di tabacco dei biosensori (cvv. Bel-W3, O₃-sensibile, e Bel-B, O₃-resistente) e l'allestimento dei kit da esporre per ogni ciclo di monitoraggio in aria-ambiente, sono stati realizzati presso le serre di San Piero a Grado (PI) del Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali (DiSAAA-a) dell'Università di Pisa, da personale tecnico esperto da tempo addestrato, in accordo con le procedure normative indicate dall'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente [ANPA (Lorenzini, 1999), ora Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA)], con alcune modifiche sintetizzate al paragrafo 1.4.

Il germoplasma di tabacco è stato riprodotto in purezza presso il DiSAAA-a e conservato in cella frigo (+4 °C) fino al momento dell'utilizzazione. La semina, realizzata a spaglio su terriccio organico (Potgrond P Trionum), è stata allestita a cadenza settimanale in idonee terrine di terracotta adeguatamente fertilizzate, umettate e drenate, mantenute in cella climatica ad aria filtrata (filtri a carbone attivo) in condizioni luminose e igrotermiche controllate (temperatura di 20-23 °C; umidità relativa al 70-80%; fotoperiodo di 14 ore; intensità luminosa di 500-550 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). L'emergenza e la completa distensione delle prime due foglioline cotiledonari si sono verificate nell'arco temporale di circa 7-9 giorni (*Figura 1*).

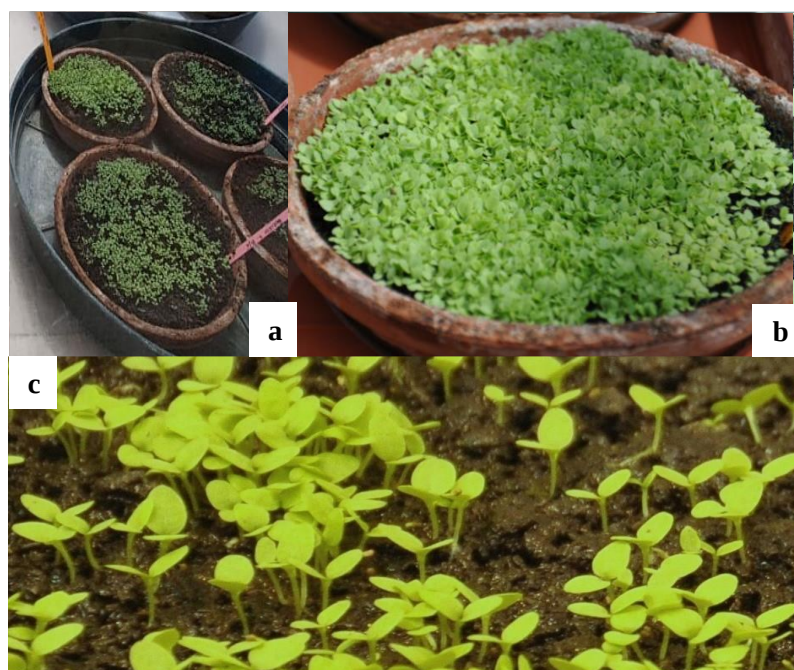


Figura 1. Semenzai di tabacco (*Nicotiana tabacum*) cvv. Bel-W3 e Bel-B in fase progressiva di sviluppo: a) germinazione; b) completa distensione delle prime due foglie cotiledonari e c) germinelli sviluppati prossimi al trapianto.

Dopo circa due settimane dalla semina, quando la prima foglia aveva raggiunto una lunghezza di meno di 1 cm, il personale ha provveduto all'allestimento dei singoli *kit*, ciascuno previamente contrassegnato con un codice identificativo. Un *kit* consiste in una piastra a sezione rettangolare (13×9 cm di lato) in polistirene, opportunamente adattata come da brevetto (Lorenzini, 1994), chiudibile all'occorrenza tra due appositi coperchi (*Figura 2a*). Essa è costituita da 24 pozzetti a sezione circolare (16 e 20 mm di diametro e profondità, rispettivamente), individuabili ciascuno da una lettera maiuscola in verticale (A, B, C e D) e da un numero progressivo in orizzontale (da 1 a 6), stampati in rilievo lungo il perimetro della piastra. Come da protocollo, una cella, corrispondente alla posizione C4, è completamente sprovvista di fondo. Le rimanenti sono dotate di un piccolo foro alla base (5 mm di diametro) che permette un adeguato umettamento della rizosfera per suzione dal sottostante contenitore ricolmo d'acqua, in cui i *kit* vengono alloggiati (*Figura 2b*).



Figura 2. Dettaglio di un *kit* per l'esposizione di germinelli di tabacco: *a)* piastra a sezione rettangolare in polistirene come da brevetto (Lorenzini, 1994), con i due appositi coperchi e *b)* visione d'insieme dei pozzetti identificati da lettere maiuscole in verticale (A, B, C e D) e numeri progressivi in orizzontale (da 1 a 6), opportunamente forati.

I 23 pozzetti sono stati riempiti di terriccio fertilizzato (il medesimo utilizzato per la semina) e in ciascuno di essi, mediante delicate operazioni di selezione e trapianto effettuate da personale esperto, è stato messo a dimora un germinello. Per ogni *kit* da esporre, è stato applicato lo schema riprodotto in *Tabella 1*, che vede collocati complessivamente 16 germinelli di Bel-W3 e sette di Bel-B (quale controllo interno) in pozzetti dedicati; in dettaglio: A1, A2, A4, A5, A6, B1, B2, B5, B6, C1, C3, C6, D2, D3, D4 e D5 per la cultivar O₃-sensibile; A3, B3, B4, C2, C5, D1 e D6 per quella resistente.

Tabella 1. Disposizione dei germinelli di tabacco delle cvv. Bel-W3, O₃-sensibile (simbolo: S), e Bel-B, O₃-resistente (simbolo: R) nel *kit*. Il simbolo O indica il pozzetto sprovvisto di base.

	1	2	3	4	5	6
A	S	S	R	S	S	S
B	S	S	R	R	S	S
C	S	R	S	O	R	S
D	R	S	S	S	S	R

Per consentire l'adattamento post-trapianto e allo stesso tempo il pieno raggiungimento dello stadio vegetativo idoneo (cotiledoni ben distesi e lunghezza della prima foglia di circa 1 cm), i *kit* allestiti come sopra, sono stati mantenuti per ulteriori 4-5 giorni a temperatura e fotoperiodo naturale in idonei *box* in *plexiglass* (*Figura 3a*), rigorosamente ventilati con aria O₃-esente immessa da un sistema forzato di filtraggio a carboni attivi dislocati all'interno dell'infrastruttura della serra (*Figura 3b*).

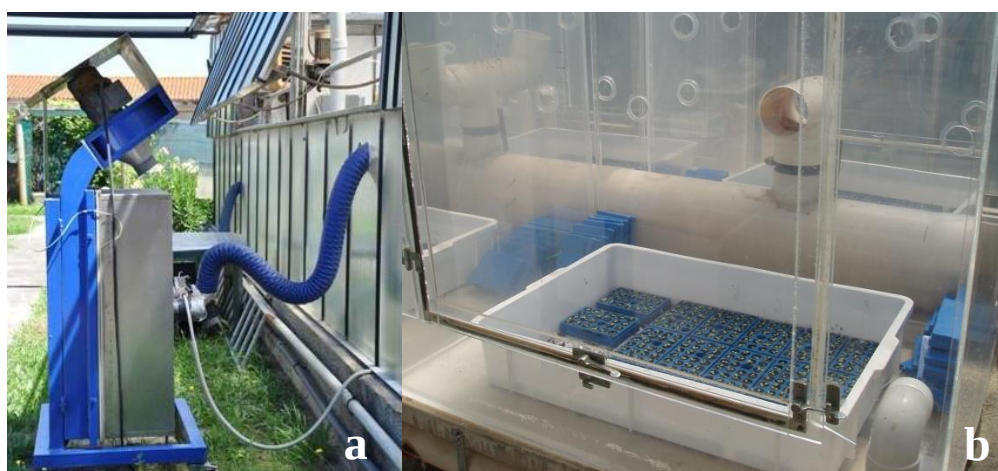


Figura 3. Adattamento e crescita dei germinelli in idonei ambienti presso le serre del DiSAAA-a dell'Università di Pisa: *a)* sistema di filtraggio di aria a carbone attivo e *b)* *box* in *plexiglass* ad aria filtrata contenente *kit* allestiti in fase di post-trapianto.

Le plantule sono state sottoposte a regime idrico ottimale (irrigazione per infiltrazione basale mediante riempimento del sottovaso) e non hanno richiesto alcuna nutrizione integrativa, essendo

stato il terriccio impiegato adeguatamente fertilizzato. Tutte le pratiche colturali descritte sono state condotte ogni settimana nel corso dell'intero periodo di biomonitoraggio suddiviso in 4 cicli espositivi di 7 giorni ciascuno, condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025. Complessivamente, sono stati allestiti 12 *kit* a settimana e 48 per l'intera campagna di biomonitoraggio. In ogni ciclo almeno 3 *kit* ulteriori sono stati lasciati nei *box* ad aria filtrata, presso le strutture del DiSAAA-a, quale controllo negativo; altrettanti in aria ambiente, all'esterno del medesimo, quale controllo positivo.

1.2. Esposizione dei bioindicatori

Secondo quanto stabilito dalla D. Lgs.vo 155/2010, (Attuazione della Direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa) ai fini della valutazione della qualità dell'aria, l'intero territorio nazionale è stato suddiviso in zone e agglomerati. La "zonizzazione" è infatti il presupposto su cui si organizza l'attività di valutazione della qualità dell'aria ambiente che deve essere condotta utilizzando determinate tecniche stabilite dalle norme; essa si considera idonea a rappresentare la qualità dell'aria all'interno dell'intera zona o dell'intero agglomerato. La zonizzazione del territorio della Regione Abruzzo prevista dal D. Lgs.vo 155/2010 è stata approvata nel dicembre 2015 con Delibera di Giunta regionale n. 1030 del 15 dicembre 2015. Essa prevede un "Agglomerato Chieti- Pescara" (Codice Europeo IT1305) la cui area si estende nel territorio delle due province ed include i sei Comuni di Chieti, Pescara, Montesilvano, Spoltore, San Giovanni Teatino e Francavilla al mare per una popolazione residente al 2021 di circa 280.000 abitanti e una densità abitativa di oltre 144 abitanti/km².

Il restante territorio abruzzese è stato suddiviso in due zone denominate rispettivamente: "Zona a maggiore pressione antropica" (Cod. IT 1306) (circa 760.000 ab. Comuni di AQ, TE e altri 109, 228 abitanti/km²) e "Zona a minore pressione antropica" (Cod. IT 1307) (circa 238.000 ab, 188 comuni, 33 abitanti/km²). Di seguito viene riportata la cartina della Regione Abruzzo con indicate le posizioni delle stazioni di misurazione. Sono indicate con colorazioni diverse le aree corrispondenti all'Agglomerato Chieti-Pescara (in rosso), alla Zona a maggiore pressione antropica (in azzurro) e a quella a minore pressione antropica (in verde) (*Figura 4*).

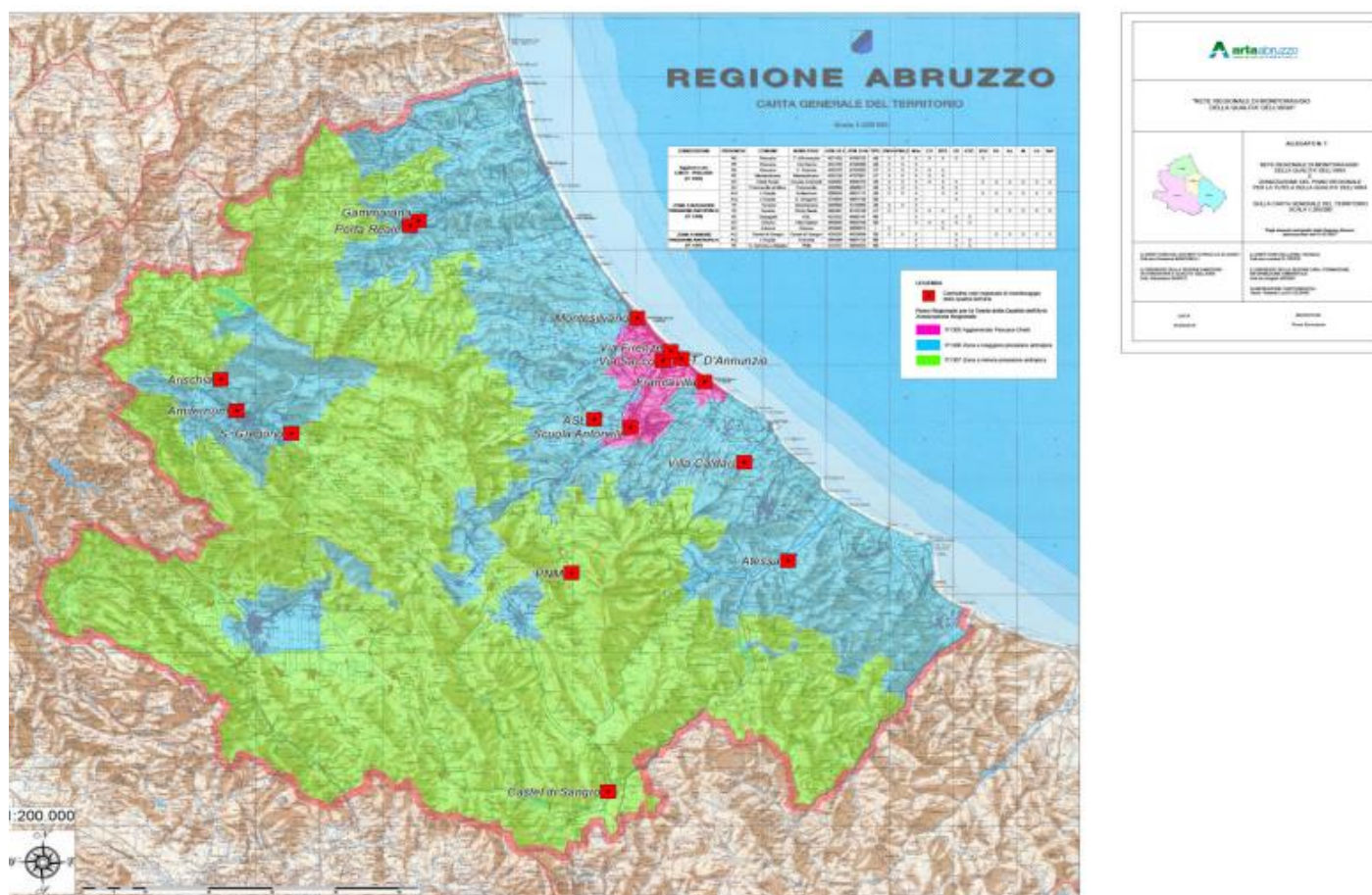


Figura 4. Zonizzazione del territorio ai fini della valutazione della qualità dell'aria adottata dalla Regione Abruzzo fini della protezione della salute

Le 16 stazioni fisse dotate complessivamente di oltre 60 analizzatori automatici in funzione 24 ore su 24, per tutti i giorni dell'anno della Rete regionale sono gestite da A.R.P.A. Abruzzo a seguito di stipula di una Convenzione con la Regione Abruzzo che ha affidato all'Agenzia l'incarico anche della validazione dei dati e della loro pubblicazione (D.G.R. n. 708 del 15/11/2016).

In Italia, la zonizzazione ai fini della protezione della salute è stata adottata da tutte le Regioni e le Province Autonome e presso una selezione delle stazioni di misurazione stabilite ai fini della protezione della salute umana, inoltre è attivo anche il monitoraggio per gli inquinanti rilevanti ai fini della protezione della vegetazione.

I dati raccolti sono oggetto di reporting ai sensi della Decisione 2011/850/UE; tuttavia, non sono state ancora individuate specifiche zone per la protezione della vegetazione e degli ecosistemi da parte degli enti competenti.

La particolare conformazione orografica del nostro paese rende difficile, in molte parti del territorio, rispettare i requisiti di ubicazione su macro-scala previsti dalla Direttiva.

Tuttavia, la collaborazione di ISPRA, ENEA, MASE, Regioni, Province Autonome e Agenzie per la protezione dell'ambiente ha permesso di definire gli indirizzi e pervenire a proposte di zonizzazione ai fini della protezione della vegetazione per la maggior parte del territorio nazionale, che potranno essere sottoposti alla valutazione del Gruppo di lavoro del Coordinamento ex art. 20 del D.lgs. 155/2010 in materia di qualità dell'aria per una possibile adozione da parte delle singole Regioni, viste le difficoltà precedentemente riscontrate per un'adozione a livello sovraregionale. La Regione Abruzzo in collaborazione con l'A.R.P. A ha presentato la proposta di zonizzazione che è stata accettata dal Gruppo di Lavoro del Coordinamento, indicando una "*Zona Unica*" per il monitoraggio della qualità dell'aria per la protezione della vegetazione e degli ecosistemi.

Il Codice della stazione, per la suddetta valutazione, potrebbe essere identificato con il codice Eol IT2168A, considerando che si trova nella zona IT1307 già utilizzata per il monitoraggio della qualità dell'aria per la protezione della salute umana (codice Eol 2163°). La stazione è posizionata nel Parco Nazionale della Maiella a 911 m s.l.m., a circa 1,5 Km dal centro abitato di Sant'Eufemia a Maiella (popolazione residente è di 254 abitanti ed una densità di popolazione di 6,3 abitanti/km²), in un'area di pregio naturalistico posta all'interno dell'area del "Giardino botanico Daniela Brescia" che è stato riconosciuto giardino di interesse Regionale dalla Regione Abruzzo ai sensi della L.R.35/1997. Il giardino è stato progettato offrendo esempi di ricostruzione di alcuni ambienti montani tipici dell'Appennino Centrale; infatti, con una passeggiata nel giardino è possibile percorrere un ideale sentiero che parte dal bosco misto dominato dalle latifoglie, sale all'altezza delle faggete fino a raggiungere gli arbusteti, il pino mugo e le rupi e i ghiaioni d'alta quota con le caratteristiche piante a cuscinetto".

Attualmente, l'O₃ è ritenuto il contaminante gassoso di potenziale maggiore pericolosità per la vegetazione agraria, seminaturale, forestale e per il verde urbano. Esistono i dati sull'osservazioni chimiche dirette ma non sui suoi effetti sulla vegetazione in Abruzzo.

A tal proposito l'ARPA in collaborazione con DiSAAA-a dell'Università di Pisa hanno effettuato, nel territorio Chieti-Pescara durante il periodo estivo tra luglio e agosto 2025, uno studio di biomonitoraggio dell'O₃. Sono state effettuate misure dell'inquinante presso 4 stazioni della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo attraverso l'utilizzo di analizzatori automatici e contemporaneo biomonitoraggio dell'O₃ con l'esposizione dei biosensori germinelli di tabacco dei (cvv. Bel-W3, O₃-sensibile, e Bel-B, O₃-resistente), per verificare se i livelli dell'inquinante sono tali da causare un danno alla vegetazione sensibile. Le stazioni di monitoraggio di S. Eufemia a Maiella, di Cepagatti, Francavilla al Mare e Pescara sono state scelte in quanto rappresentative delle diverse tipologie di zonizzazione della qualità dell'aria, ricoperte rispettivamente da vegetazione forestale, agraria, seminaturale, e da verde urbano e anche perché le

loro ubicazioni hanno permesso un’ottima pianificazione strategica del lavoro, necessario al raggiungimento degli obiettivi stabiliti dallo studio.

In dettaglio, le stazioni di biomonitoraggio (3 fisse ed 1 mobile), sono state contrassegnate da un numero identificativo progressivo (codice) da 1 a 4. Le caratteristiche e gli estremi geografici di ciascuna stazione sono riassunti nella *Tabella 2*.

Tabella 2. Località individuate nell’ambito della rete di rilevamento della qualità dell’aria della Regione Abruzzo in cui sono state predisposte nell’anno 2025 le stazioni di biomonitoraggio per l’esposizione dei bioindicatori di *Nicotiana tabacum* cvv. Bel-W3 e Bel-B.

Stazioni	Comune	Località	Tipo stazione:	Zona:	Altitudine	WGS84 Longitudine Latitudine
1	Cepagatti (PE)	Distretto sanitario ASL di Cepagatti	Fissa-Fondo (Background) Rurale	Maggiore Pressione Antropica	135m (m s.l.m.)	14°04’04.48”E 42°21’29.35”N
2	Francavilla al Mare (CH)	Stadio	Fissa-Fondo (Background) Urbano	Agglomerato Chieti - Pescara	6m (m s.l.m.)	14°16’45.08”E 42°25’17.03”N
3	S. Eufemia a Maiella (PE)	Giardino Botanico “Daniela Brescia”	Fissa-Fondo (Background) Rurale	Minore Pressione Antropica	911m (m s.l.m.)	14°01’44.08”E 42°07’10.99”N
4	Pescara (PE)	ARTA Distretto di Pescara	Mobile- traffico urbano	Agglomerato Chieti- Pescara	3m (m s.l.m.)	14°13’01.98”E 42°27’40.70”N

Nelle *Figure 5,6,7,8* si riporta una visione di ciascuna delle quattro stazioni, fotografate nel corso della campagna. La disposizione spaziale d’insieme è riprodotta dalla mappa restituita in *Figura 9*.



Figura 5. Stazione 1 di biorilevamento predisposte per la campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico individuate nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo: Cepagatti (PE).



Figura 6. Stazione 2 di biorilevamento predisposte per la campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico individuato nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo: Francavilla al Mare (CH).



Figura 7. Stazione 3 di biorilevamento predisposte per la campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico individuate nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo: S. Eufemia a Maiella (PE).



Figura 8. Stazione 4 di biorilevamento predisposte per la campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico individuate nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo: Pescara (Laboratorio mobile).



Figura 9. Mappa riproducente la distribuzione spaziale delle quattro stazioni (contrassegnate da un numero e dal simbolo arancione: ●) individuate nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo.

Per ciascun sito, è stata collocata un'intelaiatura metallica (dimensioni 50×70 cm di lato, 40×55 cm di lato e 50 cm di altezza), totalmente rivestita di rete ombreggiante (fattore di ombreggiamento di 75%), in accordo con il protocollo dell'ANPA (Lorenzini, 1999) e dotata di base superiore o spigolo laterale apribile per l'alloggiamento delle attrezzature necessarie all'esposizione (*Figura 10*).



Figura 10. Esempio del materiale necessario per l'allestimento delle stazioni di rilevamento di bioindicazione dell'ozono.

Quest'ultime consistevano nel complesso in materiali atti a riproporre un sistema di contenitori a *reservoir* in cui collocare i *kit*: i) un contenitore in polistirolo a sezione rettangolare (37×52 cm di lato; 18 cm di altezza) da riempire per circa 2/3 di acqua idonea all'umettamento delle piante, opportunamente forato da un lato poco al di sotto del bordo, al fine di assicurare un adeguato smaltimento dell'eventuale *surplus* idrico accumulabile in caso di pioggia o eccessivo rabbocco e ii) una struttura galleggiante da adagiare sul pelo libero, atta a ospitare un *set* di 3 *kit* di germinelli di biosensori (*Figura 11*).

In funzione della tipologia dell'area occupata (ad esempio, pieno suolo o sovrastruttura, pavimentazione di un fabbricato o asfalto), essa è stata assicurata al piano d'appoggio, mediante chiodi o pesi, disposti ai quattro angoli o lungo due lati.

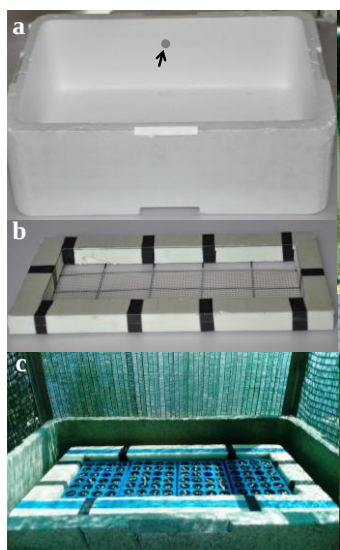


Figura 11. Attrezzature riproducenti un sistema a reservoir in cui collocare i kit da esporre: a) contenitore in polistirolo a sezione rettangolare (37×52 cm di lato; 18 cm di altezza) da riempire per circa 2/3 di acqua, fornito di opportuno foro di drenaggio; b) struttura galleggiante; c) set di 3 kit di germinelli di biosensori adagiati sul pelo libero dell'acqua.

Come già ricordato, la campagna di biomonitoraggio ha compreso 4 cicli espositivi di sette giorni ciascuno, condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025. Il primo giorno di avvio della campagna è stato considerato il tempo 0 della medesima. Per ogni stazione e intervallo di esposizione è stato collocato un set di 3 *kit* contenenti ciascuno germinelli di tabacco di circa 15 giorni di età, di cui 16 della cv. Bel-W3 e 7 della cv. Bel-B. Il programma cronologico seguito è riprodotto in dettaglio nella *Tabella 3*.

Tabella 3. Piano cronologico dei sopralluoghi effettuati dal personale A.R.P.A Abruzzo per la collocazione e il ritiro dei kit presso le stazioni di biorilevamento nel corso della campagna di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, condotto dal 9 luglio al 5 agosto 2025

Data	Oggetto del sopralluogo
9 luglio	allestimento delle stazioni di biorilevamento e collocazione I <i>set</i> espositivo di bioindicatori
15 luglio	ritiro I <i>set</i> espositivo
16 luglio	collocazione II <i>set</i> espositivo
22 luglio	ritiro II <i>set</i> espositivo
23 luglio	collocazione III <i>set</i> espositivo
29 luglio	ritiro III <i>set</i> espositivo
30 luglio	collocazione IV <i>set</i> espositivo
5 agosto	ritiro IV <i>set</i> espositivo e smantellamento delle attrezzature

La collocazione *in situ* dei bioindicatori all'inizio di ogni periodo espositivo e il successivo ritiro alla fine dello stesso con le relative mansioni (svuotamento e riempimento del contenitore d'acqua), sono state accuratamente eseguite (in modo alterno ogni martedì eccetto nel caso del I ciclo espositivo) e documentate con fotocamera dal personale tecnico di A.R.P.A., che nel contempo ha provveduto, al momento della messa *in situ* dei kit, alla compilazione di una scheda appositamente predisposta (Figura 12), volta alla registrazione delle sigle identificative dei singoli individui collocati e all'annotazione delle condizioni generali della stazione e del materiale vegetale trasportato.

SETTIMANA N°: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Data: 2025
(giorno di collocazione-inizio esposizione)

STAZIONE: n. UCP: UCS: Comune: Data: 2025
(giorno del ritiro)

a) Condizioni meteorologiche locali al momento dell'esposizione:

b) Note sullo stato generale della stazione:

d) Numero e stato fitosanitario generale di ciascun Kit di germinelli di tabacco Bel-W3:

N° Kit: Kit in buone condizioni, idoneo all'esposizione: SI NO

Note sul Kit alla collocazione:

Note sul Kit al ritiro:

N° Kit: Kit in buone condizioni, idoneo all'esposizione: SI NO

Note sul Kit alla collocazione:

Note sul Kit al ritiro:

N° Kit: Kit in buone condizioni, idoneo all'esposizione: SI NO

Note sul Kit alla collocazione:

Note sul Kit al ritiro:

NOTE VARIE:

Figura 12. Scheda compilata dal personale dell'A.R.P.A. della Regione Abruzzo nei sopralluoghi effettuati per la collocazione e il ritiro dei kit presso le stazioni di biorilevamento nel corso della campagna di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, condotto dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

1.3. Stima ed esito delle risposte biologiche

In accordo con il protocollo ANPA (Lorenzini, 1999), il biomonitoraggio attivo dell'O₃ permette di correlare i livelli raggiunti da questo fotoinquinante nella troposfera con l'intensità dei sintomi fogliari che si manifestano sui germinelli della cv. Bel-W3 di tabacco O₃-sensibile. Il danno consiste in aree necrotiche tondeggianti del diametro di alcuni millimetri (*weather fleck*) localizzate a livello internervale su entrambe le superfici laminari di cotiledoni e foglie, con alterazione cromatica virante progressivamente nel tempo, dal grigio al bianco-avorio.

Ad ogni inizio ciclo, tutti i germinelli a dimora si presentavano idonei all'esposizione e privi di qualsiasi alterazione o sintomi manifesti. Inoltre, nel corso delle operazioni di trasporto (dalle strutture del DiSAAA-a a ciascuna delle stazioni di biorilevamento e viceversa), allo scopo di garantire un ambiente umido e buio sufficiente a preservare il materiale vegetale evitando scambi gassosi con aria-ambiente di altro sito, ogni *kit* è stato opportunamente chiuso e protetto con i rispettivi coperchi (inferiore e superiore). Al rientro in sede al termine del ciclo espositivo, si è proceduto alle operazioni di stima consistenti nel verificare e quantificare su ciascun germinello della cv. Bel-W3, la presenza dei tipici sintomi riconducibili all'inquinante. In proposito nelle *Figura 13*, sono riportate a titolo di esempio le immagini di un *kit in situ* a inizio e fine esposizione, scattate *in loco* dagli operatori addetti di A.R.P.A. Abruzzo e lo stesso acquisito in formato elettronico: sono evidenti i sintomi da O₃.

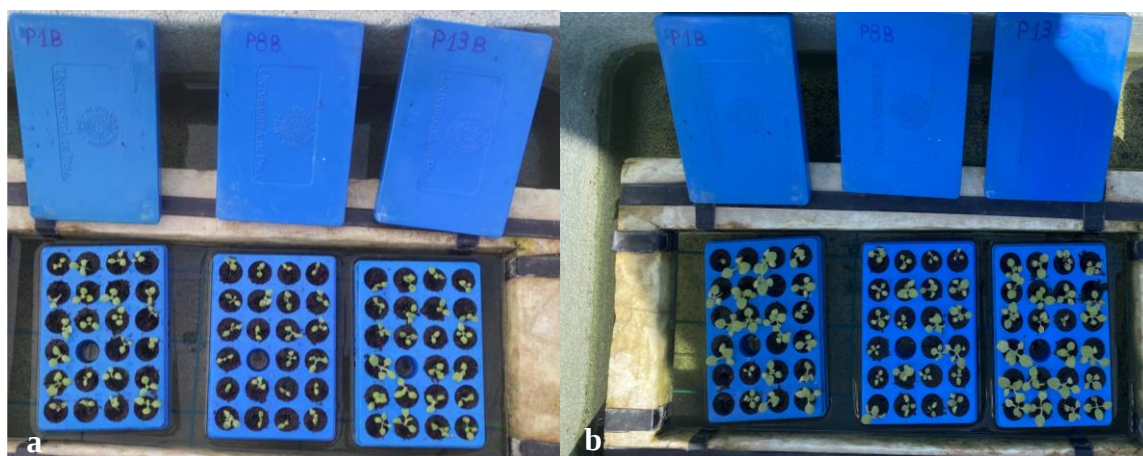


Figura 13. Aspetto generale dei germinelli di tabacco di un set di *kit* esposti: a) all'inizio e b) alla fine di uno dei quattro cicli di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, condotto dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

Nella *Figura 14*, sono mostrati, a titolo esemplificativo, germinelli di *N. tabacum* manifestanti o meno i sintomi tipici da esposizione a O_3 a fine ciclo, rilevati nel corso di questa campagna. È emblematico il confronto tra individui della stessa cv. Bel-W3 O_3 -sensibile cresciuti in presenza o meno dell'inquinante, rivelandosi altamente o affatto sintomatici i primi rispetto ai secondi.



Figura 14. Esempio di germinelli di *Nicotiana tabacum* senza e con sintomi tipici da esposizione di ozono, rilevati nel corso della campagna di biomonitoraggio 2025 dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo

I danni, come da protocollo ANPA (Lorenzini, 1999), sono stati stimati sulle prime tre lamine fogliari prodotte dalla pianta (i due cotiledoni e la prima foglia vera) della cv. O_3 -sensibile, con l'ausilio di una lente di ingrandimento e di materiale iconografico *standard* di comparazione, discernendo quelli cagionati da avversità di altra origine. In dettaglio, in base all'entità di danno fogliare mostrato, ciascuna lamina è stata classificata in termini di estensione dell'area alterata interessata con l'attribuzione di un punteggio da 0 a 4 ["Indice di Danno" (ID)]. Il valore 0 rappresenta assenza di alterazione imputabile all' O_3 e i valori da 1 a 4 corrispondono a manifestazioni sintomatiche (causate dalla presenza dell'inquinante) di intensità variabile, definite nell'ambito di un *range* percentuale di superficie danneggiata: 1 = bassa ($> 0 \div 10\%$); 2 = media ($> 10 \div 25\%$); 3 = alta ($> 25 \div 50\%$) e 4 = molto alta ($> 50\%$). Sono state eliminate dal computo, lamine poco sviluppate o, al contrario, in avanzato stato di senescenza e/o eccessivamente compromesse per cause di dubbia attribuzione. Sono state escluse dal conteggio le foglie effettivamente mancanti. Proprio perché fondate su basi soggettive, le valutazioni dei sintomi fogliari sono state condotte dai medesimi operatori e nelle stesse condizioni luminose, al fine di garantire un costante e unico metro di misura oltre che la ripetibilità anche dell'eventuale errore. Gli indici assegnati a ciascun cotiledone (contraddistinti indifferentemente come foglia cotiledonare *a* e *b*) e alla prima foglia, nel corso della valutazione, sono stati riportati dagli operatori su apposite schede di rilievo.

I dati raccolti sono stati successivamente immessi in fogli elettronici per la creazione del relativo “database”. Per ciascun *kit* esaminato, sono stati preventivamente calcolati i valori medi degli Indici di Danno attribuiti ai cotiledoni (Indici di Danno Cotiledonare, IDC) e quelli assegnati alla prima foglia vera (Indici di Danno Fogliare, IDF) adattando la formula (Ashmore *et al.*, 1980):

$$\text{IDC e IDF} = \sum_{n=1}^N (D_t - D_{t-1})/N$$

dove: n = numero progressivo della lamina fogliare (cotiledone o prima foglia vera) di ciascun germinello; N = numero totale di cotiledoni e foglie di ogni *kit*; D_t = danno cotiledonare e fogliare alla fine del periodo espositivo; D_{t-1} = danno cotiledonare e fogliare all’inizio del periodo espositivo (pari a 0 in assenza di danno).

Per entrambi i cicli espositivi, nessuna differenza significativa è stata osservata tra i valori di danno assegnati dagli studenti e dal personale del DiSAAA-a (*Figura 15*). Gli IDC e gli IDF medi restituiti sono stati a loro volta correlati e l’esito positivo di tale elaborazione (*Figura 16*), con coefficiente di *Pearson r* pari a 0,76 ($P < 0,001$), ha reso possibile l’uso indistinto di tutte le lamine quali unità statistiche di base e il computo dei valori di danno stimato in termini generali di Indici di Danno Cotiledonare e Fogliare (IDC e F) consentendo la : i) loro organizzazione per le successive elaborazioni in forma di matrici di grandi dimensioni, sia per ciascuna stazione che per l’intera area monitorata, nel corso del singolo ciclo e dell’intero periodo espositivo e ii) restituzione di dati in termini di Indice di Danno complessivo (IDC+F). Il pregio e l’innovazione di tale metodologia risiede in effetti nella possibilità di concentrare un collettivo d’indagine relativamente cospicuo in una minima superficie, da poter replicare spazialmente in più punti.

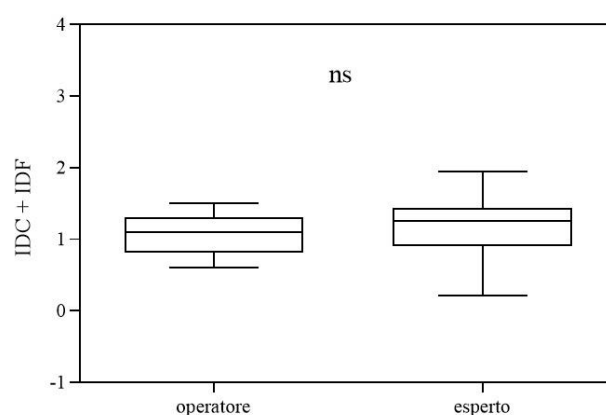


Figura 15. Indici di Danno Cotiledonari (IDC) e Indici di Danno Fogliare (IDF) di germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 attribuiti alle foglie cotiledonari ed alla prima foglia vera dall’operatore A.R.P.A. Abruzzo e dal personale del DiSAAA-a al termine dell’intero periodo espositivo (9 luglio - 5 agosto 2025). Per ogni valutazione dei sintomi fogliari, la linea superiore rappresenta il 95° percentile; il *box* individua, il 75°, il 50° (mediana) e il 25° percentile. È stato utilizzato il test parametrico per campioni indipendenti di Student (ns: $P > 0,05$).

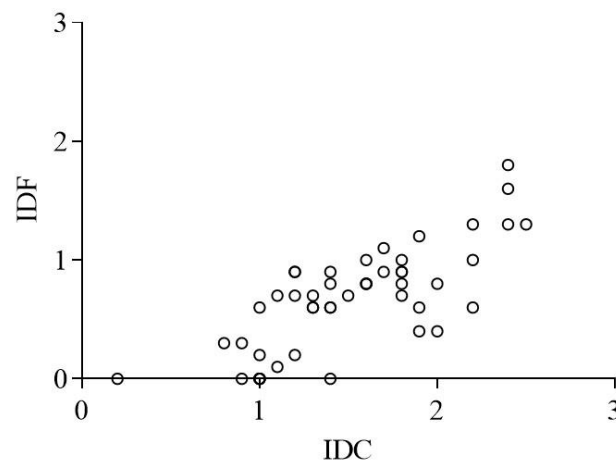


Figura 16. Correlazione tra gli Indici di Danno Cotiledonari (IDC) attribuiti alle foglie cotiledonari e gli Indici di Danno Fogliare (IDF) assegnati alla prima foglia vera (IDF) di germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 dei 48 kit complessivamente esposti a cadenza settimanale nelle quattro stazioni di biorilevamento dal 9 luglio al 5 agosto nel corso della campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo; coefficiente di correlazione di Pearson $r = 0,76$ ($P < 0,001$).

Nella *Figura 17* è mostrata per stazione la distribuzione delle frequenze degli indici di danno complessivo (IDC+IDF) calcolati in ciascun ciclo espositivo e nel periodo complessivo. Considerando che il *trend* con un alto numero di osservazioni può essere assimilato con accettabile approssimazione a un andamento di tendenza normale o *gaussiana*, è stata ritenuta sufficientemente esauriente l'interpretazione del fenomeno in termini di media $\pm$ indici di dispersione e/o stima dell'errore della media e di possibile applicabilità le elaborazioni statistiche di tipo parametrico mediante analisi della varianza (ANOVA).

In dettaglio gli indici di danno complessivo (IDC+IDF) medi sono stati calcolati:

- i) su un totale di 48 germinelli Bel-W3 collocati e, quindi, di 192 lamine fogliari O₃-sensibili esposte, per ognuna delle quattro stazioni in ciascuno dei cicli espositivi (*Tabella 4*);
- ii) su un totale di 192 germinelli Bel-W3 collocati e, quindi, di 768 lamine fogliari O₃-sensibili esposte, per ognuna delle quattro stazioni per l'intero periodo espositivo (4 cicli complessivi; *Tabella 5*);
- iii) su un totale di 192 germinelli Bel-W3 collocati e, quindi, di 768 lamine fogliari O₃-sensibili esposte, per tutta l'area monitorata rappresentata dalle quattro stazioni per ciascuno dei 4 cicli espositivi (*Tabella 6*).

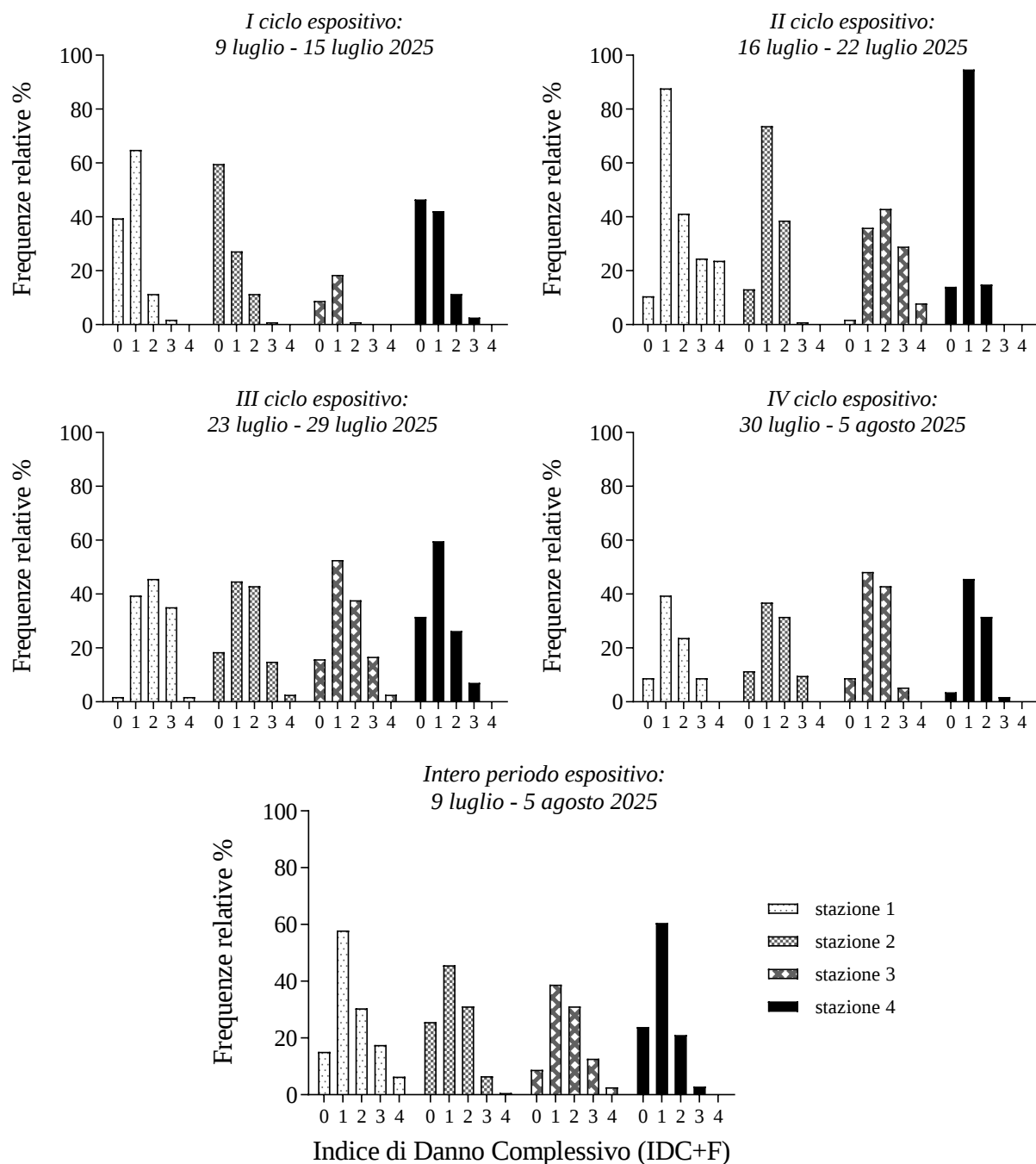


Figura 17. Frequenza relativa degli Indici di Danno Complessivo [ottenuti dalla somma di quelli cotiledonari (IDC, attribuiti alle foglie cotiledonari) e fogliari (IDF, assegnati alla prima foglia vera) di germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 esposti in ciascuna stazione di biorilevamento in ogni ciclo e per l'intero periodo espositivo (dal 9 luglio al 5 agosto 2025) nel corso della campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo.

Tabella 4. Indice di Danno Complessivo (Cotiledonare e Fogliare; IDC+F), espresso come media $\pm$ errore standard della media (*SEM*), restituito da tutte le due foglie cotiledonari (N = 32) e la prima foglia vera (N = 16) di germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 di un set di tre kit collocato in ciascuna delle quattro stazioni di biorilevamento, per ognuno dei 4 cicli espositivi della campagna 2025 di biomonitoraggio (per un totale di 192 lamine fogliari) condotta dal 9 luglio al 5 agosto.

<i>Cicli espositivi</i>	<i>Stazioni</i>	1	2	3	4
9/7-15/7 (I)	IDC+F	0,53	0,71	0,79	0,70
	$\pm SEM$	$\pm 0,069$	$\pm 0,072$	$\pm 0,063$	$\pm 0,049$
16/7-22/7 (II)	IDC+F	1,12	1,01	1,08	2,04
	$\pm SEM$	$\pm 0,059$	$\pm 0,046$	$\pm 0,049$	$\pm 0,090$
23/7-29/7 (III)	IDC+F	1,50	1,07	1,97	1,50
	$\pm SEM$	$\pm 0,091$	$\pm 0,078$	$\pm 0,080$	$\pm 0,088$
30/7-5/8 (IV)	IDC+F	1,44	1,38	1,40	1,43
	$\pm SEM$	$\pm 0,080$	$\pm 0,057$	$\pm 0,077$	$\pm 0,067$

Tabella 5. Indice di Danno Complessivo (Cotiledonare e Fogliare; IDC+F), espresso come media $\pm$ errore standard della media (*SEM*), restituito da tutte le due foglie cotiledonari (N = 32) e la prima foglia vera (N = 16) di germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 dei tre kit cadauno, collocati in ciascuna delle quattro stazioni di biorilevamento, nei 4 cicli espositivi dell'intero periodo della campagna 2025 di biomonitoraggio (per un totale di 768 lamine fogliari) condotta dal 9 luglio al 5 agosto.

<i>Stazioni</i>	IDC+F	$\pm SEM$
1	1,17	$\pm 0,041$
2	0,87	$\pm 0,035$
3	1,31	$\pm 0,047$
4	1,27	$\pm 0,058$

Tabella 6. Indice di Danno Complessivo (Cotiledonare e Fogliare; IDC+F), espresso come media $\pm$ errore standard della media (*SEM*), restituito da tutte le due foglie cotiledonari (N = 32) e la prima foglia vera (N = 16) di germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 dei tre kit cadauno, collocati complessivamente in tutte le quattro stazioni di biorilevamento, per ognuno dei 4 cicli espositivi della campagna 2025 di biomonitoraggio (per un totale di 768 lamine fogliari) condotta dal 9 luglio al 5 agosto.

<i>Cicli espositivi</i>	IDC+F	$\pm SEM$
09/7-15/7 (I)	0,68	$\pm 0,056$
16/7-22/7 (II)	1,33	$\pm 0,053$
23/7-29/7 (III)	1,51	$\pm 0,074$
30/7-5/8 (IV)	1,41	$\pm 0,062$

I valori di IDC+F calcolati per singola stazione per ciascuno dei 4 cicli espositivi e per l'intero periodo espositivo (9 luglio – 5 agosto) sono stati analizzati mediante ANOVA a una via (*post-test* Bonferroni) e riprodotti in forma di istogrammi in *Figura 18 e 19*.

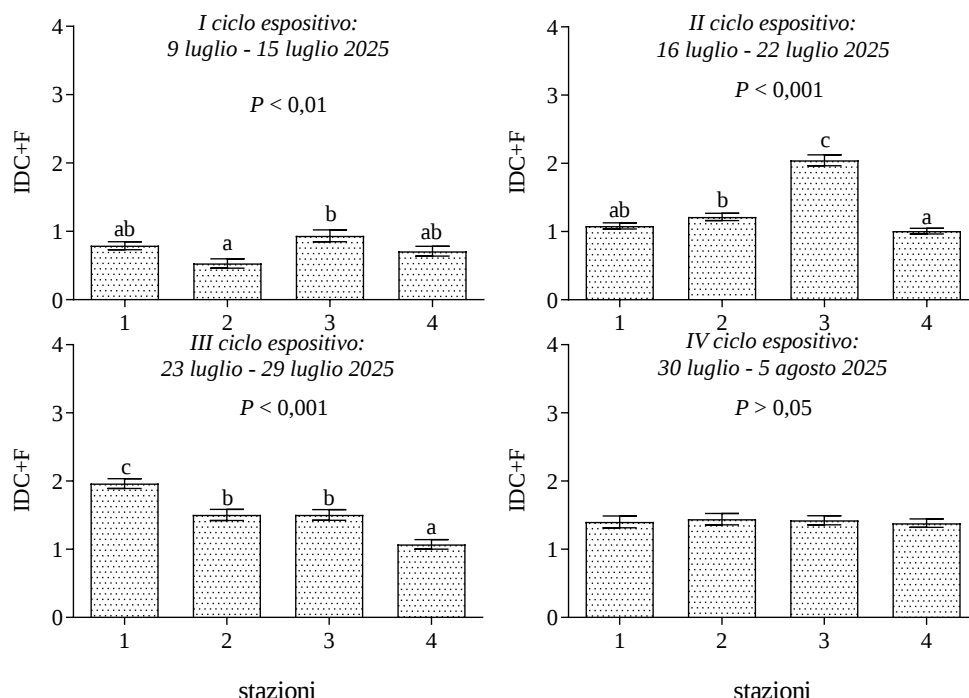


Figura 18. Istogrammi degli Indici di Danno Complessivo (Cotiledonare e Fogliare; IDC+F), espressi come media $\pm$ errore *standard* della media (*SEM*), calcolati per singola stazione e per ciascuno dei 4 cicli espositivi, rilevati su germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 nell'intero periodo espositivo della campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo. Analisi statistica mediante ANOVA a una via seguita da *test* di Bonferroni; a lettere diverse corrispondono differenze statisticamente significative ($P < 0,05$).

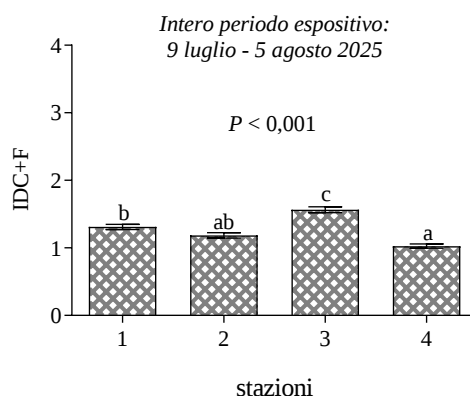


Figura 19. Istogrammi degli Indici di Danno Complessivo (Cotiledonare e Fogliare; IDC+F), espressi come media $\pm$ errore *standard* della media (*SEM*), calcolati per singola stazione per l'intero periodo espositivo (9 luglio – 5 agosto), rilevati su germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 nell'intero periodo espositivo della campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo. Analisi statistica mediante ANOVA a una via seguita da *test* di Bonferroni; a lettere diverse corrispondono differenze statisticamente significative ($P < 0,001$).

Inoltre, è stato riprodotto, sempre in forma di istogrammi e analizzato mediante ANOVA a una via (*post-test* Bonferroni), l'andamento temporale degli IDC+F nel corso dei 4 cicli espositivi per ogni singola stazione e per tutta l'area monitorata (*Figure 20 e 21*). Da quanto si evince dalle tabelle e figure sopra riportate, la situazione emersa individua come valori di IDC+F inferiori quelli restituiti dal I ciclo espositivo ($0,68 \pm 0,056$; restituzione numerica di tutte le due foglie cotiledonari e della prima foglia vera dei *set* complessivi collocati in ciascuna delle quattro stazioni di biorilevamento). I valori consistentemente maggiori sono stati invece rilevati nel III e nel IV ciclo espositivo nelle stazioni ($1,51 \pm 0,074$ e $1,41 \pm 0,062$, rispettivamente), coincidenti altresì con periodi favorenti la formazione dell'inquinante. Tali livelli, comunque, per quanto più elevati si sono sempre attestati mediamente intorno alla soglia del valore 2. Nel restante ciclo espositivo (II), gli indici hanno mostrato alta similarità, mantenendosi su valori relativamente contenuti ($1,33 \pm 0,053$), traducibili in un'incidenza del danno di tipo medio-bassa, seppur quasi uniformemente diffusa. Le medie di IDC+F restituite in effetti per stazione (il più dei casi anche a livello di *kit*), nel corso dei singoli cicli, sono risultate variabili e scarsamente discernibili tra i punti dell'areale monitorato e, l'eventuale differenza in termini di significatività statistica, è emersa solo a livello centesimale e grazie alla cospicua numerosità campionaria.

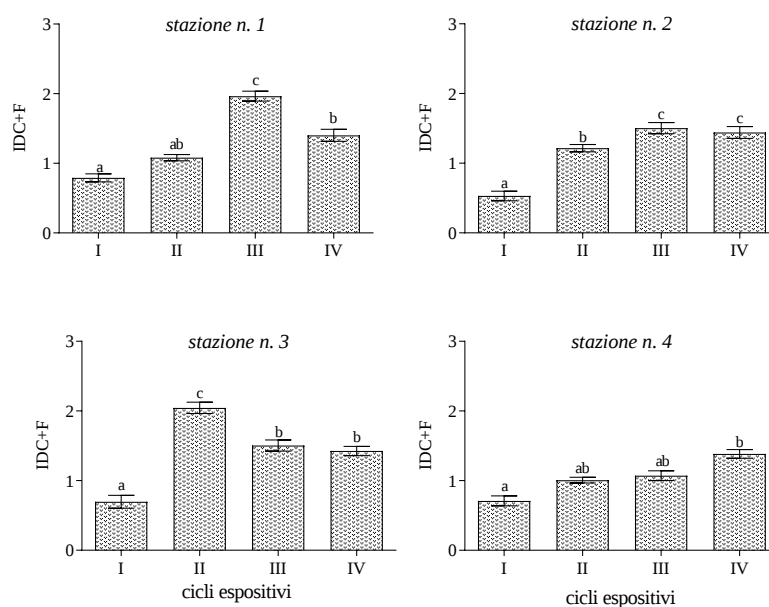


Figura 20. Evoluzione degli Indici di Danno Cotiledonare e Fogliare (IDC+F), espressi come media $\pm$ errore *standard* della media (SEM), rilevati su germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 in ciascuna stazione di biorilevamento nei 4 cicli espositivi dal 9 luglio al 5 agosto, nel corso della campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo. Analisi mediante ANOVA a una via seguita da *test* di Bonferroni; a lettere diverse corrispondono differenze statisticamente significative ($P < 0,001$).

Complessivamente comunque, l'andamento spaziale degli indici di danno rilevati nell'intero periodo espositivo individua una scala progressiva di incidenza con livelli significativamente minori nei siti corrispondenti alle stazioni n. 1 e 2 ($1,17 \pm 0,041$ e $0,87 \pm 0,035$, rispettivamente; restituzione numerica di tutte le due foglie cotiledonari e della prima foglia vera dei 3 set complessivi collocati in ciascuna delle quattro stazioni di biorilevamento durante l'intero periodo di monitoraggio) rispetto a quelli ottenuti nell'area delle stazioni n. 3 e 4 ($1,31 \pm 0,047$ e $1,27 \pm 0,058$).

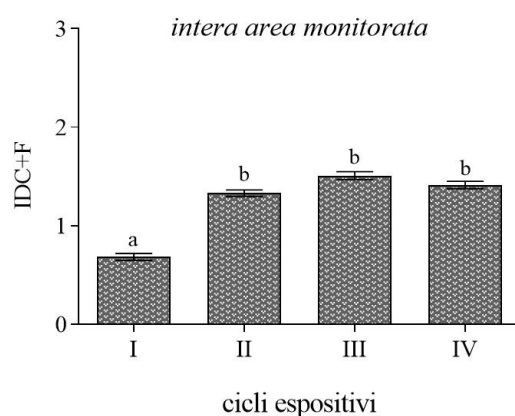


Figura 21. Evoluzione degli Indici di Danno Cotiledonare e Fogliare (IDC+F), espressi come media $\pm$ errore standard della media (SEM), rilevati su germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 nell'intera area monitorata nei 4 cicli espositivi dal 9 luglio al 5 agosto, nel corso della campagna 2025 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo. Analisi mediante ANOVA a una via seguita da *test* di Bonferroni; a lettere diverse corrispondono differenze statisticamente significative ($P < 0,001$).

1.4. Scostamenti dal protocollo ANPA

In *Tabella 7* sono sintetizzate le differenze (già segnalate nei paragrafi precedenti) nella metodologia attuata rispetto a quella riportata nel protocollo ANPA (Lorenzini, 1999). Nelle note a piè di pagina sono indicate le motivazioni che giustificano le modifiche apportate.

Tabella 7. Analogie/differenze tra protocollo ANPA (Lorenzini, 1999) e nel corso della campagna 2025 di biomonitoraggio nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo.

Protocollo ANPA		Campagna di biomonitoraggio dell'ozono
Metodo di coltura	Materiale vegetale	=
	Contenitore e mezzo di coltura	=
	Semina	=
	Preparazione del <i>kit</i>	≠ ¹
	Trapianto	=
	Configurazione della piastra	≠ ²
	Condizioni di allevamento	=
Esposizione all'aria ambiente nelle stazioni di rilevamento	Esposizione all'aria ambiente	=
	Stazione-tipo	=
	Posizionamento dei <i>kit</i> all'interno della stazione	=
	Sostituzione dei <i>kit</i>	=
Rilievi	Addestramento del personale	≠ ³
	Identificazione dei sintomi	=
	Valutazione dei sintomi	=
	Scheda di rilievo	=
	Calcolo dell'Indice di Danno Cotiledonare e Fogliare (IDC e IDF)	≠ ⁴

¹ Allo scopo di garantire un autoapprovvigionamento idrico adeguato alle condizioni meteo-climatiche, i *kit* sono stati alloggiati in un contenitore di polistirolo a sezione rettangolare (37×52 cm di lato; 18 cm di altezza), riempito per circa 2/3 di acqua e opportunamente forato da un lato poco al di sotto del bordo, al fine di assicurare un adeguato smaltimento di un eventuale *surplus* idrico, accumulabile in caso di pioggia o eccessivo rabbocco. L'uso della bottiglia in plastica da 500 ml (come riportato dal protocollo ANPA) non avrebbe garantito un'idonea quantità di acqua. Bottiglie di capacità maggiore causavano il capovolgimento del *kit*.

² La disposizione dei germinelli di tabacco delle cvv. Bel-W3 e Bel-B è stata modificata rispetto a quella riportata dal protocollo ANPA, in quanto sono state utilizzate le piastre a sezione rettangolare (13×9 cm di lato) in polistirene realizzate come da brevetto di Lorenzini (1994). In particolare, in ciascun *kit* i sette germinelli della cv. Bel-B erano collocati nei seguenti pozzetti: A3, B4, B5, C2, C5, D1 e D6.

³ Non è stato effettuato l'addestramento del personale impegnato, poiché questo risultava già esperto secondo le direttive fornite dall'ANPA. È stato, comunque, effettuato un *training* iniziale e in corso d'opera in modo che le valutazioni dei tre operatori risultassero il più possibile allineate.

⁴ I parametri calcolati sono Indice di Danno Cotiledonare (IDC), Indice di Danno Fogliare (IDF) e IDC + F, ottenuti computando le singole lamine per *kit* e per stazione.

2. Parametri meteo-climatici

La misura di parametri meteo-climatici risulta fondamentale per la conoscenza delle dinamiche di dispersione in atmosfera degli inquinanti atmosferici. Mediando i dati di temperatura (in °C), radiazione solare totale (RDST in mW cm^{-1}), umidità relativa (UR in %), pressione atmosferica (in mbar) e velocità del vento (in m s^{-1}) acquisiti a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi per l'intero periodo di biomonitoraggio dal 9 luglio al 5 agosto 2025, sono stati delineati i corrispondenti profili giornalieri medi orari riproducenti il giorno "tipo" di ciascun intervallo considerato nelle 4 centraline meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria. Essi sono riportati nelle *Figure 22-45*. Circa i venti, al profilo "tipo" si è ritenuto delucidativo affiancare la "rosa" omonima riepilogativa delle frequenze percentuali relative con cui essi hanno investito l'area nelle 24 ore. Per ciascuna componente climatica, la piena sovrapponibilità dei profili medi, restituiti dalle 4 settimane, su quelli ricavati per tutto l'arco temporale (dal 9 luglio al 5 agosto 2025) rende pienamente rappresentativi di quest'ultimo i cicli considerati nel loro insieme.

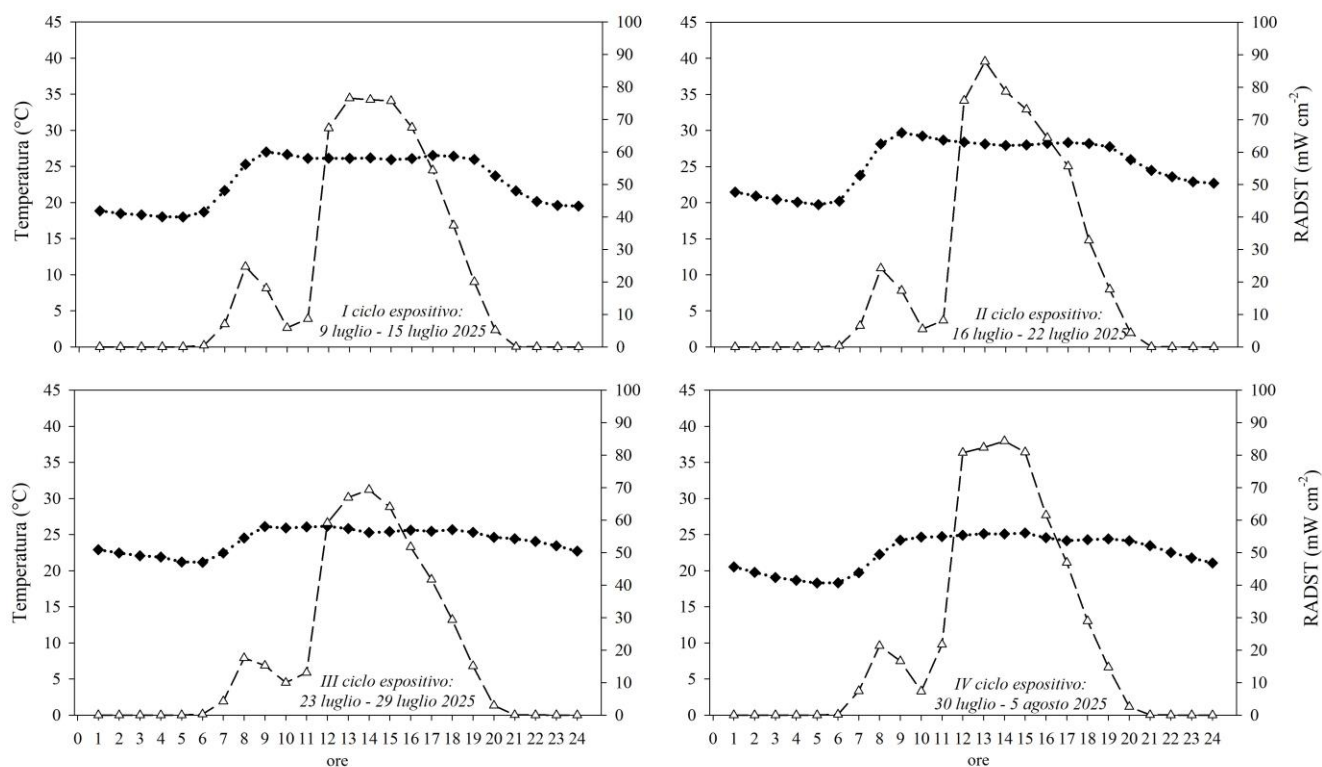


Figura 22. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

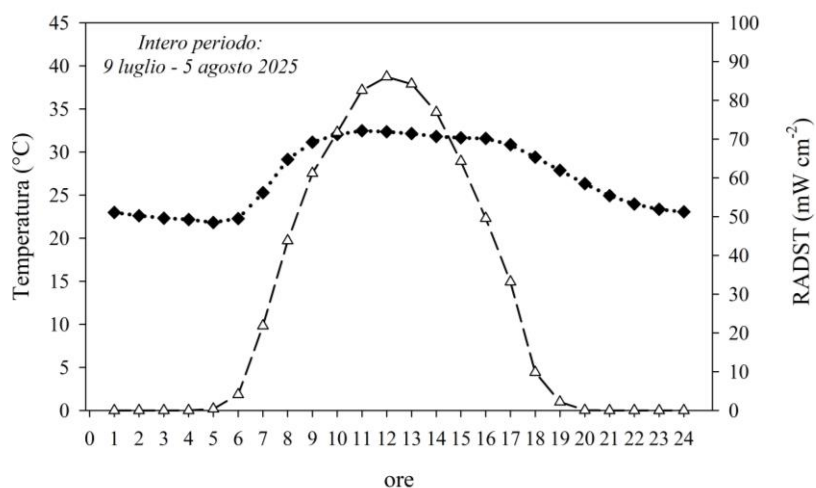


Figura 23. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), per l'intero periodo espositivo, dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

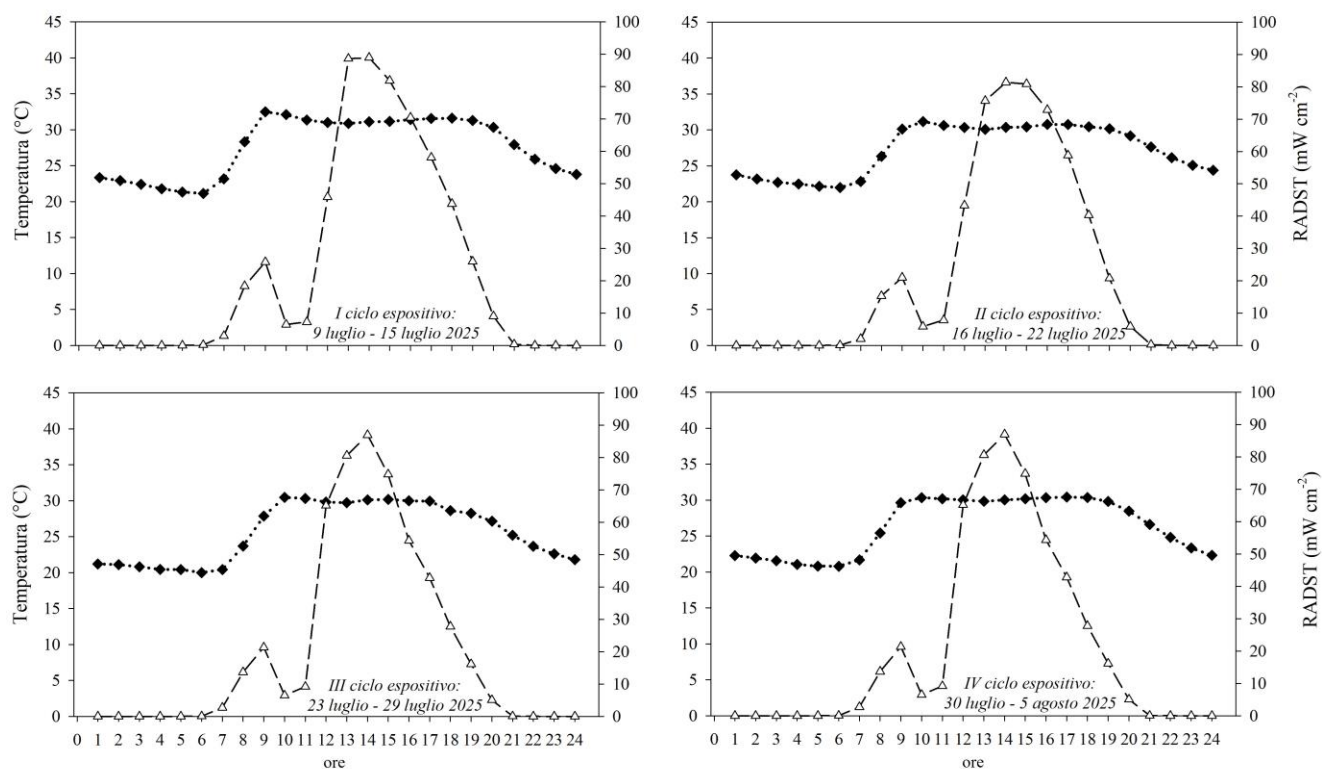


Figura 24. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

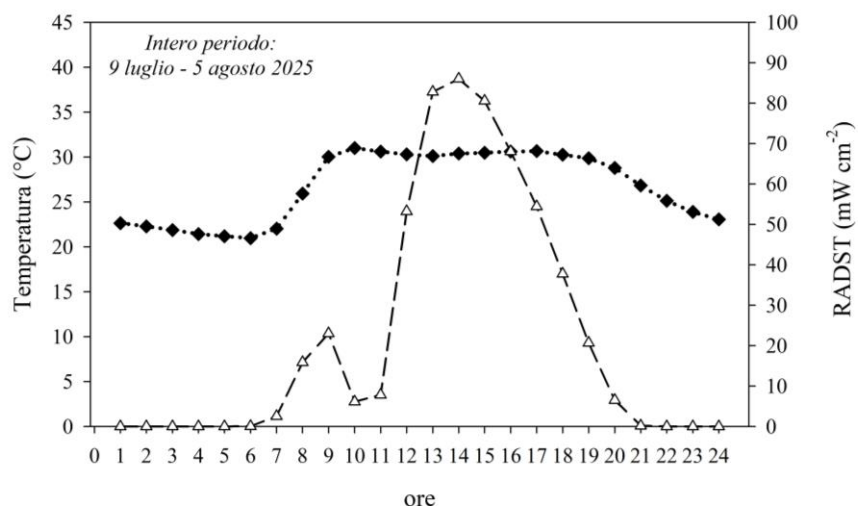


Figura 25. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), per l'intero periodo espositivo, dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

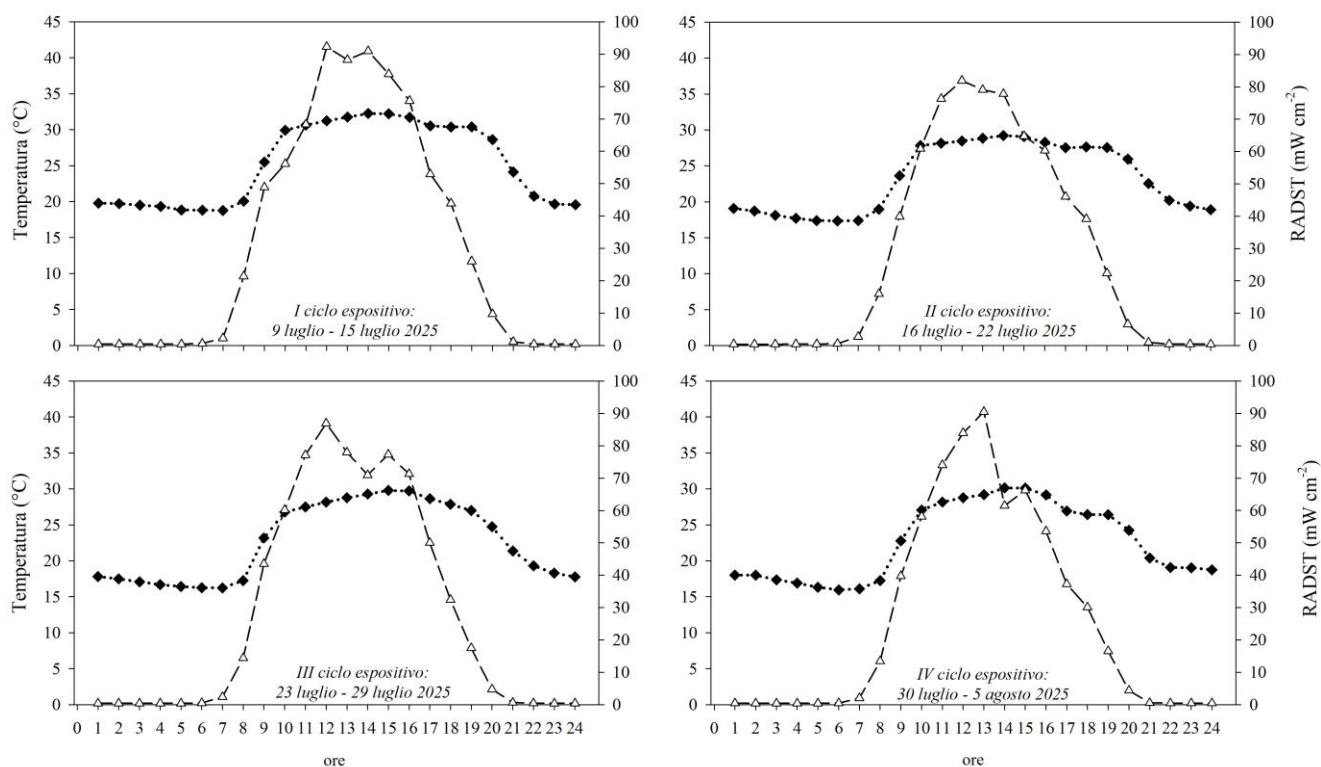


Figura 26. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

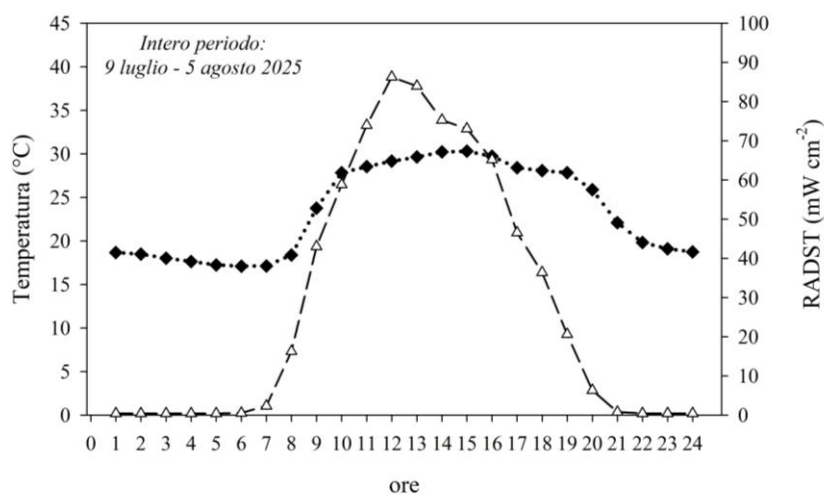


Figura 27. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), per l'intero periodo espositivo, dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

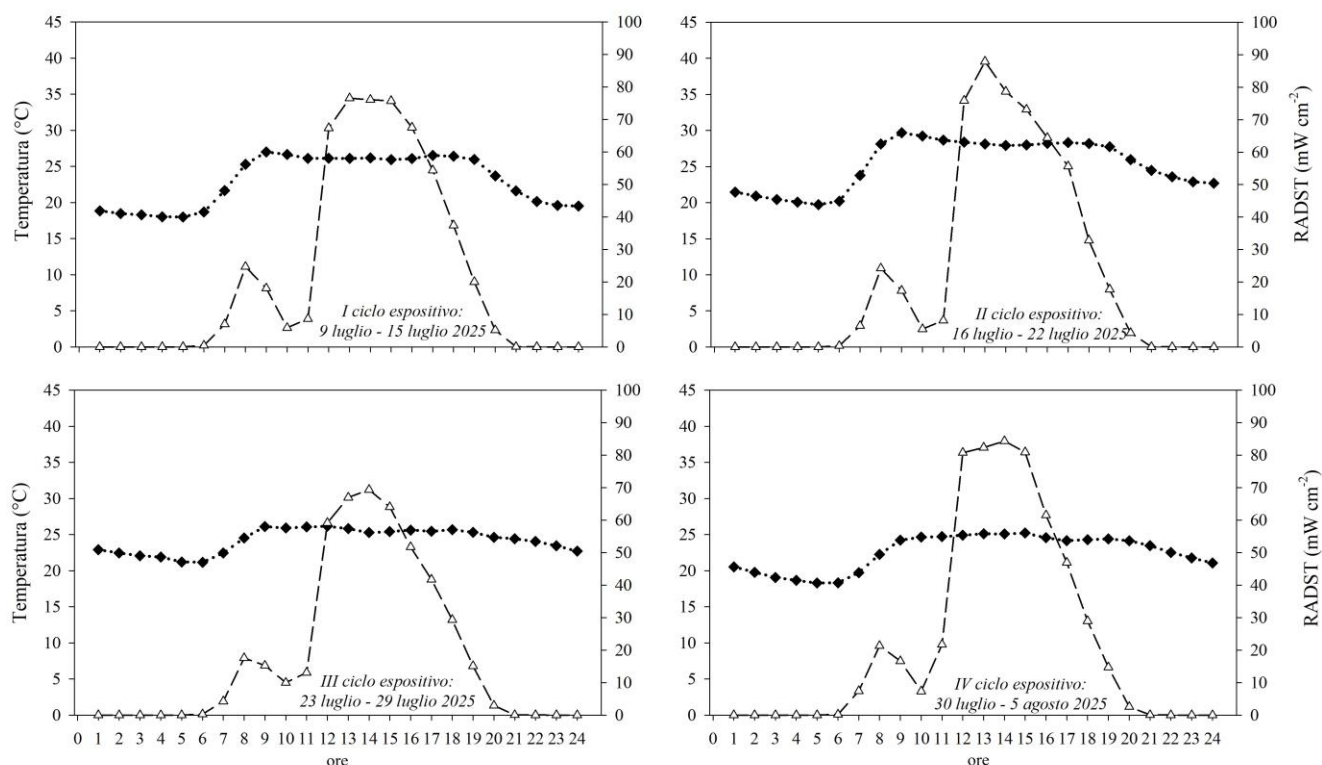


Figura 28. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

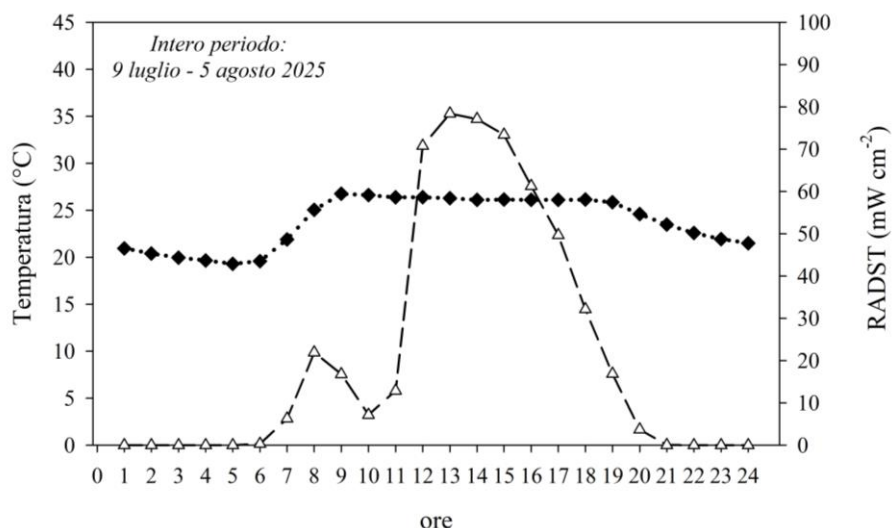


Figura 29. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), per l'intero periodo espositivo, dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

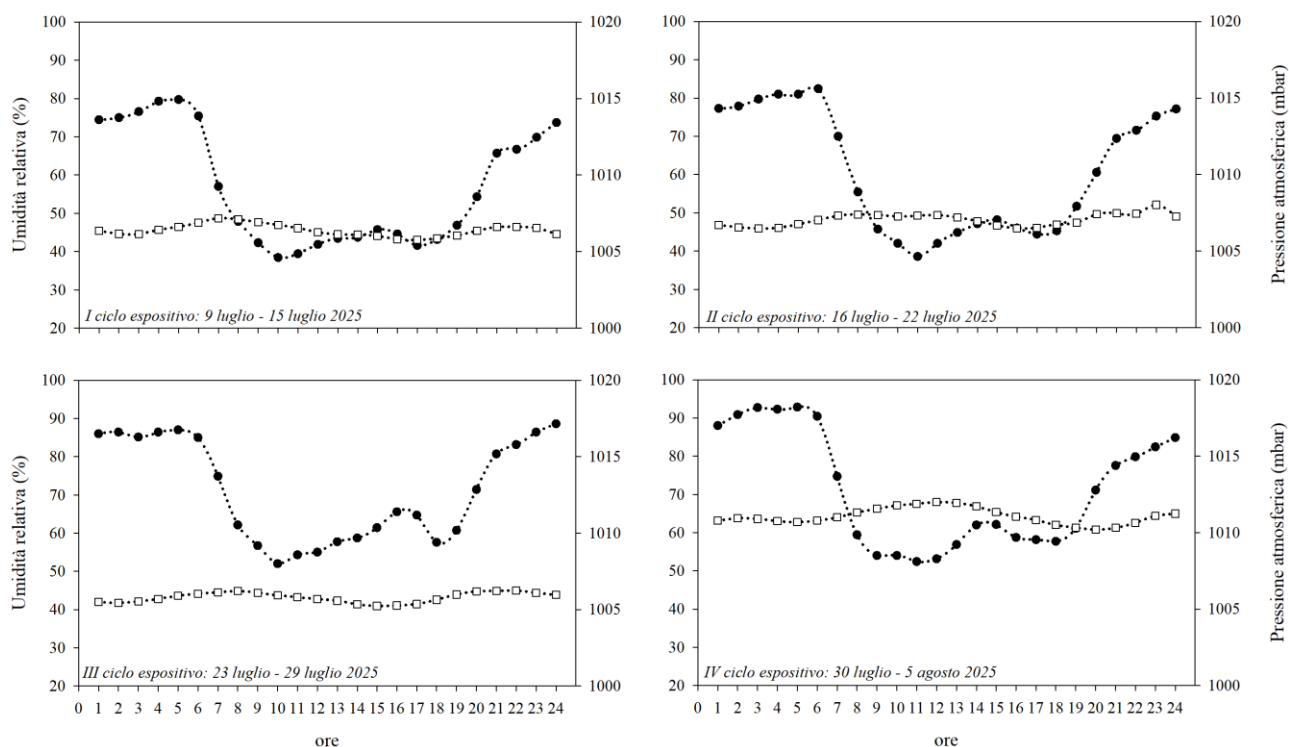


Figura 30. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

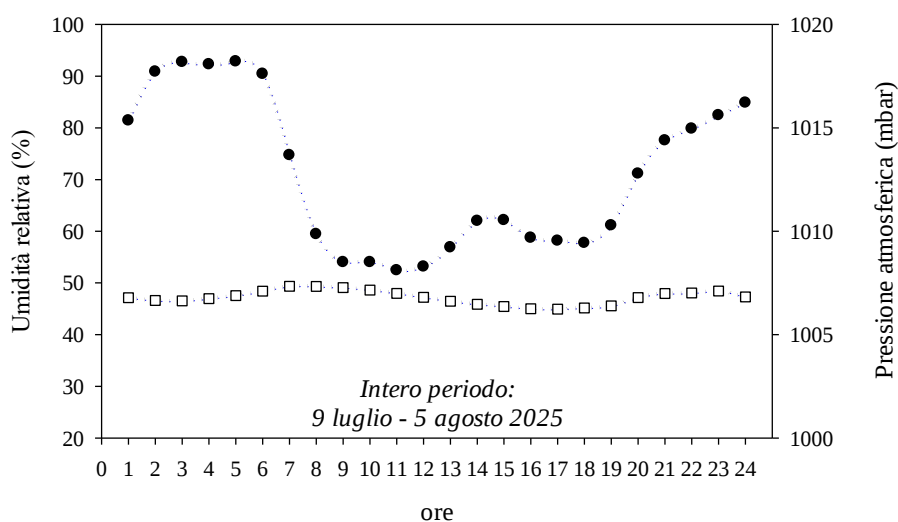


Figura 31. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

(Dati grezzi barometrici, umidità (Codice Stazione: 525); forniti dal Centro Funzionale e Ufficio Idrologia, Idrografico, Mareografico- Agenzia di Protezione Civile della Regione Abruzzo).

<https://idrodataabruzzo.siapmicros.com/polaris/viewer/report>.

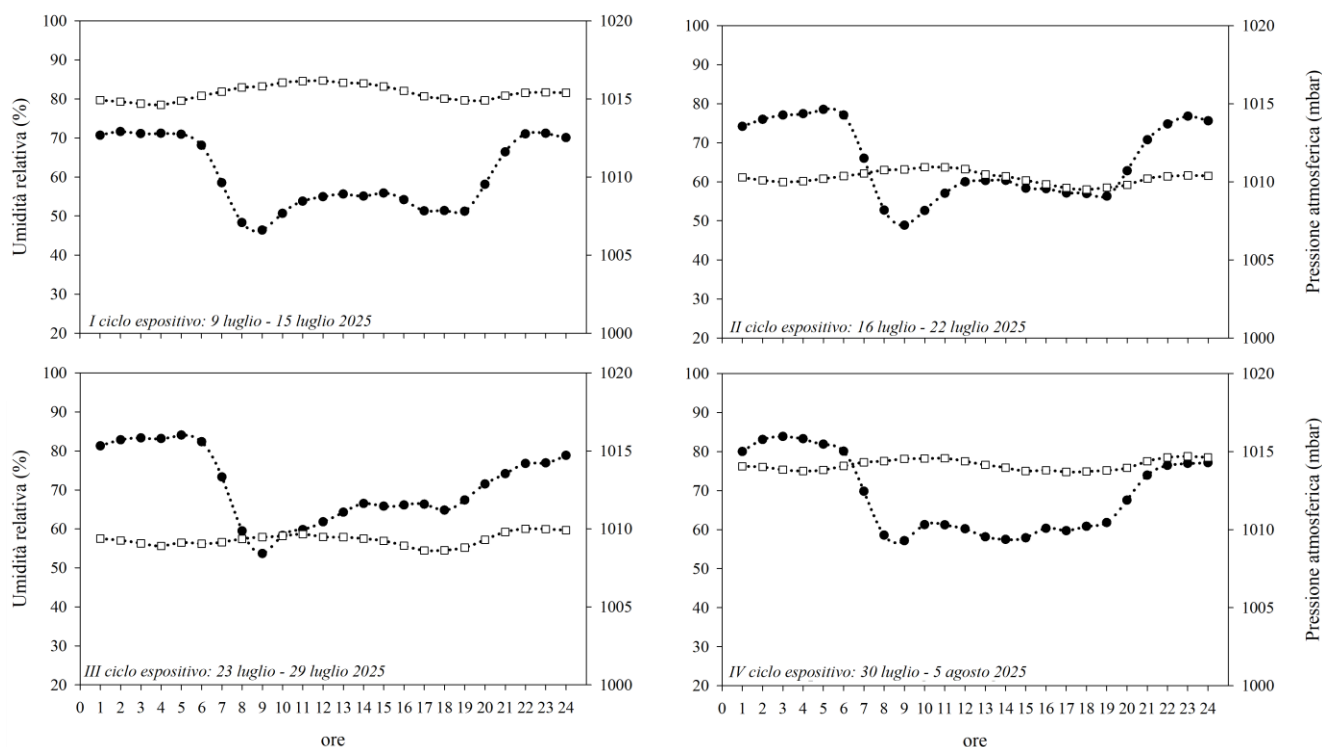


Figura 32. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

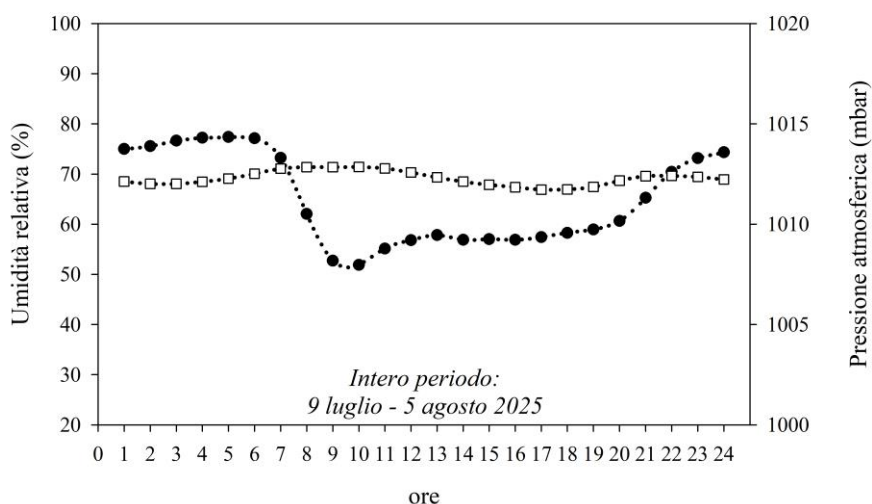


Figura 33. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

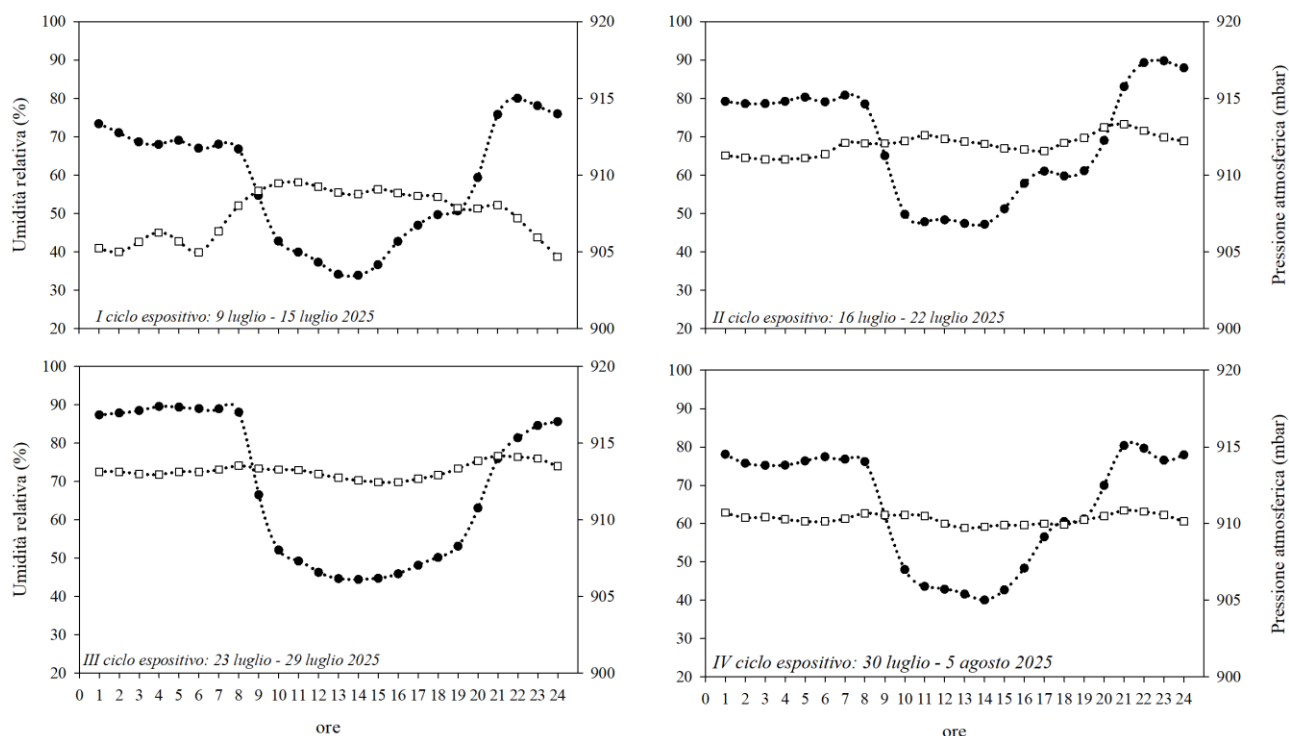


Figura 34. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025. (Dati grezzi barometrici (Codice Stazione 518), forniti dal Centro Funzionale e Ufficio Idrogeologia, Idrografico, Mareografico-Agenzia di Protezione Civile della Regione Abruzzo) <https://idrodataabruzzo.siapmicros.com/polaris/viewer/report>.

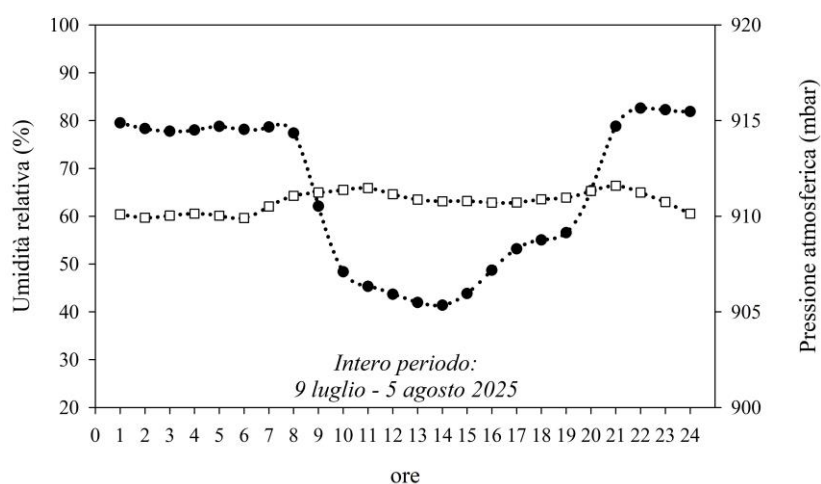


Figura 35. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

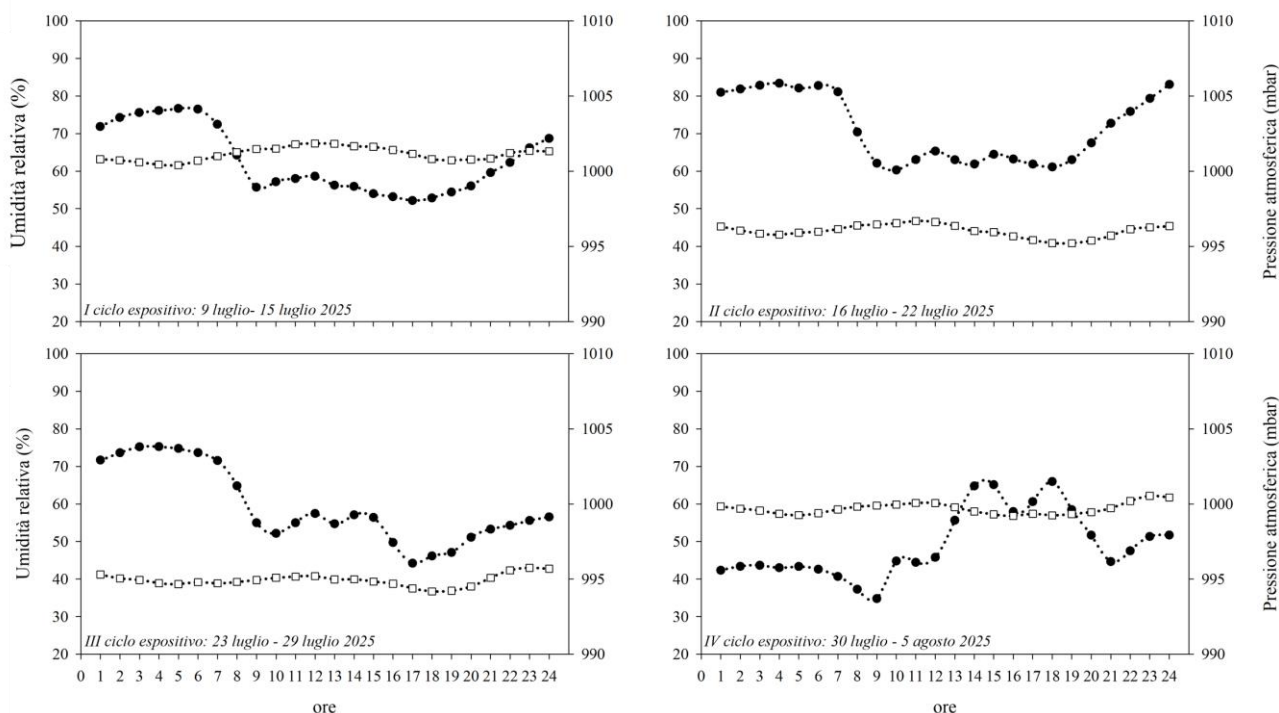


Figura 36. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

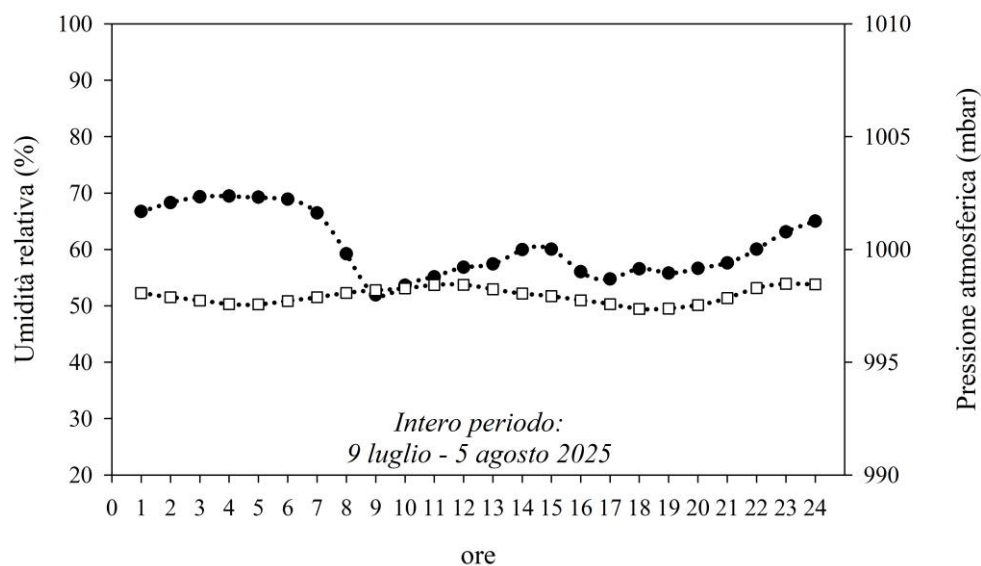


Figura 37. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025. (Dati grezzi barometrici (Codice Stazione 567), forniti dal Centro Funzionale e Ufficio Idrogeologia, Idrografico, Mareografico-Agenzia di Protezione Civile della Regione Abruzzo) Portale Web Polaris <https://idrodataabruzzo.siapmicros.com/polaris/viewer/report>.

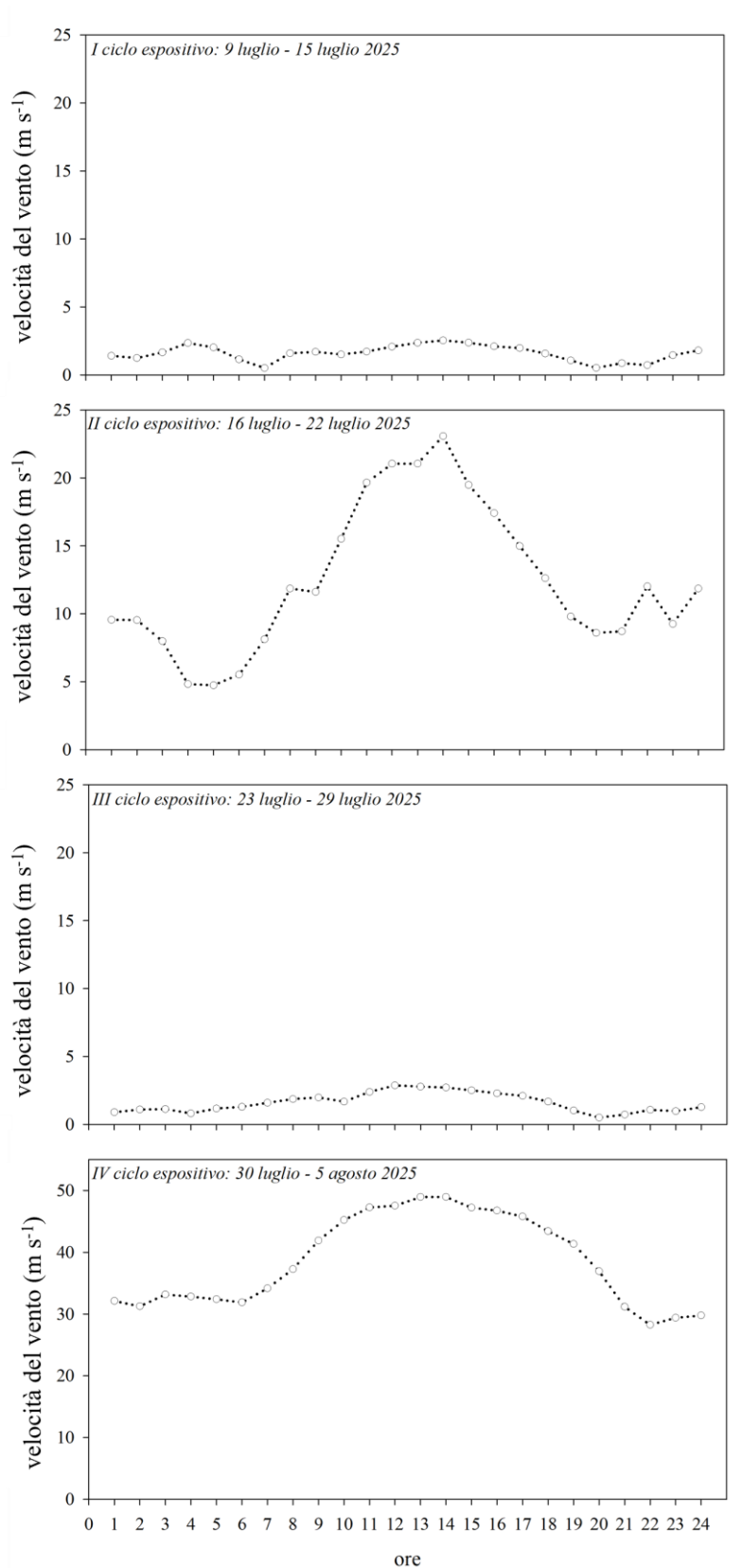


Figura 38. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

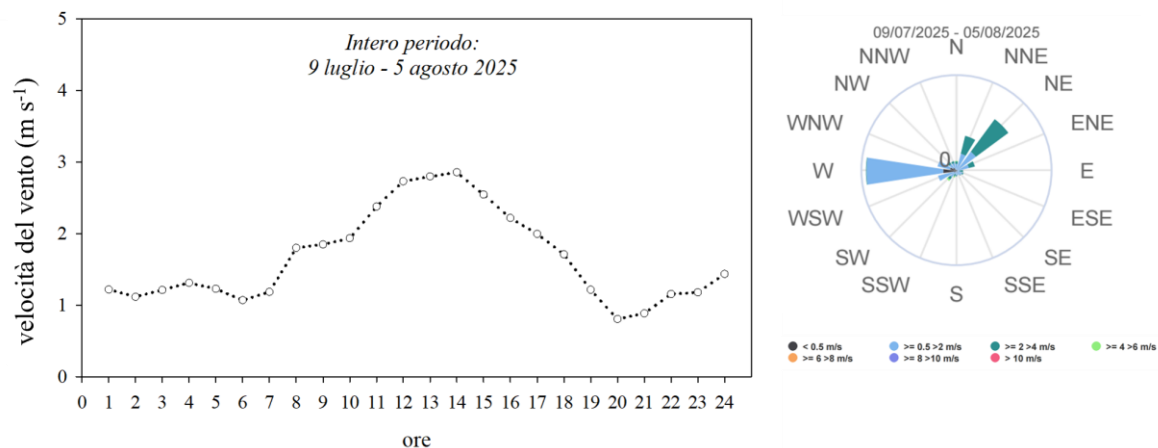


Figura 39. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

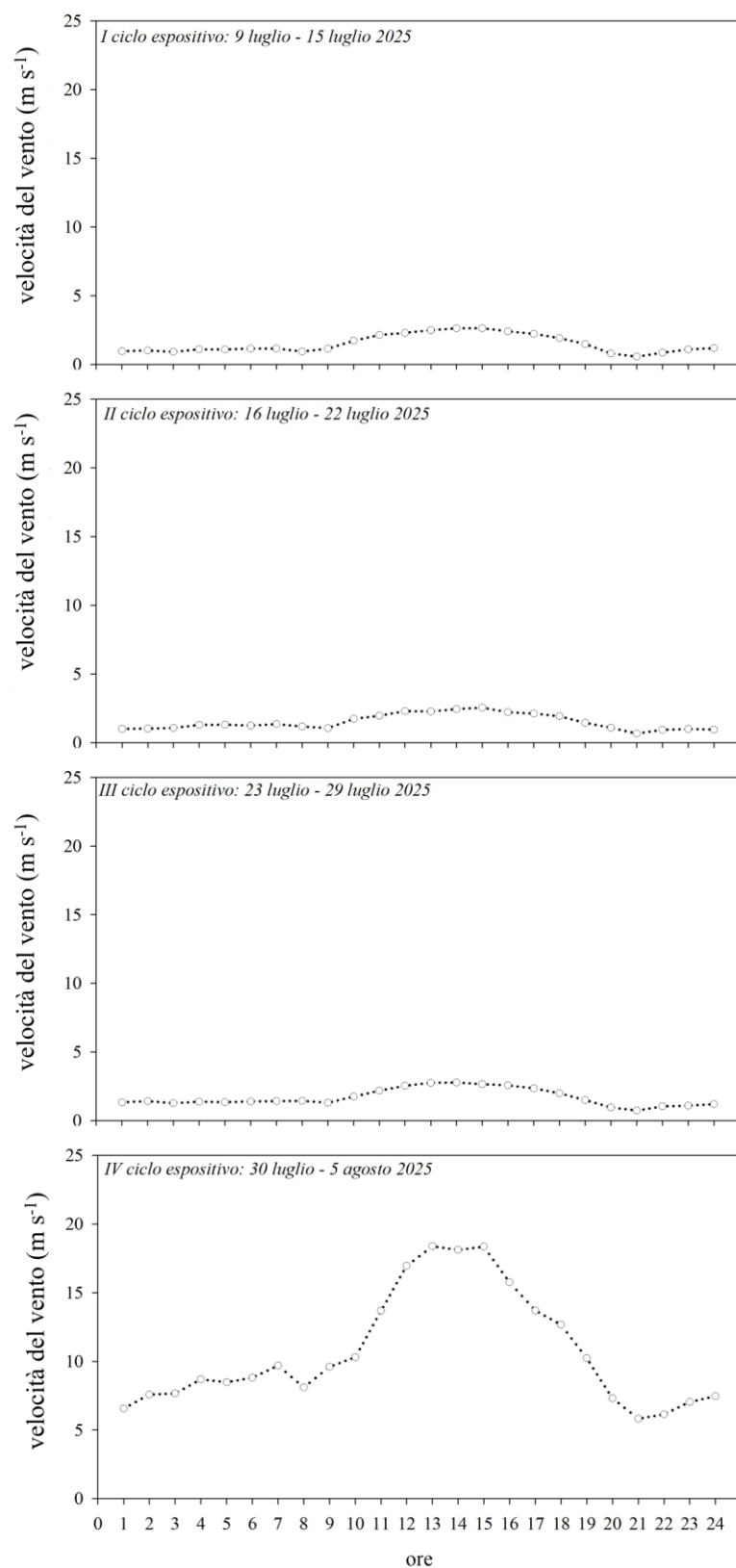


Figura 40. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

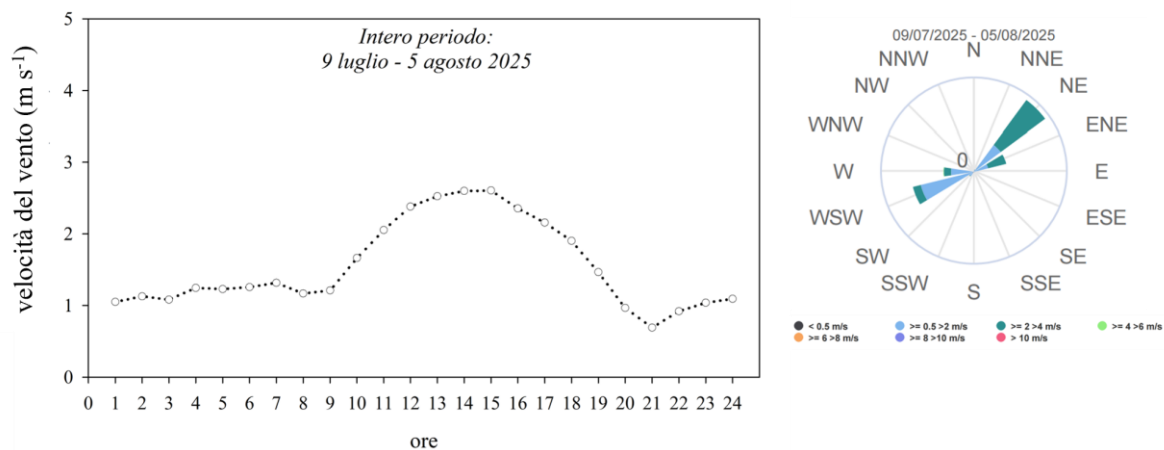


Figura 41. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

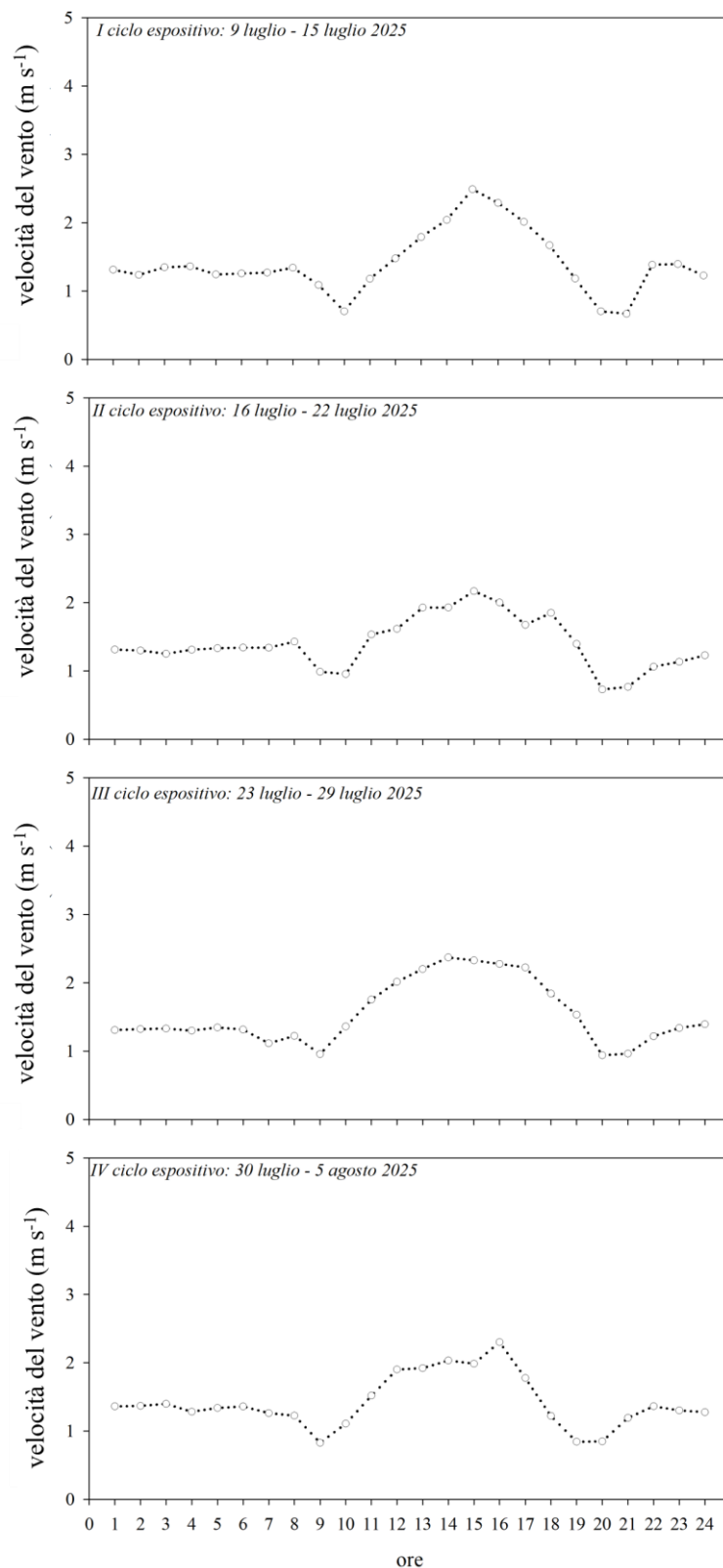


Figura 42. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

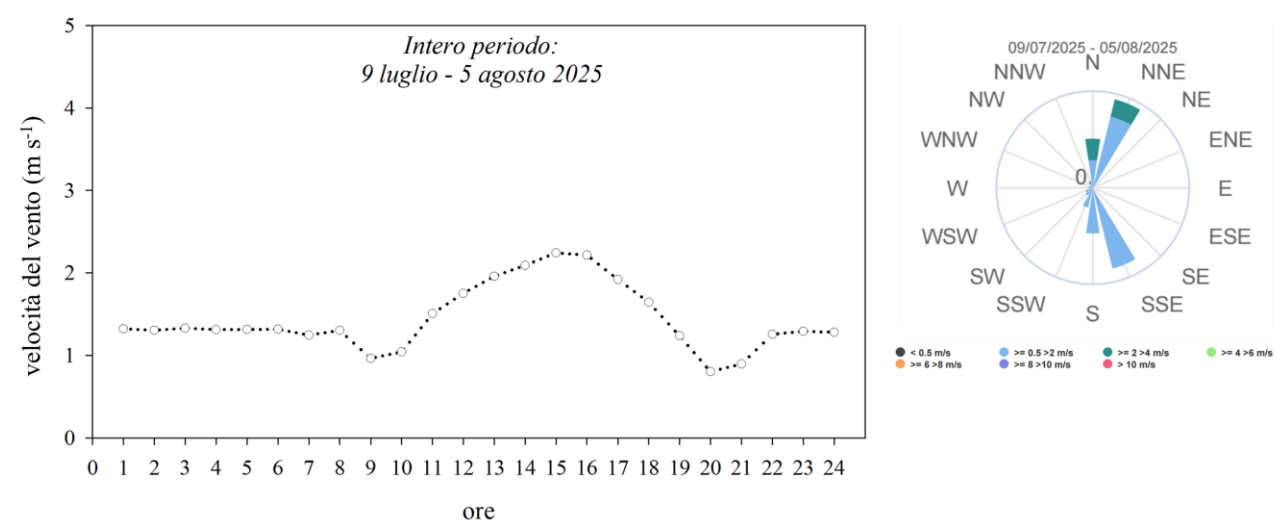


Figura 43. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

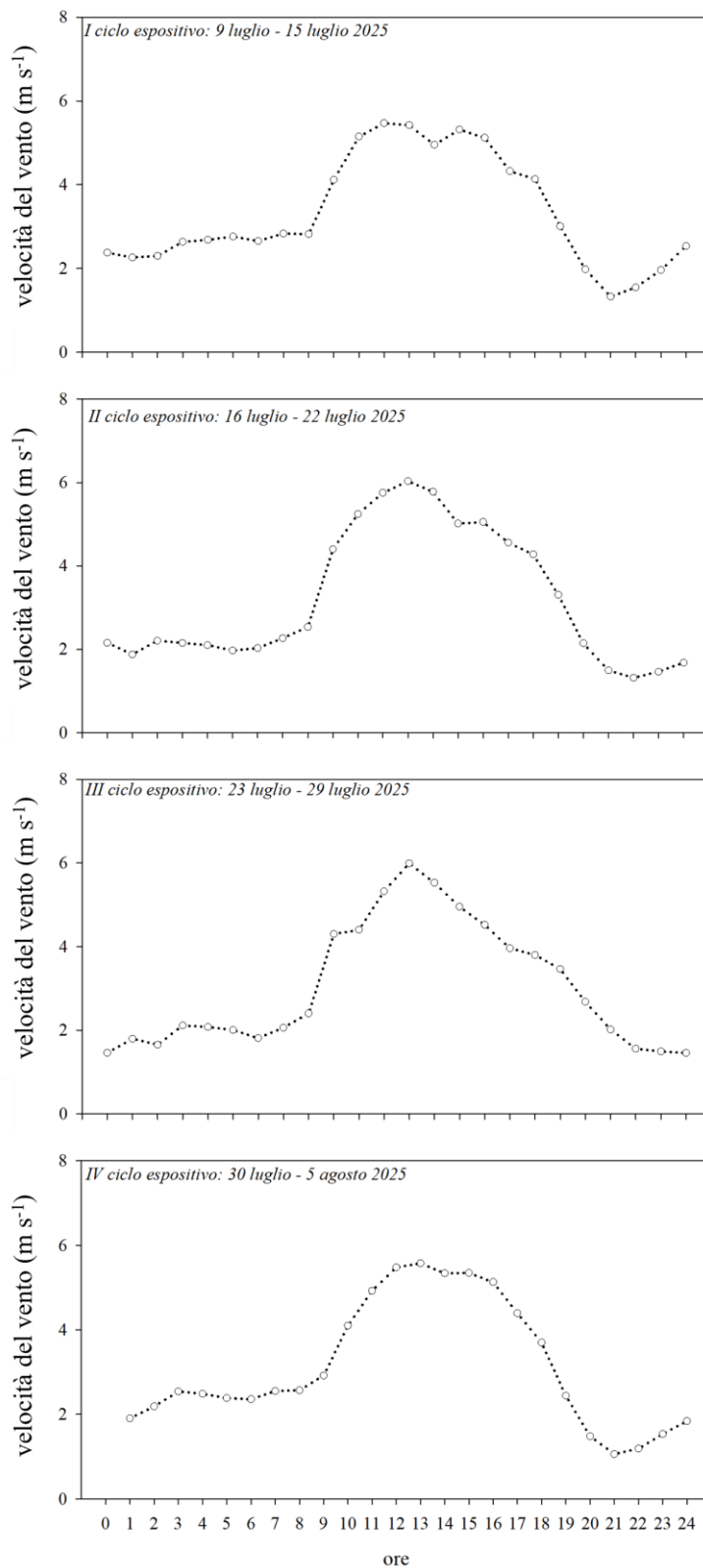


Figura 44. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

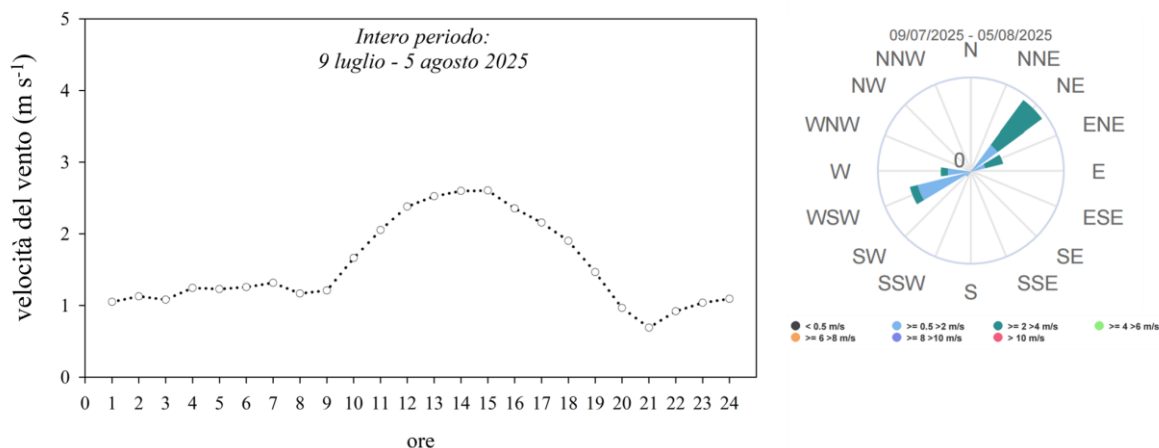


Figura 45. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

Per ognuno dei parametri è stato tracciato inoltre lungo tutto l'arco temporale della campagna realizzata, l'andamento dei valori medi, minimi e massimi, registrati a ogni intervallo settimanale, dal mercoledì al martedì successivo, in corrispondenza di ognuno dei cicli espositivi. In particolare, sono visualizzati i dati calcolati mediando per ciascun intervallo tutti i valori giornalieri nell'arco delle 24 ore (*Figure 46-50*). L'andamento pluviometrico di ciascun ciclo in termini di entità e distribuzione delle piogge complessivamente cadute, è riepilogato nella *Figura 51*.

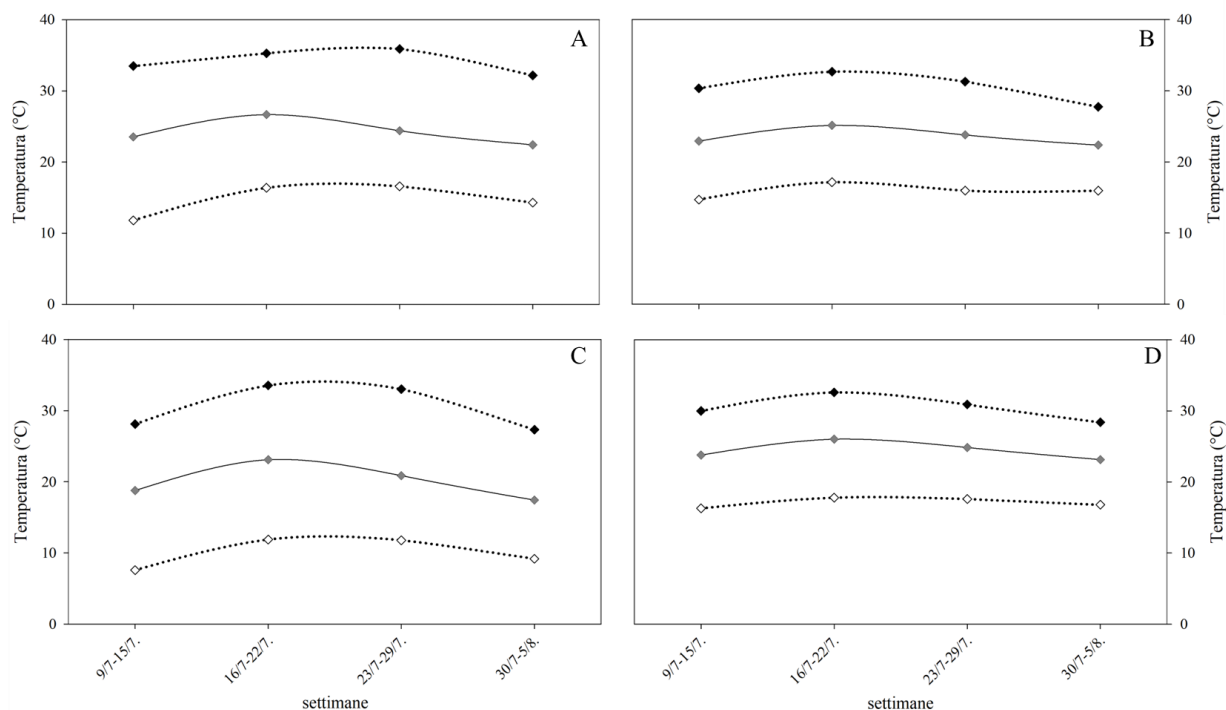


Figura 46. Valori massimi, medi e minimi di temperatura su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (A), Francavilla al Mare (B), Sant'Eufemia a Maiella (C) e Pescara (D).

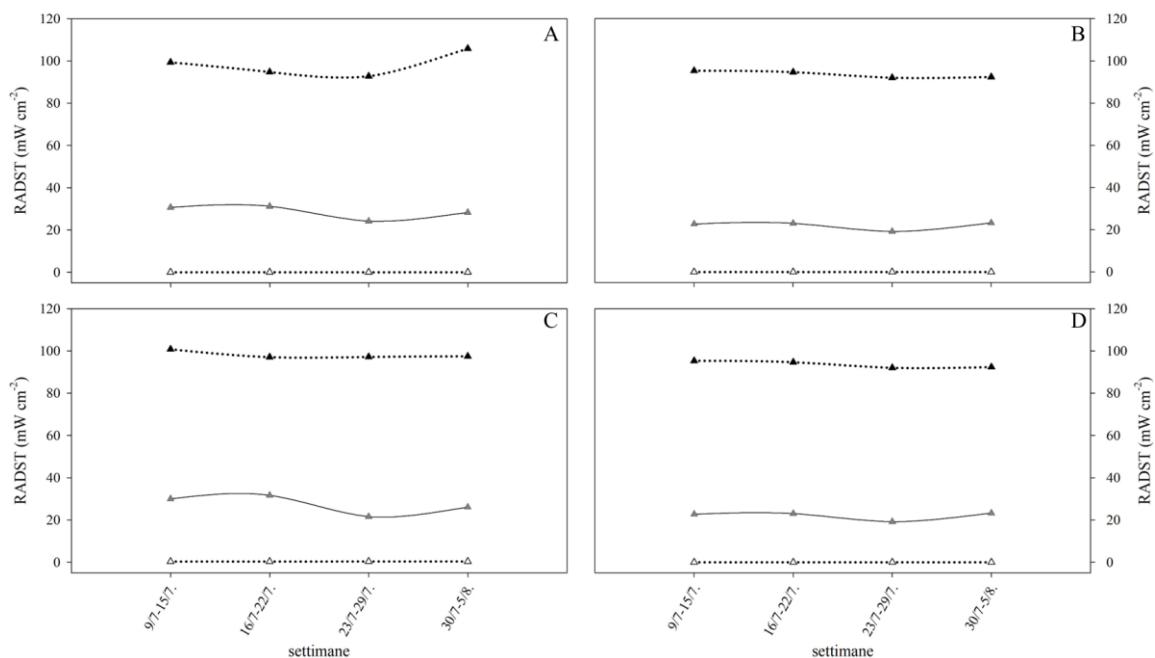


Figura 47. Valori di massimi, medi e minimi Radiazione solare totale (RADST) su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (A), Francavilla al Mare (B), Sant'Eufemia a Maiella (C) e Pescara (D).

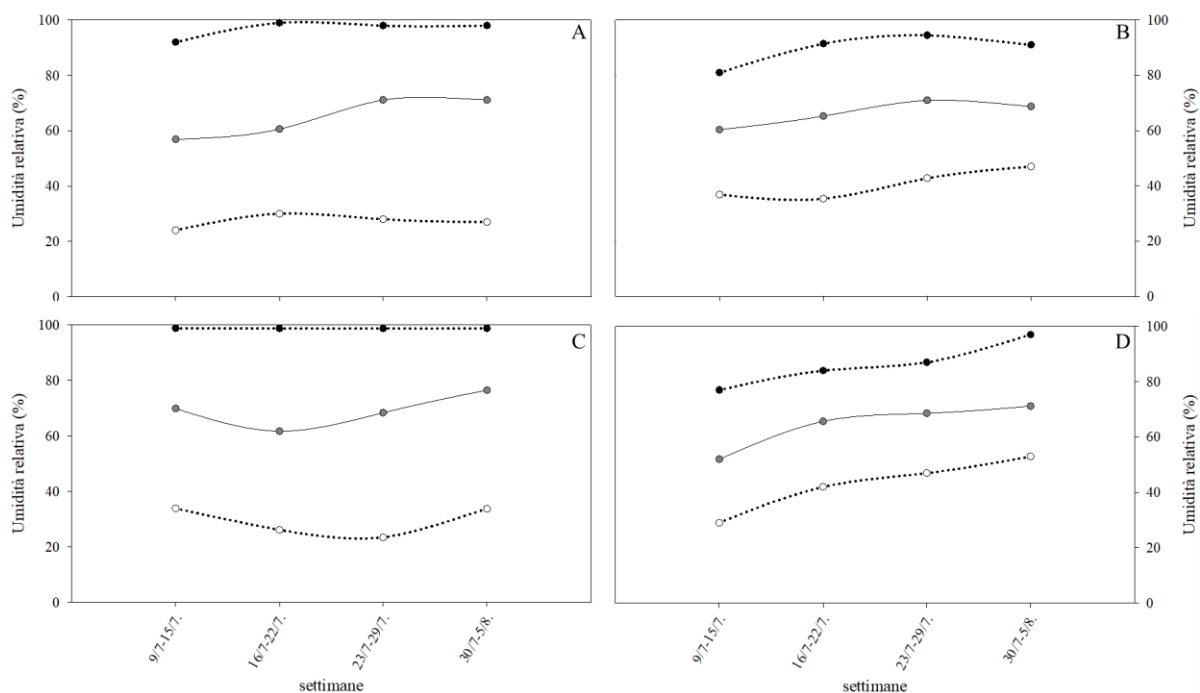


Figura 48. Valori massimi, medi e minimi di umidità relativa su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (A), Francavilla al Mare (B), Sant'Eufemia a Maiella (C) e Pescara (D).

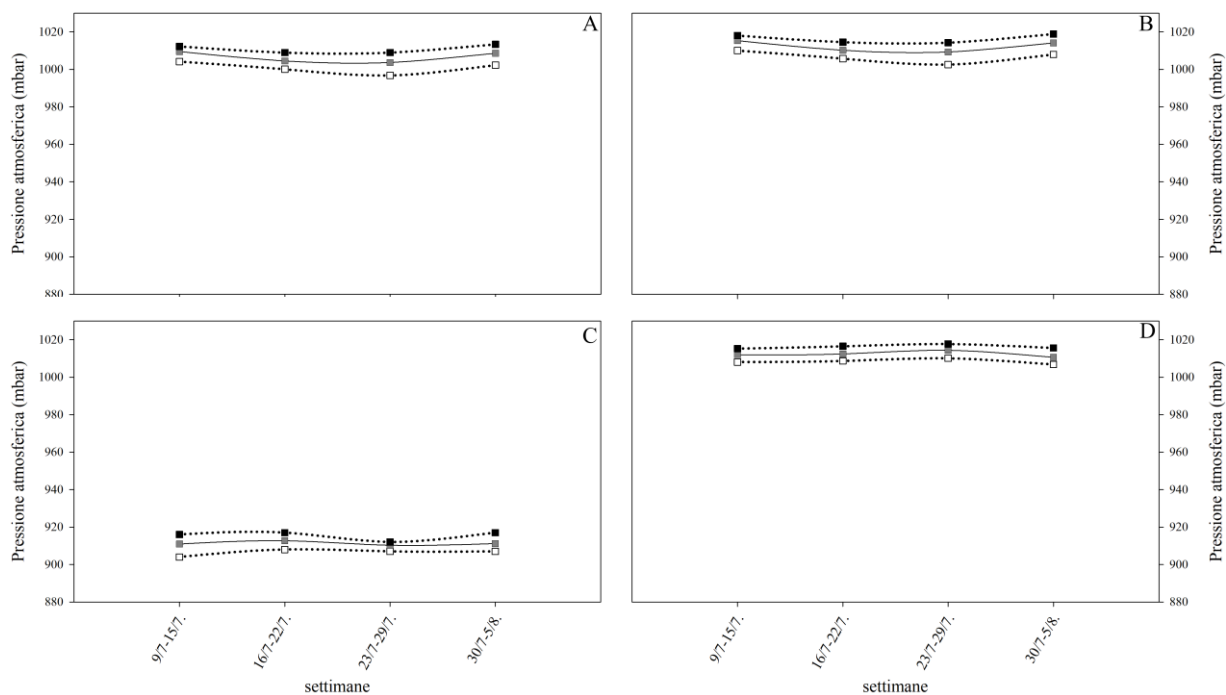


Figura 49. Valori massimi, medi e minimi di pressione atmosferica su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (A), Francavilla al Mare (B), Sant'Eufemia a Maiella (C) e Pescara (D).

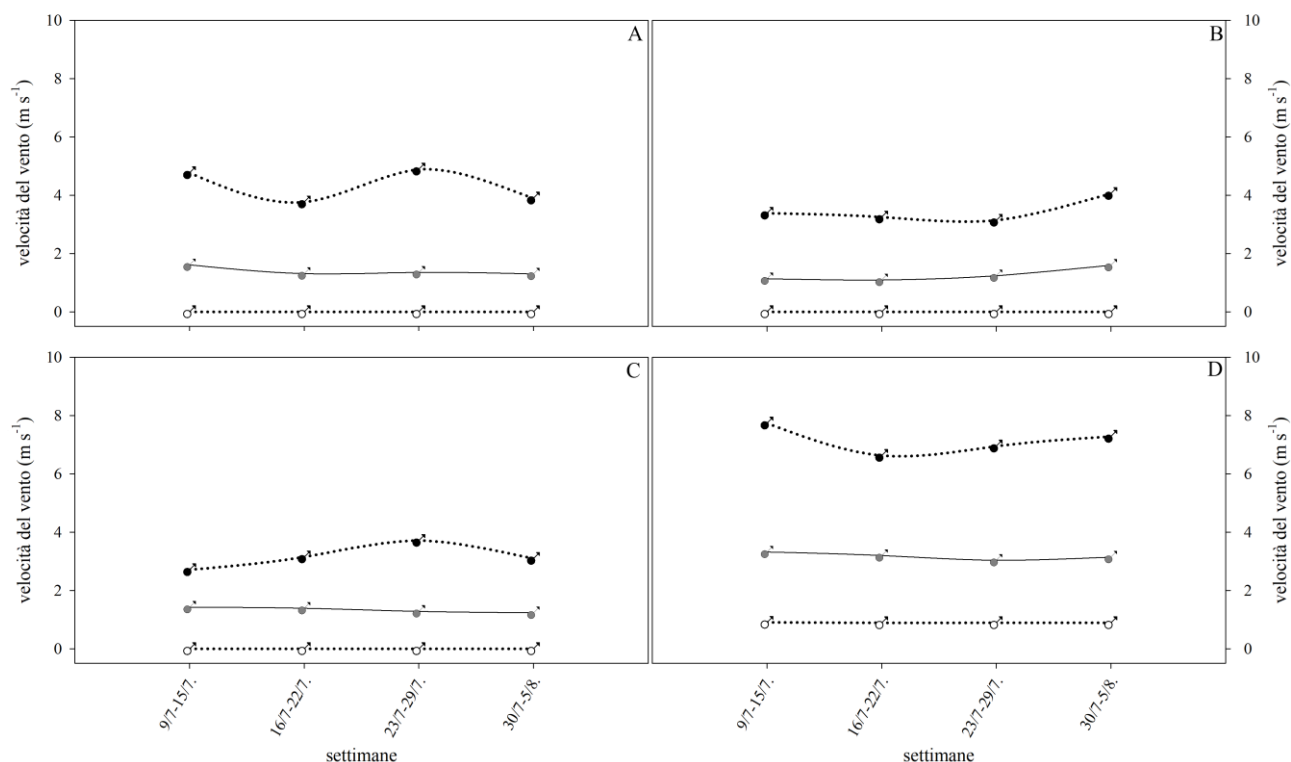


Figura 50. Valori massimi, medi e minimi di velocità del vento su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (A), Francavilla al Mare (B), Sant'Eufemia a Maiella (C) e Pescara (D).

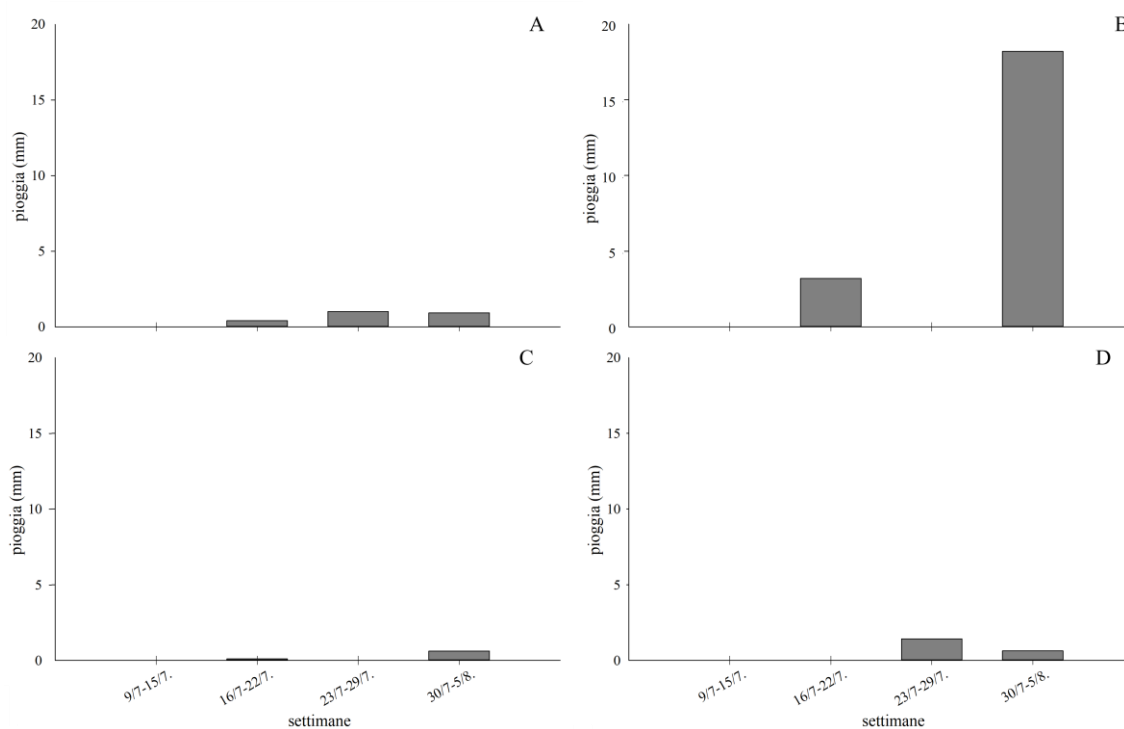


Figura 51. Entità e distribuzione delle piogge cadute in tutte le settimane dell'intero periodo dal 10 luglio al 6 agosto 2024 nelle centraline meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (A), Francavilla al Mare (B), Sant'Eufemia a Maiella (C) e Pescara (D).

Il periodo in esame, 9 luglio 2025 – 5 agosto 2025, dal punto di vista meteorologico, è stato caratterizzato da condizioni termiche sensibilmente superiori alla media climatica di riferimento 1961–1990 e moderatamente superiori anche al decennio più recente (2015–2024), con anomalie positive più marcate nella prima parte del periodo.

Per la stazione di Pescara, l'anomalia termica media sull'intero periodo può essere stimata pari a circa $+2,5 / +3,0$ °C rispetto al periodo 1961–1990 e $+0,7 \div +1,0$ °C rispetto al decennio 2015–2024, con un contributo maggiore associato alle temperature massime e, soprattutto, alle temperature minime notturne.

Nella prima fase del periodo considerato (I e II ciclo espositivo), le province di Pescara e Chieti sono state interessate dalla persistenza di un promontorio anticiclonico di origine nord-africana, con asse disposto lungo il Mediterraneo centrale e massimi di geopotenziale estesi sull'Italia centro-meridionale. Si sono verificate condizioni di tempo stabile e prevalentemente soleggiato, con copertura nuvolosa generalmente assente o limitata alla formazione di modesti addensamenti cumuliformi nelle ore pomeridiane sui rilievi interni. Le precipitazioni sono risultate assenti o del tutto trascurabili, in particolare lungo la fascia costiera e nelle aree collinari, dove la fenomenologia convettiva è stata episodica e priva di effetti significativi. La circolazione atmosferica nei bassi strati è stata caratterizzata da una ventilazione generalmente debole, dominata da un regime di brezza ben strutturato, con brezza di terra nelle ore notturne e del primo mattino e brezza di mare nelle ore centrali della giornata, più evidente lungo il litorale adriatico. Tale assetto ha favorito il ristagno delle masse d'aria nei bassi strati, contribuendo al mantenimento di condizioni termo-igrometriche gravose.

Le temperature si sono mantenute su valori elevati per l'intera fase, con massime frequentemente superiori a 34–36 °C, su tutte le stazioni. Le temperature medie giornaliere, calcolate come media delle stazioni della rete per il rilevamento della qualità dell'aria, si sono mantenute su valori generalmente superiori a 27–28 °C, con punte più elevate nella fase iniziale del periodo. Particolarmente rilevante è stato l'andamento delle temperature minime notturne, che si sono mantenute persistentemente sui 20 °C a Francavilla al Mare e Pescara, risultando decisamente più basse a Sant'Eufemia.

A partire dall'ultima decade di luglio (III ciclo espositivo), l'assetto circolatorio sull'Abruzzo e, in particolare, sulle province di Pescara e Chieti, ha evidenziato una progressiva attenuazione del contributo del promontorio anticiclonico di origine africana, sostituito da condizioni anticicloniche di matrice atlantica. Tale evoluzione ha determinato un assetto barico meno persistente, maggiormente esposto a brevi infiltrazioni di aria più

fresca provenienti dai quadranti settentrionali, responsabili di un parziale ricambio delle masse d'aria nei bassi strati.

In questo contesto, si è osservata una moderata riduzione delle temperature massime, che, pur risultando inferiori ai picchi registrati nella prima fase, si sono mantenute superiori ai valori medi del periodo climatico di riferimento 1961–1990 e in linea o lievemente superiori al riferimento del decennio 2015–2024. Contestualmente, si è registrata una diminuzione dei valori di umidità relativa, più evidente durante le ore diurne, favorita da una migliore ventilazione e da un incremento del rimescolamento atmosferico.

Gli episodi di afflusso di aria più fresca hanno inoltre determinato temporanei rinforzi della ventilazione, in particolare lungo la fascia costiera, contribuendo a una attenuazione delle condizioni di afa. Nel complesso, tale fase è stata caratterizzata da condizioni meteorologiche più miti e maggiormente tollerabili, con effetti più apprezzabili nei primi giorni di agosto, pur in un quadro termico complessivamente ancora superiore alla climatologia storica. Anche in questa fase, la ventilazione è risultata generalmente debole, con un regime di brezza ben strutturato, tipico della stagione estiva. Tuttavia, in concomitanza con sporadiche irruzioni di aria più fresca dai quadranti settentrionali, si sono osservati temporanei incrementi dell'intensità del vento, che hanno contribuito a un parziale rimescolamento delle masse d'aria nei bassi strati e a una moderata attenuazione delle condizioni termo-igrometriche.

L'analisi della rosa dei venti della stazione di Pescara evidenzia chiaramente l'alternanza tipica del regime di brezza, con una ventilazione debole proveniente dall'entroterra nelle ore notturne e del primo mattino, prevalentemente dai settori sud-ovest e ovest-sud-ovest, e una ventilazione diurna dal mare, attiva dalla tarda mattinata fino al tardo pomeriggio, con direzioni prevalenti nord-est ed est-nord-est.

Per quanto riguarda le stazioni di Cepagatti e Francavilla al Mare, le condizioni osservate risultano sostanzialmente analoghe a quelle rilevate a Pescara, sia in termini di andamento termo-igrometrico sia di regime anemologico. Diversamente, la stazione di Sant'Eufemia a Maiella, ubicata in area montana a circa 900 m s.l.m., ha mostrato un regime di brezza monte-valle ben definito, accompagnati da temperature sensibilmente inferiori rispetto alle stazioni costiere e di fondovalle.

Dal punto di vista igrometrico, il periodo è stato caratterizzato da valori medi giornalieri di umidità relativa elevati, spesso superiori al 55%, con marcate oscillazioni tra valori massimi e minimi giornalieri, indicative di condizioni di afa persistente, soprattutto

lungo la fascia costiera e nei principali centri urbani. Considerando le precipitazioni, fino al 20 luglio 2025 si segnala una sostanziale assenza di fenomeni piovosi, in linea con le condizioni di stabilità atmosferica. Dal 21 luglio, si sono invece registrati episodi di precipitazione di debole entità, concentrati nelle ore diurne, con accumuli generalmente modesti e localizzati, che non hanno inciso in modo significativo sul bilancio pluviometrico complessivo del mese, ma hanno temporaneamente interrotto la prolungata fase siccitosa.

Nel periodo 1–5 agosto 2025 (parte del IV ciclo espositivo), in continuità con l'evoluzione già avviata nell'ultima parte di luglio, le temperature medie giornaliere si sono attestate su valori intorno a 24–25 °C, con temperature massime generalmente comprese tra 30 e 32 °C, quindi sensibilmente inferiori ai picchi registrati nella prima parte del periodo estivo, e temperature minime notturne più contenute, mediamente comprese tra 15 e 18 °C. Tale fase ha beneficiato di un parziale effetto ristoratore legato a un aumento dell'instabilità atmosferica, che ha favorito il verificarsi di precipitazioni sparse e localmente a carattere temporalesco, più frequenti nelle aree interne rispetto alla fascia costiera. In particolare, tra la fine di luglio e i primi giorni di agosto 2025, si sono osservati episodi temporaleschi localizzati, talora accompagnati da raffiche di vento di moderata intensità, che hanno contribuito a un temporaneo abbassamento delle temperature e a una riduzione dei valori di umidità relativa. Successivamente, nelle giornate del 4 e 5 agosto, si sono verificati ulteriori eventi piovosi, sia nelle ore diurne sia in quelle notturne, con accumuli pluviometrici variabili e disomogenei sul territorio. Le precipitazioni sono risultate più consistenti nella stazione di Francavilla al Mare.

Nel complesso, tali eventi precipitativi, pur non configurandosi come diffusi o persistenti, hanno contribuito a mitigare temporaneamente le condizioni termigrometriche, favorendo una riduzione delle temperature e dell'afa e determinando condizioni meteorologiche più confortevoli rispetto alla fase precedente dominata dalla stabilità anticiclonica.

3. Monitoraggio strumentale dell'ozono troposferico (attività 2025)

3.1. Normativa di riferimento

In Italia, in tema d'inquinamento atmosferico e contenimento delle emissioni, la normativa di riferimento, in vigore dal 30/09/2010, è il decreto legislativo (DL) n. 155 del 13 agosto 2010 "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa"; modificato e integrato in alcuni punti dal DL n. 250 del 24 dicembre 2012 (in vigore dal 12/02/2013) e dal G.U. n. 96 del 26 aprile 2017 ("Procedure di garanzia di qualità per verificare il rispetto della qualità delle misure dell'aria ambiente, effettuate nelle stazioni delle reti di misura"). Il provvedimento (di cui costituiscono norme attuative a livello nazionale i decreti correlati emessi dal 2011 al 2019) recepisce la direttiva 2008/50/CE e sostituisce le disposizioni di attuazione della direttiva 2004/107/CE. Esso, abrogando un complesso di atti legislativi precedentemente emessi, istituisce un quadro normativo unitario in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria ambiente finalizzato a: i) individuare obiettivi di qualità dell'aria ambiente volti a evitare, prevenire o ridurre effetti nocivi per la salute umana e per l'ambiente nel suo complesso; ii) valutare la qualità dell'aria ambiente sulla base di metodi e criteri comuni su tutto il territorio nazionale; iii) ottenere informazioni sulla qualità dell'aria ambiente come base per individuare le misure da adottare per contrastare l'inquinamento e i suoi effetti nocivi sulla salute umana e sull'ambiente e per monitorare le tendenze a lungo termine, nonché i miglioramenti dovuti alle misure adottate; iv) mantenere la qualità dell'aria ambiente, laddove buona, e migliorarla negli altri casi; v) garantire al pubblico le informazioni sulla qualità dell'aria ambiente e vi) realizzare una migliore cooperazione tra gli Stati dell'Unione Europea in materia di inquinamento atmosferico. Per il perseguimento di tali fini, la normativa nel complesso: definisce e fissa valori limite, livelli critici, soglie di allarme e valori obiettivo per una serie di composti; delinea criteri basilari di suddivisione del territorio per il monitoraggio, l'organizzazione della rete di rilievo, metodologie di valutazione da applicare, i piani e le misure di riduzione e contenimento da adottare; le modalità di gestione dell'informazione pubblica. In particolare, in materia di O₃ troposferico il decreto stabilisce: i) il metodo di riferimento per la misurazione dell'inquinante (norma UNI EN 14625:2005); ii) la zonizzazione delle aree interessate; iii) le caratteristiche (tipologia, numero e ubicazione su macro- e micro-scala) delle stazioni di monitoraggio; iv) i precursori da monitorare e v) vari parametri quantitativi di stima, le cui definizioni applicate e riportate nell'Articolo 2, sono riassunte nella *Tabella 8*.

Negli Allegati VII e XII sono riportati i valori obiettivo, gli obiettivi a lungo termine (da perseguire secondo una tempistica stabilita) e le soglie di informazione e di allarme, riprodotte rispettivamente nelle *Figure 52, 53 e 54*.

Tabella 8. Alcune definizioni applicate nell'Articolo 2 del Decreto Legislativo n. 155 del 13 agosto 2010.

Termine usato	Definizione applicata dal Decreto Legislativo n. 155 del 13 agosto 2010
valore obiettivo	livello fissato al fine di evitare, prevenire o ridurre effetti nocivi per la salute umana o per l'ambiente nel suo complesso, da conseguire, ove possibile, entro una data prestabilita
obiettivo a lungo termine	livello da raggiungere nel lungo periodo mediante misure proporzionate, al fine di assicurare un'efficace protezione della salute umana e dell'ambiente
soglia di informazione	livello oltre il quale sussiste un rischio per la salute umana in caso di esposizione di breve durata per alcuni gruppi particolarmente sensibili della popolazione nel suo complesso ed il cui raggiungimento impone di assicurare informazioni adeguate e tempestive
soglia di allarme	livello oltre il quale sussiste un rischio per la salute umana in caso di esposizione di breve durata per la popolazione nel suo complesso ed il cui raggiungimento impone di adottare provvedimenti immediati

L'Allegato VII fornisce una definizione sommaria di AOT40, (espressa in $\mu\text{g m}^{-3} \text{ h}$), per la quale testualmente si intende la somma della differenza tra le concentrazioni orarie superiori a $80 \mu\text{g m}^{-3}$ (= 40 ppb) e $80 \mu\text{g m}^{-3}$ in un dato periodo di tempo, utilizzando solo i valori orari rilevati ogni giorno tra le 8:00 e le 20:00, ora dell'Europa centrale (CET).

Finalità	Periodo di mediazione	Valore obiettivo	Data entro la quale deve essere raggiunto il valore-obiettivo ⁽¹⁾
Protezione della salute umana	MEDIA massima giornaliera calcolata su 8 ore ⁽²⁾	$120 \mu\text{g/m}^3$ da non superare più di 25 volte per anno civile come media su tre anni ⁽³⁾	1.1.2010
Protezione della vegetazione	Da maggio a luglio	AOT40 (calcolato sulla base dei valori di 1 ora) $18.000 \mu\text{g/m}^3 \cdot \text{h}$ come media su cinque anni ⁽³⁾	1.1.2010

(1) Il raggiungimento dei valori obiettivo è valutato nel 2013, con riferimento al triennio 2010-2012, per la protezione della salute umana e nel 2015, con riferimento al quinquennio 2010-2014, per la protezione della vegetazione.

(2) La massima concentrazione media giornaliera su 8 ore deve essere determinata esaminando le medie consecutive su 8 ore, calcolate in base a dati orari e aggiornate ogni ora. Ogni media su 8 ore così calcolata è riferita al giorno nel quale la stessa si conclude. La prima fascia di calcolo per ogni singolo giorno è quella compresa tra le ore 17:00 del giorno precedente e le ore 01:00 del giorno stesso; l'ultima fascia di calcolo per ogni giorno è quella compresa tra le ore 16:00 e le ore 24:00 del giorno stesso.

(3) Se non è possibile determinare le medie su tre o cinque anni in base ad una serie intera e consecutiva di dati annui, la valutazione della conformità ai valori obiettivo si può riferire, come minimo, ai dati relativi a:

- Un anno per il valore-obiettivo ai fini della protezione della salute umana.
- Tre anni per il valore-obiettivo ai fini della protezione della vegetazione.

Figura 52. Valori obiettivo per l'ozono definiti nell'Allegato VII del Decreto Legislativo n. 155 del 13 agosto 2010.

Finalità	Periodo di mediazione	Obiettivo a lungo termine	Data entro la quale deve essere raggiunto l'obiettivo a lungo termine
Protezione della salute umana	Media massima giornaliera calcolata su 8 ore nell'arco di un anno civile	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	non definito
Protezione della vegetazione	Da maggio a luglio	AOT40, (calcolato sulla base dei valori di 1 ora) 6 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$	non definito

Figura 53. Obiettivi a lungo termine per l'ozono definiti nell'Allegato VII del Decreto Legislativo n. 155 del 13 agosto 2010.

Finalità	Periodo di mediazione	Soglia
Informazione	1 ora	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Allarme	1 ora ⁽¹⁾	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
⁽¹⁾ Per l'applicazione dell'articolo 10, comma 1, deve essere misurato o previsto un superamento per tre ore consecutive.		

Figura 54. Soglie di informazione e di allarme per l'ozono definiti nell'Allegato XII del Decreto Legislativo n. 155 del 13 agosto 2010.

La normativa è stata recentemente soggetta ad aggiornamento attraverso la Direttiva (UE) 2024/2881 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2024. Al momento attuale, essa non è ancora stata recepita in un Decreto Legislativo specifico attuativo nello Stato italiano, tenendo presente che è stabilito all'11 dicembre 2026 il tempo limite per le attuazioni nella normativa nazionale secondo i termini stabiliti dalla stessa direttiva.

3.2 Stazioni strumentali di riferimento

Nella Tabella 9 si riportano le classificazioni attuali, le ubicazioni e la dotazione strumentale di ciascuna.

Tabella 9. Classificazione, ubicazione e tipo di dotazione strumentale (indicata con il simbolo X) delle 4 stazioni ubicate nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo.

Stazione	Ubicazione	O ₃	NO _x	NO ₂	C ₆ H ₆	CO ₂	PM10	PM2.5
1	Cepagatti (PE)	X	X	X	X			
2	Francavilla al mare (CH)	X	X	X	X		X	X
3	S. Eufemia a Maiella (PE)	X	X	X	X	X		
4	Pescara	X	X	X			X	X

3.3 Elaborazione ed esito dei dati strumentali

La distribuzione spaziale delle 4 stazioni strumentali di rilevamento dell'O₃ nell'area oggetto di studio è rappresentata nella *Figura 6*, alla quale si rimanda. I valori delle concentrazioni orarie forniti dalle 4 stazioni strumentali Cepagatti, Francavilla al Mare, Sant'Eufemia a Maiella e Pescara, espresse in $\mu\text{g m}^{-3}$, sono stati convertiti in fase elaborativa in ppb, sapendo che 1 ppb è uguale a $1,995 \mu\text{g m}^{-3}$, a 20 °C e 101.325 kPa.

Si ricorda che l'O₃ tende a tracciare, in termini di concentrazione, un caratteristico *trend* giornaliero e stagionale. Per i siti, pertanto, mediando i dati acquisiti a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi, per l'intero periodo espositivo per tutto l'arco temporale dal 9 luglio al 5 agosto 2025, sono stati riprodotti i corrispondenti profili giornalieri medi orari del giorno "tipo" di ciascun intervallo considerato e sono riportati nelle *Figure 55 e 56*.

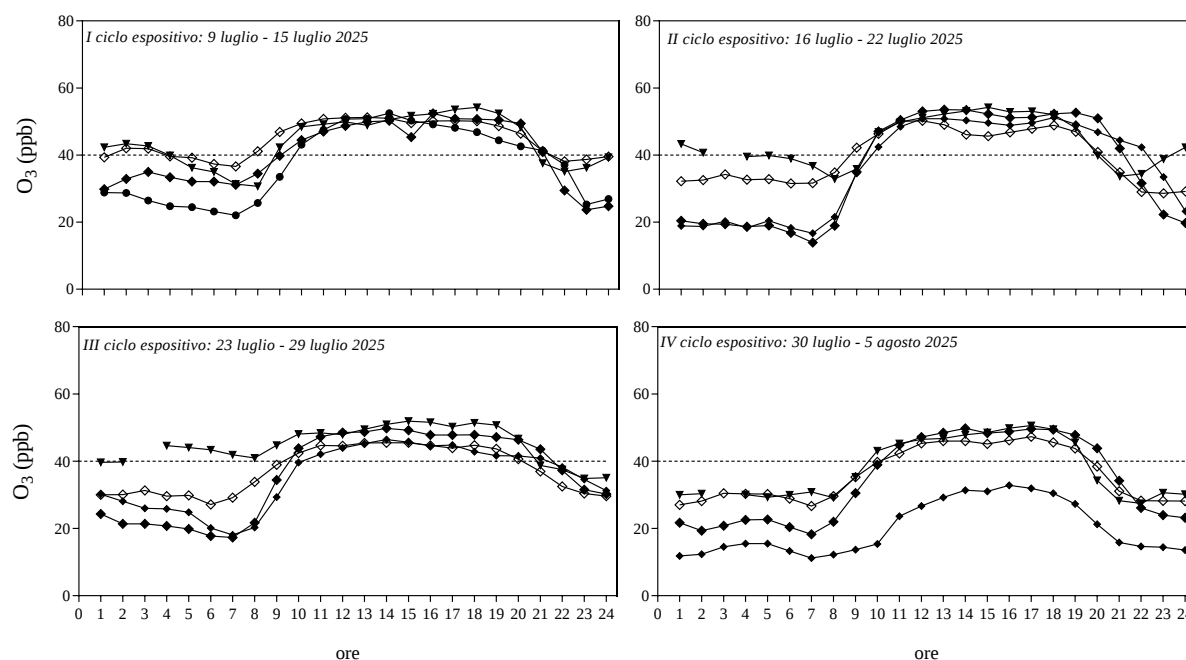


Figura 55. Profili giornalieri delle concentrazioni di ozono tracciati mediando i valori registrati nelle 4 stazioni strumentali, Cepagatti ($\diamond$), Francavilla al Mare ($\blacklozenge$), Sant'Eufemia a Maiella ($\blacktriangledown$) e, Pescara ($\blacklozenge$) della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, a ogni ora (dalle 01.00 alle 24.00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi (dal mercoledì al martedì successivo) condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025. La linea punteggiata parallela all'asse delle ascisse, indica la soglia di 40 ppb. Il dato orario mancante per la stazione di Sant'Eufemia a Maiella coincide con la calibrazione giornaliera dell'analizzatore.

Si osserva che l'andamento circadiano dell'O₃, tipico delle zone pianeggianti e situate sul livello del mare (Chevone *et al.*, 1998), già rilevato in altre località della Toscana costiera (Lorenzini *et al.*, 1994; Pellegrini *et al.*, 2014), è restituito da tutte le stazioni strumentali e per tutti gli intervalli considerati. Nello specifico, si registrano mediamente innalzamenti repentini a partire dalle 09:00 e un perdurare delle concentrazioni relativamente più alte, spesso di molto superiori alla soglia di 40 ppb, nelle ore centrali della giornata (in alcuni casi anche fino al tardo pomeriggio/inizio serata e tarda serata come nel caso del I, II e III ciclo espositivo). È evidente, inoltre, come l'andamento del profilo di ciascun ciclo rispecchi fedelmente la tipica stagionalità dell'inquinante e le condizioni meteo-climatiche del momento: i livelli maggiori si osservano, infatti, nei periodi risultati più caldi e soleggiati; al contrario, quelli inferiori in presenza di temperature più contenute, accompagnate o meno da precipitazioni (vedasi al riguardo il IV ciclo espositivo). Su scala locale la sua distribuzione spaziale e temporale è influenzata, oltre che dalle condizioni meteorologiche anche da altre variabili, quali le entità delle emissioni dei precursori e dei reagenti, nonché dalle caratteristiche topografiche e orografiche del luogo. I moti convettivi di origine termica, l'instabilità atmosferica, il trasporto orizzontale, gli scambi verticali e/o le intrusioni da strati superiori dell'atmosfera (Lorenzini e Nali, 2005) ne influenzano complessivamente l'accumulo. Come riportato in precedenza in relazione alle stazioni strumentali di Cepagatti e Sant'Eufemia a Maiella, è possibile registrarne la permanenza ad alti livelli anche durante le ore notturne. Tale fenomeno (spesso riscontrato nelle zone rurali e collinari più interne) è spiegato sia da eventuali processi d'inversione termica, a seguito dei quali masse d'aria ricche di inquinanti restano intrappolate *in loco* (Sanz *et al.*, 2007), sia da una probabile minore incidenza notturna di emissioni di monossido di azoto, responsabile di reazioni di "ritorno" di deplezione dell'O₃ (Lorenzini e Nali, 2005). Per le 4 stazioni strumentali, il profilo medio restituito dalle 4 settimane considerate complessivamente propone un *trend* simile a quello osservato nei singoli cicli. Esso risulta esattamente sovrapponibile a quello ricavato per tutto l'arco temporale (dal 9 luglio al 5 agosto 2025), confermando come già rilevato per i parametri meteo-climatici, la piena rappresentatività dei cicli espositivi condotti a cadenza settimanale, dell'intero periodo.

Dai valori di concentrazione oraria delle 4 centraline di rilevamento sono state calcolate le massime medie mobili giornaliere su otto ore e il numero di ore giornaliere con livelli superiori a 90 ppb, come esposto nella *Tabella 10*. Come già sopra ricordato, il DL n. 155 del 2010 fissa, ai fini della protezione della salute umana, un valore-obiettivo per la concentrazione di O₃. La norma richiede l'individuazione del valore più alto tra le 24 medie mobili giornaliere calcolate su otto ore a partire dalle ore 17:00 del giorno prima. Il limite di 120 µg m⁻³ (~60 ppb) non deve essere superato

per più di 25 giorni l'anno, calcolati come media su tre anni consecutivi.

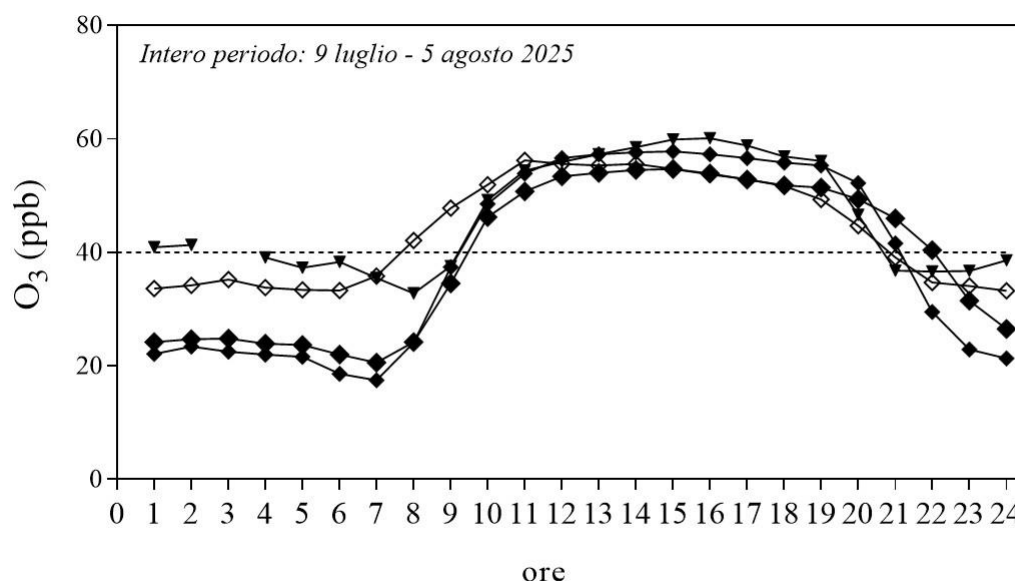


Figura 56. Profili giornalieri delle concentrazioni di ozono tracciati mediando i valori registrati nelle 4 stazioni strumentali, Cepagatti (◇), Francavilla al Mare (◆), Sant'Eufemia a Maiella (▼) e, Pescara (◆) della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo a ogni ora (dalle 01.00 alle 24.00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi (dal mercoledì al martedì successivo) condotti dal 9 luglio al 5 agosto 2025. La linea punteggiata parallela all'asse delle ascisse, indica la soglia di 40 ppb. Il dato orario mancante per la stazione di Sant'Eufemia a Maiella coincide con la calibrazione giornaliera dell'analizzatore.

Nel corso del periodo complessivo durante il quale è stato condotto il biomonitoraggio, il superamento del livello di 60 ppb dei valori di media mobile massima su 8 ore giornaliere si è verificato per un giorno nella stazione strumentale di Francavilla al Mare, Sant'Eufemia e Pescara, rispettivamente (evidenziato dalla campitura delle caselle). Concentrazioni orarie dell'inquinante di $180 \mu\text{g m}^{-3}$ (pari a ~ 90 ppb), che corrispondono alla soglia di informazione, definita dal DL, livello oltre il quale sussiste pericolo per la salute umana di alcuni gruppi sensibili, il cui raggiungimento impone di assicurare informazioni adeguate e tempestive, non sono mai state raggiunte in nessuna delle 4 stazioni strumentali [analogamente alla soglia di allarme di $240 \mu\text{g m}^{-3}$ (pari a ~ 120 ppb)]. Per ciascun giorno sono stati ricavati i principali parametri descrittivi di episodi puntiformi all'inquinante, corrispondenti ai valori medi della concentrazione oraria di O₃ rilevati giornalmente in 24 ore (M24); 12 ore diurne (M12, dalle ore 8:00 alle ore 20:00 escluse) e 7 ore diurne centrali della giornata (M7), considerate a più alto rischio (dalle ore 10:00 alle ore 16:00 comprese). Si associa a essi l'"M1" che indica il dato massimo di concentrazione registrato nelle 24 ore. Tali parametri sono stati elaborati per intervalli di più giorni, espressi, in questo caso, come valori minimi (*Min*), medi (*Med*) e massimi (*Max*). In particolare, essi sono stati calcolati settimanalmente

(dal mercoledì al martedì successivo per l'intero periodo espositivo e per tutto l'arco di tempo, dal 9 luglio al 5 agosto 2025). Essi sono riassunti nelle *Tabelle 11-14*, rispettivamente per ciascun sito strumentale. Per il sito Cepagatti, il mese di luglio (nello specifico in corrispondenza del I e del II ciclo espositivo) sono i periodi in cui mediamente tali parametri si sono assestati su livelli decisamente più alti (e.g., i valori di M24 44,6 e 39,4 ppb, rispettivamente durante il I e II ciclo espositivo) con punte massime di 49,4 e 45,3 ppb.

Anche per il sito di Francavilla al Mare, la prima decade di luglio è risultata il periodo in cui in cui le concentrazioni giornaliere di O₃ si sono assestate su livelli più alti (e.g., i valori di M24 sono 36,1 e 34,3 ppb, rispettivamente durante il II e III ciclo espositivo) con punte massime di 43,3 e 40,3 ppb. Così come per il sito di Sant'Eufemia a Maiella, la prima decade di luglio è risultata il periodo in cui in cui le concentrazioni giornaliere di O₃ si sono assestate su livelli più alti (e.g., i valori di M24 sono 43,9 e 44,9 ppb, rispettivamente durante il I e III ciclo espositivo) con punte massime di 55,5 e 51,4 ppb, rispettivamente durante il I e III ciclo espositivo. Altresì per il sito di Pescara, la prima decade di luglio è risultata il periodo in cui in cui le concentrazioni giornaliere di O₃ si sono assestate su livelli più alti (e.g., i valori di M24 sono 36,8 e 36,3 ppb, rispettivamente durante il I e II ciclo espositivo) con punte massime di 40,7 e 43,7 ppb.

Tabella 10. Media mobile su otto ore massima giornaliera delle concentrazioni di ozono delle 4 settimane del periodo complessivo dal 9 luglio al 5 agosto (dal mercoledì al martedì successivo) calcolate dai dati delle 4 stazioni strumentali, Cepagatti, Francavilla al Mare, Sant’Eufemia a Maiella e Pescara, della rete per il rilevamento della qualità dell’aria della Regione Abruzzo. Il superamento del livello di 120 µg m⁻³ (circa 60 ppb) è evidenziato dalla diversa campitura delle caselle. Si riportano il numero di ore giornaliere con livelli superiori o uguali a 90 ppb (corrispondenti a 180 µg m⁻³).

Cicli espositivi	giorni	Cepagatti		Francavilla al Mare		Sant’Eufemia a Maiella		Pescara	
		Max media mobile su 8 ore giorno	n. ore con [O ₃] > 90 ppb	Max media mobile su 8 ore giorno	n. ore con [O ₃] > 90 ppb	Max media mobile su 8 ore giorno	n. ore con [O ₃] > 90 ppb	Max media mobile su 8 ore giorno	n. ore con [O ₃] > 90 ppb
09/7-15/7	09/7	43,8	-	44,0	-	44,1	-	38,7	-
	10/7	50,7	-	50,6	-	52,8	-	46,8	-
	11/7	48,0	-	48,0	-	50,6	-	46,9	-
	12/7	56,6	-	N.C	-	58,3	-	57,6	-
	13/7	51,1	-	N.C	-	57,3	-	48,9	-
	14/7	50,9	-	N.C	-	54,3	-	49,4	-
	15/7	59,4	-	58,9	-	63,0	-	54,5	-
16/7-22/7	16/7	53,2	-	56,2	-	57,7	-	51,9	-
	17/7	44,0	-	49,2	-	51,5	-	44,3	-
	18/7	49,8	-	53,2	-	53,7	-	52,4	-
	19/7	51,2	-	53,0	-	54,5	-	54,9	-
	20/7	55,6	-	61,5	-	53,1	-	60,1	-
	21/7	47,4	-	49,4	-	53,3	-	50,9	-
	22/7	44,8	-	47,9	-	51,2	-	46,7	-
23/7-29/7	23/7	49,1	-	49,9	-	58,1	-	49,4	-
	24/7	54,5	-	55,4	-	56,0	-	54,2	-
	25/7	48,6	-	52,6	-	57,2	-	47,7	-
	26/7	42,6	-	46,8	-	51,1	-	47,1	-
	27/7	52,6	-	56,6	-	57,2	-	55,8	-
	28/7	42,5	-	47,6	-	51,0	-	46,9	-
	29/7	32,6	-	37,0	-	38,1	-	31,6	-
30/7-5/8	30/7	43,5	-	43,5	-	47,4	-	23,9	-
	31/7	53,7	-	54,6	-	54,7	-	32,7	-
	01/8	55,1	-	55,1	-	56,7	-	40,3	-
	02/8	53,2	-	55,8	-	49,9	-	32,7	-
	03/8	46,7	-	47,8	-	49,1	-	31,4	-
	04/8	37,7	-	41,5	-	36,4	-	24,2	-
	05/8	44,3	-	44,9	-	48,4	-	26,2	-

Tabella 11. Valori minimi (*Min*), medi (*Med*) e massimi (*Max*) di ozono dei principali parametri descrittivi giornalieri calcolati dai dati di concentrazione oraria dell'inquinante registrati dalla stazione strumentale Cepagatti della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, su base settimanale, per l'intero periodo espositivo e per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025: M24 (media delle 24 ore), M12 (media delle 12 ore di luce, dalle ore 8:00 alle ore 20:00 escluse), M7 (media delle sette ore di luce a più alto rischio, dalle ore 10:00 alle ore 16:00 comprese) e M1 (valore massimo di concentrazione registrato nelle 24 ore).

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono Cepagatti											
	M24			M12			M7			M1		
	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>
09/7-15/7	40,5	44,6	49,4	42,5	49,6	57,8	42,3	50,6	59,5	45,2	53,9	62,0
16/7-22/7	31,2	39,4	44,9	37,3	46,7	52,6	36,2	47,9	53,6	46,5	53,1	60,4
23/7-29/7	26,0	37,3	45,3	30,9	43,7	52,6	31,7	44,9	54,6	33,9	49,0	58,9
30/7-05/8	26,6	36,2	45,3	32,0	43,4	51,4	34,3	45,5	55,5	40,8	49,4	58,5
<i>Intero periodo</i> 09/7-05/8	31,1	39,4	35,7	35,7	45,9	53,6	36,1	47,2	55,8	41,6	51,4	60,0

Tabella 12. Valori minimi (*Min*), medi (*Med*) e massimi (*Max*) di ozono dei principali parametri descrittivi giornalieri calcolati dai dati di concentrazione oraria dell'inquinante registrati dalla stazione strumentale Francavilla al Mare della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, su base settimanale, per l'intero periodo espositivo e per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025: M24 (media delle 24 ore), M12 (media delle 12 ore di luce, dalle ore 8:00 alle ore 20:00 escluse), M7 (media delle sette ore di luce a più alto rischio, dalle ore 10:00 alle ore 16:00 comprese) e M1 (valore massimo di concentrazione registrato nelle 24 ore).

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono Francavilla al Mare											
	M24			M12			M7			M1		
	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>
09/7-15/7	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	42,5	62,3
16/7-22/7	31,9	36,1	43,3	45,8	50,3	57,7	46,3	52,1	57,7	50,8	56,6	69,5
23/7-29/7	33,0	36,1	40,3	35,9	46,6	53,9	36,9	48,4	55,3	38,8	52,5	59,2
30/7-05/8	30,5	34,3	37,4	38,4	45,6	53,1	39,4	48,1	55,2	43,1	51,8	58,9
<i>Intero periodo</i> 09/7-05/8	31,8	35,5	40,3	40,0	47,5	54,9	40,9	49,5	56,1	44,2	50,9	62,5

Tabella 13. Valori minimi (*Min*), medi (*Med*) e massimi (*Max*) di ozono dei principali parametri descrittivi giornalieri calcolati dai dati di concentrazione oraria dell'inquinante registrati dalla stazione strumentale Sant'Eufemia a Maiella della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, su base settimanale, per l'intero periodo espositivo e per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025: M24 (media delle 24 ore), M12 (media delle 12 ore di luce, dalle ore 8:00 alle ore 20:00 escluse), M7 (media delle sette ore di luce a più alto rischio, dalle ore 10:00 alle ore 16:00 comprese) e M1 (valore massimo di concentrazione registrato nelle 24 ore).

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono Sant'Eufemia a Maiella											
	M24			M12			M7			M1		
	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>
09/7-15/7	34,3	43,9	55,5	42,4	50,2	59,0	41,4	50,9	61,6	45,3	57,1	66,0
16/7-22/7	37,7	43,8	51,0	43,9	49,1	51,9	50,7	52,4	58,5	53,6	59,3	63,0
23/7-29/7	28,1	44,9	51,4	34,0	49,4	55,3	36,4	50,1	57,6	40,9	55,4	61,8
30/7-05/8	26,3	37,8	47,1	32,3	45,3	52,1	36,7	47,9	55,3	40,4	53,2	61,8
<i>Intero periodo</i> 09/7-05/8	31,6	42,6	51,3	38,2	48,5	54,6	41,3	50,3	58,3	45,1	56,3	63,2

Tabella 14. Valori minimi (*Min*), medi (*Med*) e massimi (*Max*) di ozono dei principali parametri descrittivi giornalieri calcolati dai dati di concentrazione oraria dell'inquinante registrati dalla stazione strumentale Pescara della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, su base settimanale, per l'intero periodo espositivo e per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025: M24 (media delle 24 ore), M12 (media delle 12 ore di luce, dalle ore 8:00 alle ore 20:00 escluse), M7 (media delle sette ore di luce a più alto rischio, dalle ore 10:00 alle ore 16:00 comprese) e M1 (valore massimo di concentrazione registrato nelle 24 ore).

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono Pescara											
	M24			M12			M7			M1		
	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Med</i>	<i>Max</i>
09/7-15/7	32,1	36,8	40,3	36,6	45,9	54,3	38,2	48,9	58,5	40,2	52,5	60,5
16/7-22/7	29,5	36,3	43,7	41,6	47,7	55,3	42,6	49,8	55,5	48,5	54,1	65,5
23/7-29/7	19,4	35,3	43,7	18,3	42,3	53,1	20,4	44,7	53,9	32,7	50,2	57,4
30/7-05/8	15,8	20,0	23,3	19,8	26,2	34,1	23,2	29,5	40,1	28,2	35,5	44,8
<i>Intero periodo</i> 09/7-05/8	24,2	32,1	37,8	29,1	40,5	49,2	31,1	43,2	52,0	37,4	48,1	57,05

Il livello massimo di concentrazione di O₃ è stato rilevato, nell'ambito dell'intero periodo, il 15 luglio 66,0 ppb (dalle ore 16:00 alle ore 17:00 nella stazione di Sant'Eufemia a Maiella) e il 20 luglio con 69,5 (dalle ore 18:00 alle ore 19:00 nella stazione di Francavilla al Mare) e 65,5 ppb (dalle ore 17:00 alle ore 18:00 nella stazione di Pescara). Sono stati presi in considerazione anche

gli indici cumulativi, ossia le AOT riferite alle soglie 0, 10, 20, 30, 40, 60 e 80 ppb espressi per ora (ppb h). Letteralmente la sigla usata sta per *Accumulated exposure Over a Threshold* cioè “esposizione accumulata superiore alla soglia” fissata in una determinata concentrazione espressa in ppb, in riferimento al Protocollo di Göteborg, nell’ambito della “*United Nations Economic Commission for Europe*” (UNECE). In particolare, a valori cumulati di AOT40 per un dato periodo sono associati i *critical level* che comportano danni e contrazioni produttive per le colture agrarie e la vegetazione spontanea (Mills *et al.*, 2010): ad esempio, il livello 3000 ppb h è indicativo per alcune colture agricole (riferimento base è il frumento), calcolato in tre mesi da maggio a luglio. Le AOT 10, 20 e 30 sono state esaminate più come indice di riferimento che di soglia per il danno. In dettaglio, nelle *Tabelle 15-18* sono sintetizzati i valori delle AOT 0, 10, 20, 30, 40, 60 e 80 calcolati settimanalmente e per tutto l’arco di tempo (dal 9 luglio al 5 agosto 2025).

Tabella 15. Andamento dei valori di AOT0, 10, 20, 30, 40, 60, 80, espressi in ppb h, calcolati dai dati di concentrazione oraria di ozono della stazione strumentale Cepagatti della rete per il rilevamento della qualità dell’aria della Regione Abruzzo, su base settimanale (dal mercoledì al martedì successivo) e per tutto l’arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell’ozono sita a Cepagatti						
	AOT0	AOT10	AOT20	AOT30	AOT40	AOT60	AOT80
09/7-15/7	4168	3328	2488	1648	817	5	0
16/7-22/7	3926	3086	2246	1426	653	0	0
23/7-29/7	3673	2833	1993	1179	508	0	0
30/7-05/8	3647	2807	1979	1184	482	0	0
<i>Intero periodo</i> 09/7-05/8	15415	12055	8706	5438	2460	5	0

Tabella 16. Andamento dei valori di AOT0, 10, 20, 30, 40, 60, 80, espressi in ppb h, calcolati dai dati di concentrazione oraria di ozono della stazione strumentale Francavilla al Mare della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, su base settimanale (dal mercoledì al martedì successivo) e per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono sita a Francavilla al Mare						
	AOT0	AOT10	AOT20	AOT30	AOT40	AOT60	AOT80
09/7-15/7	2617	2077	1537	1002	476	6	0
16/7-22/7	4221	3381	2511	1702	898	22	0
23/7-29/7	3911	3071	2231	1399	652	0	0
30/7-05/8	3831	2991	2153	1325	579	0	0
<i>Intero periodo</i> 09/7-05/8	14580	11520	8431	5428	2606	27	0

Tabella 17. Andamento dei valori di AOT0, 10, 20, 30, 40, 60, 80, espressi in ppb h, calcolati dai dati di concentrazione oraria di ozono della stazione strumentale Sant'Eufemia a Maiella della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, su base settimanale (dal mercoledì al martedì successivo) e per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono sita a Sant'Eufemia a Maiella						
	AOT0	AOT10	AOT20	AOT30	AOT40	AOT60	AOT80
09/7-15/7	4213	3373	2533	1693	878	31	0
16/7-22/7	4125	3285	2436	1623	854	8	0
23/7-29/7	4145	3305	2467	1639	863	4	0
30/7-05/8	3802	2962	2134	1331	610	4	0
<i>Intero periodo</i> 09/7-05/8	16286	12926	9570	6285	3205	47	0

Tabella 18. Andamento dei valori di AOT0, 10, 20, 30, 40, 60, 80, espressi in ppb h, calcolati dai dati di concentrazione oraria di ozono della stazione strumentale Pescara della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, su base settimanale (dal mercoledì al martedì successivo) e per tutto l'arco temporale, dal 9 luglio al 5 agosto 2025.

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono sita a Pescara						
	AOT0	AOT10	AOT20	AOT30	AOT40	AOT60	AOT80
09/7-15/7	3672	2882	2092	1309	478	1	0
16/7-22/7	4009	3169	2329	1497	707	12	0
23/7-29/7	3554	2714	1903	1190	541	0	0
30/7-05/8	2204	1369	618	160	11	0	0
Intero periodo 09/7-05/8	13439	10134	6942	4155	1738	13	0

Nella Figura 57 è visualizzato l'andamento assunto dall'AOT40.

Si osserva, anche per questo descrittore, come i maggiori livelli non siano stati raggiunti in alcuna stazione strumentale di Cepagatti con valori di AOT40 cumulata lungo l'intero periodo di studio pari a 2460 ppb h senza superamento del *critical level* di lungo periodo per le colture agrarie e la vegetazione spontanea di 3000 ppb h su tre mesi consecutivi definito per l'O₃ nell'Allegato VII del DL n. 155 del 13 agosto 2010 (quale "obiettivo a lungo termine per la protezione della vegetazione", calcolato per il periodo maggio-luglio). Nella stazione strumentale di Sant'Eufemia a Maiella il valore dell'AOT40 è risultato pari a 3205 ppb h (lungo l'intero periodo di studio) con conseguente superamento del *critical level* di lungo periodo per le colture agrarie e la vegetazione spontanea dopo 25 giorni (all'inizio del IV ciclo espositivo). Per le restanti stazioni, i livelli di AOT40 sono risultati di 2606 e 1738 ppb h (lungo l'intero periodo di studio), rispettivamente a Francavilla al Mare e Pescara, senza superamento del *critical level* di lungo periodo per le colture agrarie e la vegetazione spontanea. Da segnalare che il valore obiettivo di 9000 ppb h indicato dallo stesso DL per il 2010, come media su cinque anni, non è stato oltrepassato in nessuna delle stazioni strumentali prese in esame durante l'intero periodo espositivo.

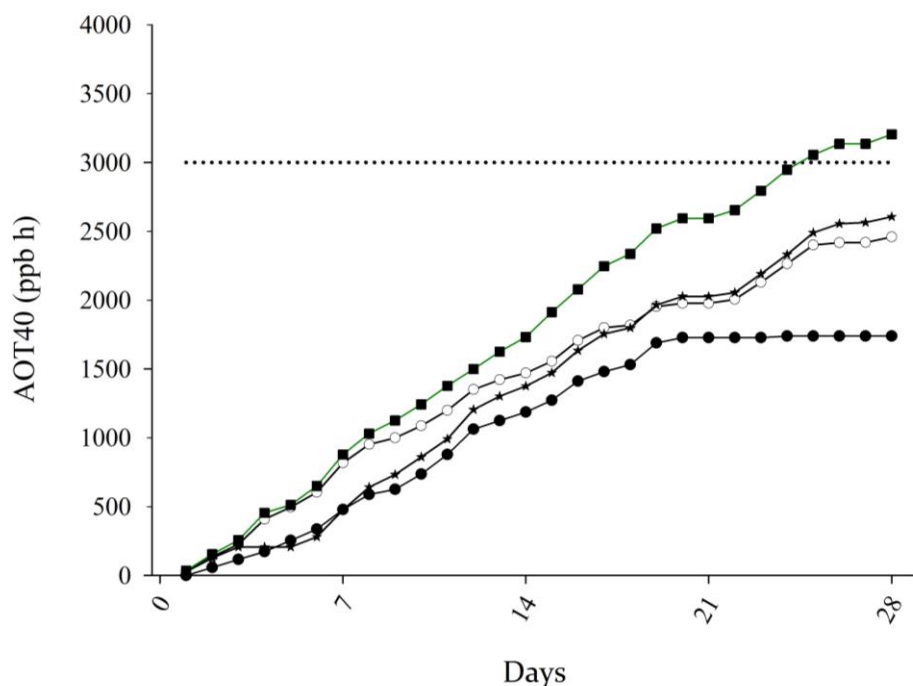


Figura 57. Andamento dei valori di AOT40 calcolati cumulativamente lungo tutto l'arco temporale dal 9 luglio (giorno 0) al 5 agosto dai dati di concentrazione oraria dell'inquinante registrati dalle stazioni strumentali, Cepagatti (○), Sant'Eufemia a Maiella (■), Francavilla a Mare (★) e Pescara (●), della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo. La linea punteggiata parallela all'asse delle ascisse corrisponde all'obiettivo a lungo termine (3000 ppb h) per la protezione della vegetazione, definito nell'Allegato VII dal Decreto Legislativo n. 155 del 13 agosto 2010.

In Tabella 19 sono mostrati gli indici di correlazione per ranghi di Spearman, che misurano il grado di associazione tra i descrittori calcolati dalle concentrazioni di O₃ e gli IDF. Da notare una forte correlazione tra i valori di IDF e M24 e M1, tra i valori di AOT40 e M12 e M7, tra i valori di M24 e M7 e M1, tra i valori di M12 e M7 e M1, tra i valori di M7 e M1.

Tabella 19. Indici di correlazione per ranghi di Spearman calcolati tra gli Indici di Danno Fogliare (IDF) e i descrittori elaborati a partire dalle concentrazioni di ozono (AOT40, M24, M12, M7 e M1) per l'intero periodo espositivo (9 luglio - 5 agosto) durante la campagna di biomonitoraggio condotta nella Regione Abruzzo, estate 2025. In grassetto sono riportati i valori con $P \leq 0,01$.

	IDF	AOT40	M24	M12	M7	M1
IDF	-	0,69	0,72	0,83	0,91	0,87
AOT40		-	0,67	0,70	0,73	0,89
M24			-	0,77	0,68	0,74
M12				-	0,96	0,89
M7					-	0,88
M1						-

4. Considerazioni conclusive

Dai risultati ottenuti dalla campagna di monitoraggio della qualità dell'aria in Abruzzo, è possibile trarre le conclusioni di seguito riportate:

- 1) monitoraggio biologico di O_3 - in ciascuna delle 4 stazioni di biorilevamento, gli indici di danno complessivo (IDC+F) hanno mostrato differenze significative tra i 4 cicli espositivi presi in esame, con un minimo registrato nel I (stazioni n. 1, 2 e 4), e un massimo nel II (stazioni n. 3) e III (stazioni n. 1) periodo espositivo, rispettivamente (*Tabella 6, Figura 18*). Tali livelli, coincidenti altresì con periodi favorenti la formazione dell'inquinante, per quanto più elevati si sono sempre attestati mediamente intorno alla soglia del valore 2. Nel restante ciclo espositivo (IV), gli indici hanno mostrato alta similarità, mantenendosi su valori relativamente contenuti ($1,41 \pm 0,060$) traducibili in un'incidenza del danno di tipo medio-bassa, seppur quasi uniformemente diffusa (*Tabella 6, Figura 18 e 20*). Complessivamente, l'andamento spaziale degli indici di danno complessivi (IDC+F) rilevati nell'intero periodo espositivo individua una scala progressiva di incidenza con livelli leggermente maggiori nei siti corrispondenti alle stazioni n. 1 (Cepagatti) e 3 (Sant'Eufemia a Maiella) rispetto quelli nell'area delle stazioni n. 2 (Francavilla al Mare) e 4 (Pescara) (*Figura 19 e 21*).
- 2) monitoraggio convenzionale di O_3 - Nel corso del periodo complessivo durante il quale è stato condotto il biomonitoraggio, il superamento del livello di 60 ppb dei valori di media mobile massima su 8 ore giornaliere si è verificato per 3 e 2 giorni per le stazioni strumentali di Cepagatti e Sant'Eufemia a Maiella, rispettivamente. Concentrazioni orarie dell'inquinante di $180 \mu g m^{-3}$ (pari a ~ 90 ppb), che corrispondono alla soglia di informazione (definita dal DL livello oltre il quale sussiste pericolo per la salute umana di alcuni gruppi sensibili, il cui raggiungimento impone di assicurare informazioni adeguate e tempestive) non sono mai state raggiunte in nessuna delle 4 stazioni strumentali [analogamente alla soglia di allarme di $240 \mu g m^{-3}$ (pari a ~ 120 ppb)]. Per quanto concerne gli indici cumulativi, il *critical level* di lungo periodo per le colture agrarie e la vegetazione spontanea di 3000 ppb h su tre mesi consecutivi definito per l' O_3 nell'Allegato VII del DL n. 155 del 13 agosto 2010, quale "obiettivo a lungo termine per la protezione della vegetazione" (calcolato per il periodo maggio-luglio), viene oltrepassato dopo 14 e 22 giorni a partire dal 9 luglio (definito tempo 0), durante il III e IV ciclo espositivo per le stazioni

strumentali di Cepagatti e Sant'Eufemia a Maiella, rispettivamente. Parallelamente, il valore obiettivo di 9000 ppb h indicato dallo stesso DL, come media su cinque anni non è stato superato. L'andamento dell'AOT40 lungo l'intero periodo di studio ha evidenziato per la stazione di Sant'Eufemia a Maiella, valori significativamente più elevati rispetto a Cepagatti e Francavilla al Mare e Pescara (3205 vs 2459 e 2605 ppb h). Decisamente inferiori i valori registrati a Pescara (1737).

- 3) Nel corso dell'intero periodo espositivo, si riscontra una buona correlazione tra i livelli d'O₃ e l'incidenza di danno riscontrata nelle stazioni prese in esame. L'apparente incongruenza, frequentemente ravvisata in letteratura nel corso di sperimentazioni condotte su vegetazione spontanea in condizioni climatiche calde e siccitose (Lorenzini et al., 2014a e 2014b), è motivata dalla complessa interazione pianta-ambiente e da un minor assorbimento dell'inquinante a livello fogliare, a seguito di una ridotta conduttanza stomatica. Esso è riscontrabile anche in adeguate condizioni di approvvigionamento idrico, per una precoce inibizione della fotosintesi in presenza di alte temperature, elevata umidità atmosferica e marcate intensità luminose, rispetto alla respirazione cellulare. Tali anomale condizioni, inoltre, possono aver alterato la risposta difensiva dell'organismo, dirottando la peculiare reazione di ipersensibilità verso esiti di tipo cronico, evinti da una clorosi generalizzata e un minor tasso di accrescimento complessivo e necrosi e/o pigmentazioni di dubbia attribuzione. Quanto emerso conferma in modo chiaro ed evidente il ruolo imprescindibile del biomonitoraggio, inteso come strumento integrante e non meramente complementare rispetto al monitoraggio convenzionale. Il principale vantaggio legato all'impiego di bioindicatori risiede nella possibilità di osservare e quantificare direttamente, in maniera immediata e non ambigua, l'effettivo impatto dell'inquinante su un sistema biologico sensibile, un impatto che non sempre risulta pienamente desumibile dai soli dati provenienti dalle postazioni strumentali o dai descrittori da essi derivati. Inoltre, il biomonitoraggio consente di estendere il controllo a un'ampia rete di micro-aree, spesso difficilmente indagabili mediante strumenti di misura tradizionali. In tale contesto, l'intensità della sintomatologia fogliare osservata nei soggetti di tabacco Bel-W3 rappresenta un indicatore particolarmente efficace, in quanto permette di valutare in modo specifico e precoce il danno indotto dall' O₃, fornendo una base solida e affidabile per la stima della sua effettiva incidenza sulle specie coltivate e spontanee presenti nell'areale di studio. È tuttavia opportuno precisare che questa risposta macroscopica riflette il reale effetto combinato delle concentrazioni ambientali dell'inquinante e delle condizioni climatiche locali, ma non può

essere automaticamente estesa o generalizzata ad altre specie vegetali, le quali presentano diversi livelli di sensibilità o tolleranza all'O₃.

5. Bibliografia

- Ashmore M.R., Bell J.N.B., Reily C.L. (1980). The distribution of phytotoxic ozone in the British Isles. *Environmental Pollution*, 1: 195-216.
- Chevone B., Manning W., Varbanov A., Krupa S. (1998). Relating ambient ozone concentrations to adverse biomass responses of white clover: a case study. *Environmental Pollution*, 103: 103-108.
- Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155 “Attuazione della direttiva 2008/50 CE relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa. *Gazzetta Ufficiale* n. 216 del 15 settembre 2010 - Supplemento Ordinario n. 127.
- Decreto Legislativo 24 dicembre 2012, n. 250 “Modifiche ed integrazioni al decreto legislativo 13 agosto 2010, n. 155, recante attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa”. *Gazzetta Ufficiale* n. 23 del 28 gennaio 2013.
- Decreto della Giunta Regionale n. 2001 del 27 dicembre 2011. Recepimento Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155 “Attuazione della direttiva 2008/50 CE relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa” – Approvazione della nuova zonizzazione e della nuova configurazione della rete di rilevamento ed indirizzi per la gestione della qualità dell’aria. Allegati: Programma di valutazione della qualità dell’aria e Zonizzazione della Regione Emilia-Romagna (articolo 3- Zonizzazione del territorio).
- Decreto della Giunta Regionale n. 1180 del 21 luglio 2014. Adozione della Proposta di Piano Aria Integrato Regionale (PAIR 2020) di cui al DL n. 155/2010.
- Decreto della Giunta Regionale n. 1392 del 28 settembre 2015. Piano Aria Integrato Regionale (PAIR 2020). Indicazioni per l’applicazione delle limitazioni alla circolazione dei veicoli privati nel centro abitato e modifiche alla proposta di piano adottata con DGR n. 1180 del 21 luglio 2014. Disposizioni relative alle misure emergenziali.
- Decreto della Giunta Regionale n. 279 del 18 ottobre 2017. Piano Aria Integrato Regionale (PAIR 2020). Misure per il miglioramento della qualità dell’aria in attuazione del PAIR 2020 e del Nuovo Accordo di Bacino Padano 2017.
- Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 maggio 2008 relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa.
- Decreto ministeriale 30 marzo 2017 “Procedure di garanzia di qualità per verificare il rispetto della qualità delle misure dell’aria ambiente, effettuate nelle stazioni delle reti di misura. *Gazzetta Ufficiale* n. 96 del 26 aprile 2017.
- Lorenzini G. (1994). A miniaturized kit for ozone biomonitoring. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 48: 1-4.
- Lorenzini G. (1999). Piante vascolari come bioindicatori della qualità dell’aria (inquinamento da ozono): proposte metodologiche. In: Piccini C., Salvati S. (eds.). *Atti del Workshop “Biomonitoraggio della qualità dell’aria sul territorio nazionale”*. Roma, 26-27 novembre

1998. ANPA, Roma, serie Atti 2: 123-143.

Lorenzini G., Nali C. (2005). Le piante e l'inquinamento dell'aria. Springer, Milano.

Lorenzini G., Nali C., Panicucci A. (1994). Surface ozone in Pisa (Italy): a six-years study. *Atmospheric Environment*, 19: 3155-3164.

Lorenzini G., Pellegrini E., Campanella A., Nali C. (2014a). It's not just the heat and the drought: the role of ozone air pollution in the 2012 heat wave. *Agrochimica*, 58: 40-52.

Lorenzini G., Pellegrini E., Nali C. (2014b). Summer heat waves, agriculture, forestry and related issues: an introduction (*Editorial*). *Agrochimica*, 58: 3-19.

Mills G., Pleijel H., Büker P., Braun S., Emberson L., Harmens H., Hayes F, Simpson D., Grünhage L., Karlsson P.E., Danielsson H., Bermejo V., Gonzalez Fernandez I. (2010). Mapping critical levels for vegetation. Revision undertaken in Summer 2010 to include new flux-based critical levels and response functions for ozone, In: Mapping Manual 2004. International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops. On line http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/mapping_manual.html: 1-114.

Pellegrini E., Campanella A., Lorenzini G., Nali C. (2014). Biomonitoring of ozone: a tool to initiate the young people into the scientific method and environmental issues. A case study in central Italy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13: 800-805.

Sanz M.J., Sanz F., Calatayud V., Sanchez-Peña, G. (2007). Ozone in Spain's national parks and protected forests. *The Scientific World JOURNAL* 7: 67-77.