Studio di biomonitoraggio dell'ozono in Abruzzo attraverso l'utilizzo *kit* miniaturizzati di *Nicotiana tabacum*

Anno 2023

Relazione conclusiva

Dott. Sebastiano Bianco

Dott.ssa Donatella Rosoni

Prof.ssa Elisa Pellegrini

Pisa, Ottobre 2023

Indice

Premessa 3

1. Biomonitoraggio dell'ozono troposferico (attività 2023) 5

1.1. Allevamento delle piante bioindicatrici 5

1.2. Esposizione dei bioindicatori 8

1.3. Stima ed esito delle risposte biologiche 16

1.4. Scostamenti dal protocollo ANPA 25

2. Parametri meteo-climatici 26

3. Monitoraggio strumentale dell'ozono troposferico (attività 2023) 48

3.1. Normativa di riferimento 48

3.2. Stazioni di rilevamento strumentale 50

3.3. Elaborazione ed esito dei dati strumentali 51

4. Considerazioni conclusive 61

5. Bibliografia 63

Premessa

Da decenni l'ozono (O_3) 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 quali-quantitative legate per lo più a effetti subliminali a carico delle membrane e dell'apparato fotosintetico. Nonostante che i meccanismi di formazione dell'O_3 (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'O_3 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'O_3 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 O_3 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'O_3, 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 2023)

1.1. Allevamento delle piante bioindicatrici

L'allevamento dei germinelli di tabacco dei biosensori (cvv. Bel-W3, O_3-sensibile, e Bel-B, O_3-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 igro-termiche controllate (temperatura di 20-23 °C; umidità relativa al 70-80%; fotoperiodo di 14 ore; intensità luminosa di 500-550 μmol m^{-2} 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 O_3-sensibile; A3, B3, B4, C2, C5, D1 e D6 per quella resistente.

Tabella 1. Disposizione dei germinelli di tabacco delle cvv. Bel-W3, O_3-sensibile (simbolo: S), e Bel-B, O_3-resistente (simbolo: R) nel *kit*. Il simbolo ○ 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	○	R	S
D	R	S	S	S	S	R

Per consentire l'adattamento post-trapianto e nel contempo 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*, rigorosamente ventilati con aria O_3-esente immessa da un sistema forzato di filtraggio a carboni attivi dislocati all'interno dell'infrastruttura della serra (*Figura 3*).

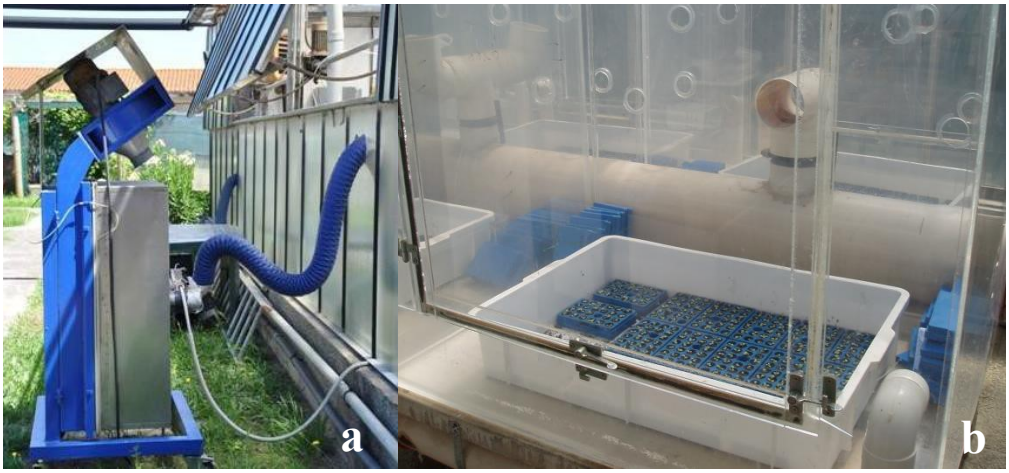

Figura 3. Adattamento e crescita dei germinelli in idonei ambienti presso le serre del DiSAAA-a dell'Università di Pisa: *a)* sistema di filtraggio di aria a carbone attivo e *b) box* in *plexiglass* ad aria filtrata contenente *kit* allestiti in fase di post-trapianto.

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 12 luglio all'8 agosto 2023. 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 dal 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 a livello normativo; 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 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 e include sei Comuni (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 km^{-2}. Il restante territorio abruzzese è stato suddiviso in due zone denominate rispettivamente: "Zona a maggiore pressione antropica" (Cod. IT 1306; circa 760000 abitanti, Comuni di Aquila e Teramo e altri 109, 228 abitanti km^{-2}) e "Zona a minore pressione antropica" (Cod. IT 1307; circa 238000 abitanti, 188 comuni, abitanti km^{-2}). Di seguito viene riportata la cartina della Regione Abruzzo con indicate le posizioni delle stazioni di misurazione. Sono riportate con colorazioni diverse le aree corrispondenti all'Agglomerato Chieti Pescara (in rosso), alla Zona a maggiore e minore pressione antropica (in azzurro e in verde, rispettivamente; *Figura 4*).

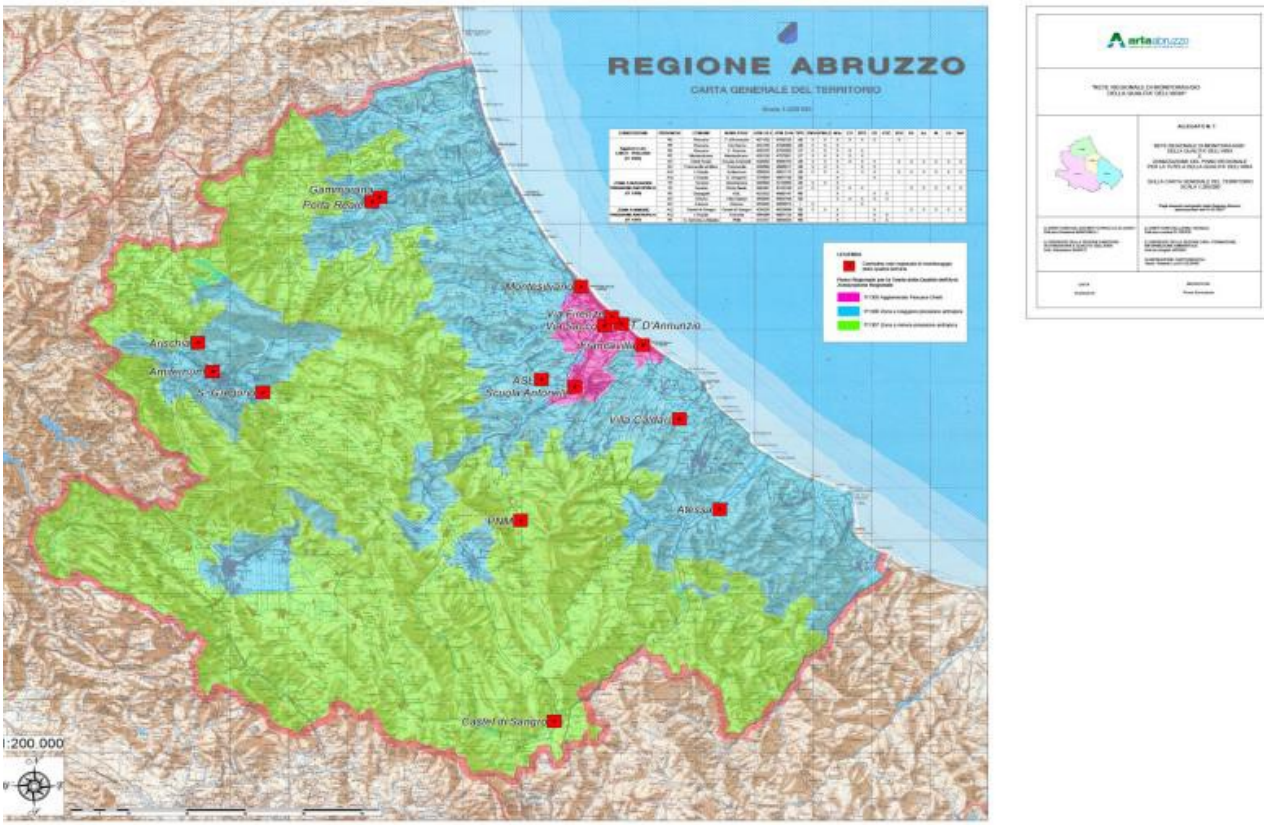

Figura 4. Zonizzazione del territorio ai fini della valutazione della qualità dell'aria adottata dalla Regione Abruzzo.

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.T.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 macroscala 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 sottoposte 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.T.A. ha presentato la proposta di zonizzazione per la protezione della vegetazione 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 km^{-2}), 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'O_3 è ritenuto il contaminante gassoso di potenziale maggiore pericolosità per la vegetazione agraria, seminaturale, forestale e per il verde urbano. Esistono i dati sulle osservazioni chimiche dirette ma non sui suoi effetti sulla vegetazione in Abruzzo. A tal proposito l'A.R.T.A. in collaborazione con il DiSAAA-a dell'Università di Pisa ha effettuato, nel territorio Chieti-Pescara durante il periodo estivo tra luglio e agosto 2023, uno studio di biomonitoraggio dell'ozono. Le stazioni di monitoraggio di Cepagatti, Francavilla al Mare, Sant'Eufemia a Maiella e Pescara sono state scelte in quanto rappresentanti delle diverse tipologie di zonizzazione della qualità dell'aria, oltretutto aree ricoperte anche da vegetazione forestale, agricola, semi-naturale, e da verde urbano. 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*.

Nelle *Figure 5-8*, 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*.

Tabella 2. Località individuate nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo in cui sono state predisposte nell'anno 2023 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 (CH)	Distretto sanitario ASL di Cepagatti	Fissa-Fondo (*Background*) Rurale	Maggiore Pressione Antropica	135 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	6 m s.l.m.	14°16'45.08"E 42°25'17.03"N
3	Sant'Eufemia a Maiella (PE)	Giardino Botanico "Daniela Brescia"	Fissa-Fondo (*Background*) Rurale	Minore Pressione Antropica	911 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	3 m s.l.m.	14°13'01.98"E 42°27'40.70"N

Figura 5. Stazione n. 1 (Cepagatti, CH) predisposta per la campagna 2023 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico e individuata nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo.

Figura 6. Stazione n. 2 (Francavilla al Mare, CH).

Figura 7. Stazione n. 3 (Sant'Eufemia a Maiella, Pescara).

Figura 8. Stazione n. 4 (Pescara, Laboratorio mobile).

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*). Quest'ultime sono consistite 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*).

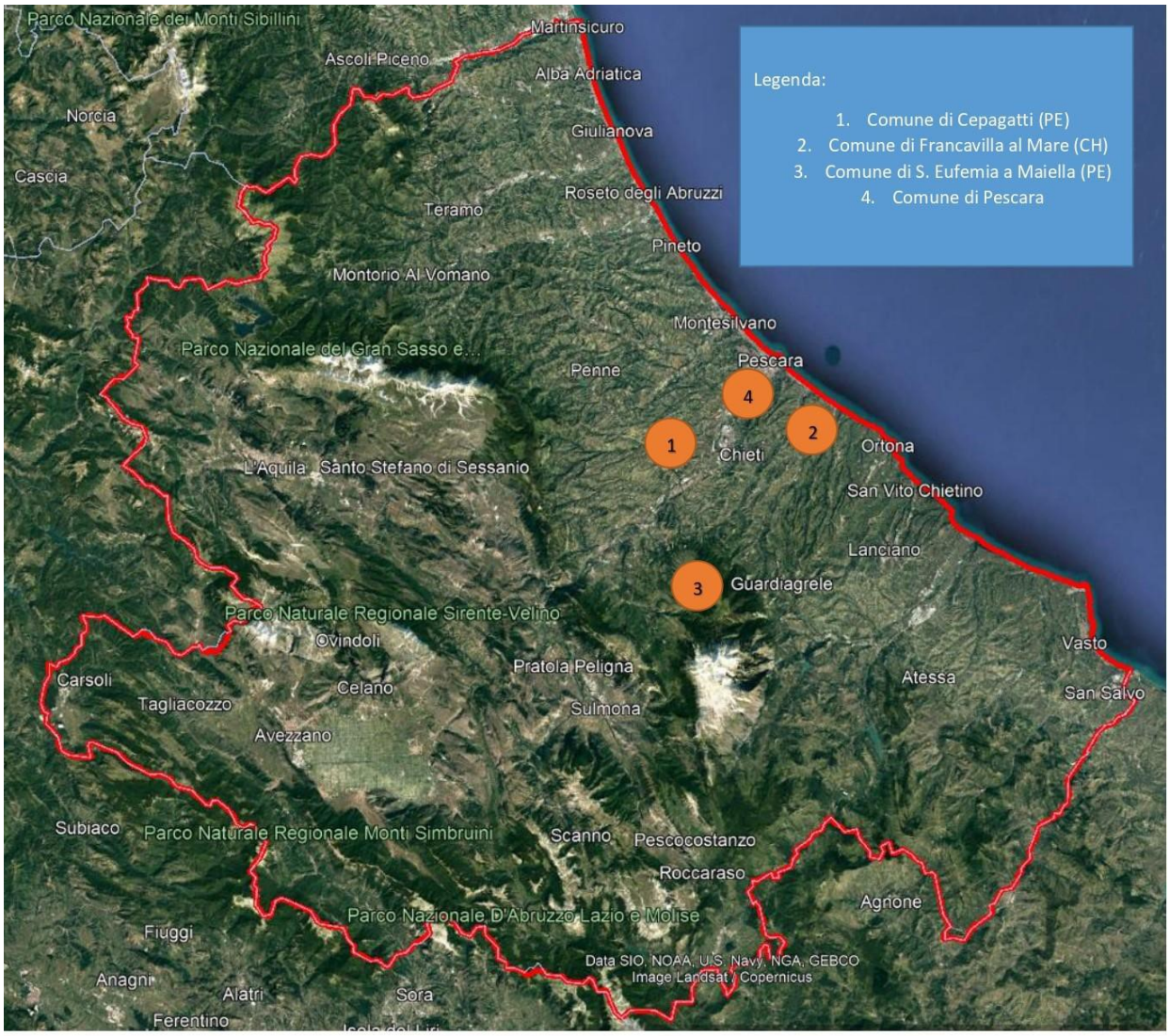

Figura 9. Mappa riproducente la distribuzione spaziale delle quattro stazioni (contrassegnate da un numero e dal simbolo arancione: ●) individuate nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo.

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

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.

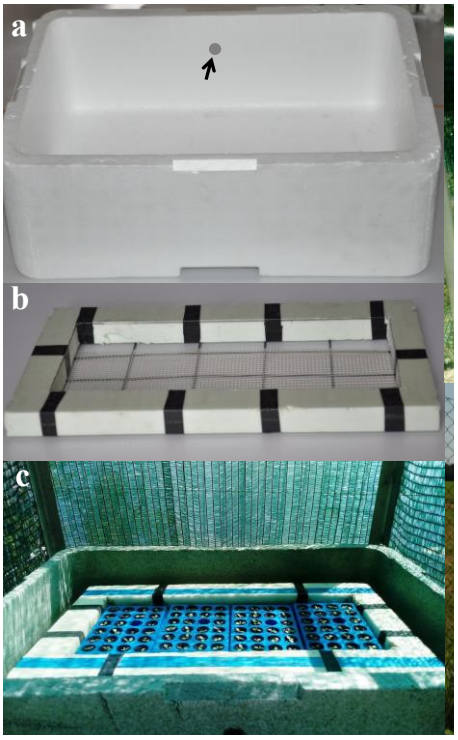

Figura 11. Attrezzature riproducenti un sistema a *reservoir* in cui collocare i *kit* da esporre: *a)* contenitore in polistirolo a sezione rettangolare (37×52 cm di lato; 18 cm di altezza) da riempire per circa 2/3 di acqua, fornito di opportuno foro di drenaggio; *b)* struttura galleggiante; *c) set* 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 12 luglio all'8 agosto 2023. 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*. 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.T.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.

Tabella 3. Piano cronologico dei sopralluoghi effettuati dal personale ARTA 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 12 luglio all'8 agosto 2023

Data	Oggetto del sopralluogo
11 luglio	allestimento delle stazioni di biorilevamento
12 luglio	collocazione I *set* espositivo di bioindicatori
18 luglio	ritiro I *set* espositivo
19 luglio	collocazione II *set* espositivo
25 luglio	ritiro II *set* espositivo
26 luglio	collocazione III *set* espositivo
1 agosto	ritiro III *set* espositivo
2 agosto	collocazione IV *set* espositivo
8 agosto	ritiro IV *set* espositivo e smantellamento delle attrezzature

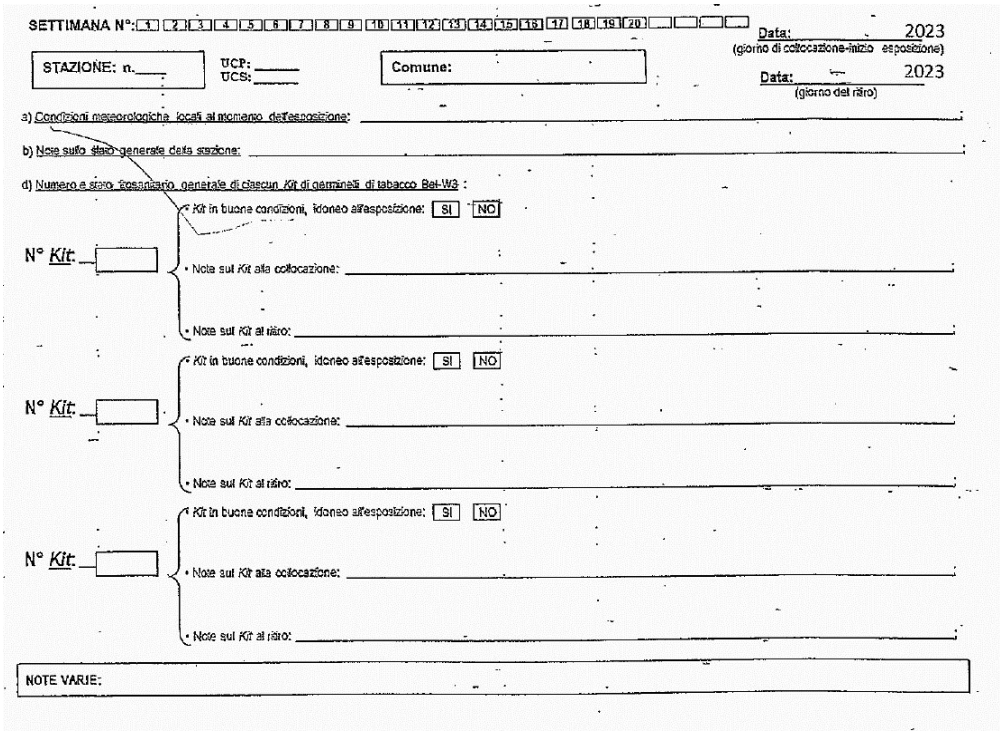

Figura 12. Scheda compilata dal personale dell'A.R.T.A. della Regione Abruzzo nei sopralluoghi effettuati per la collocazione e il ritiro dei *kit* presso le stazioni di biorilevamento nel corso della campagna di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, condotto dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

1.3. Stima ed esito delle risposte biologiche

In accordo con il protocollo ANPA (Lorenzini, 1999), il biomonitoraggio attivo dell'O_3 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 O_3-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.T.A: e lo stesso acquisito in formato elettronico: sono evidenti i sintomi da O_3.

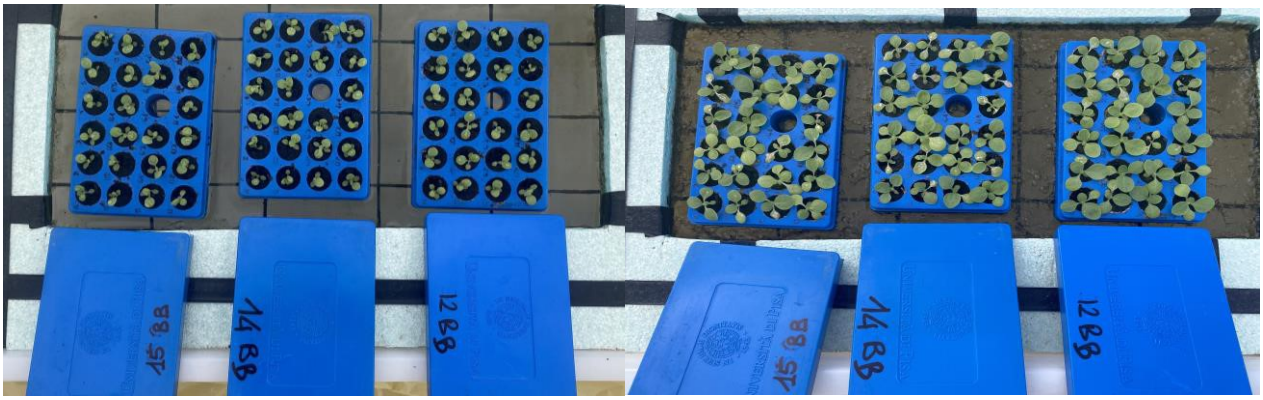

Figura 13. Aspetto generale dei germinelli di tabacco di un *set* di *kit* esposti: all'inizio (a sinistra) e alla fine (a destra) di uno dei quattro cicli di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, condotto dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

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*).

Figura 14. Esempio di germinelli di *Nicotiana tabacum* senza o con sintomi tipici da esposizione a ozono, rilevati nel corso della campagna di biomonitoraggio 2023 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 ÷ 10%); 2 = media (> 10 ÷ 25%); 3 = alta (> 25 ÷ 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 esulate dal conteggio ovviamente 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):

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

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 dall'operatore di A.R.T.A. 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 0,81 ($P < 0{,}001$), 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.

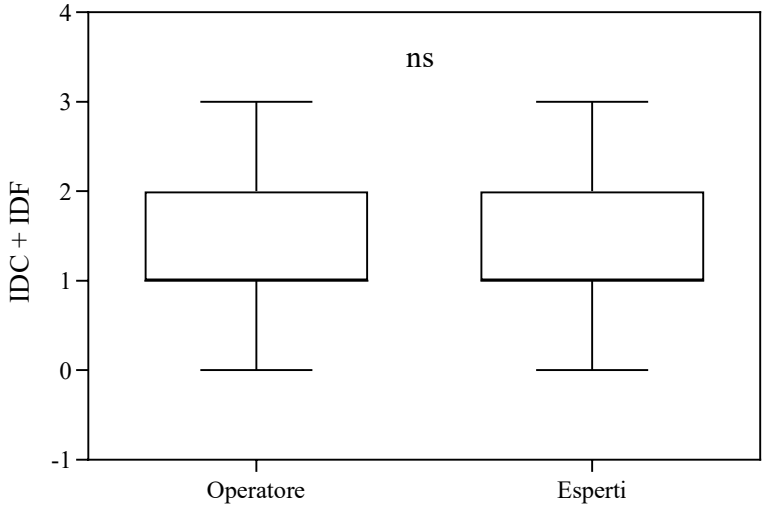

Figura 15. Indici di Danno Cotiledonari (IDC) e Indici di Danno Fogliare (IDF) di germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 attribuiti alle foglie cotiledonari e alla prima foglia vera dall'operatore di A.R.T.A. e dal personale del DiSAAA-a al termine dell'intero periodo espositivo (12 luglio - 8 agosto 2023). 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: $P > 0{,}05$).

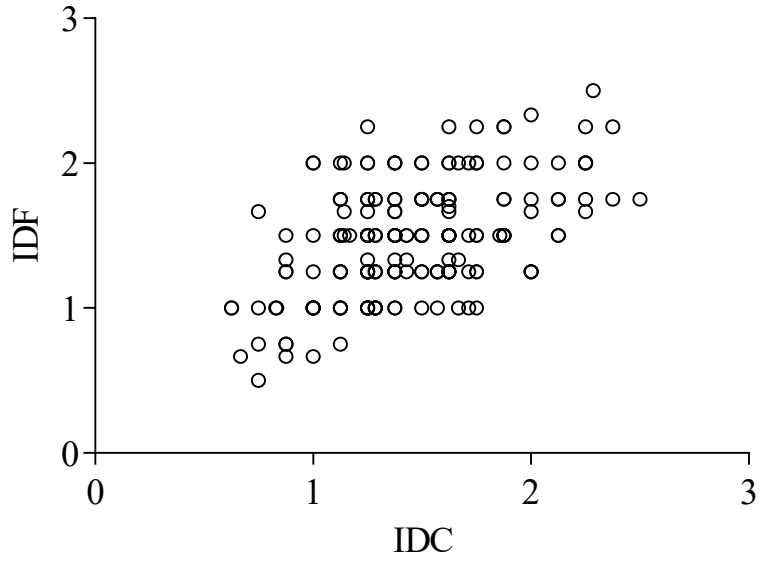

Figura 16. Correlazione tra gli Indici di Danno Cotiledonari (IDC) attribuiti alle foglie cotiledonari e gli Indici di Danno Fogliare (IDF) assegnati alla prima foglia vera (IDF) di germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 dei 48 *kit* complessivamente esposti a cadenza settimanale nelle quattro stazioni di biorilevamento dal 12 luglio all'8 agosto nel corso della campagna 2023 di biomonitoraggio dell'ozono troposferico nell'ambito della rete di rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo; coefficiente di correlazione di *Pearson* r = 0,81 ($P < 0,001$).

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 ± 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+F) medi sono stati calcolati:

i) su un totale di 48 germinelli Bel-W3 collocati e, quindi, di 192 lamine fogliari O_3-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 O_3-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 O_3-sensibili esposte, per tutta l'area monitorata rappresentata dalle quattro stazioni per ciascuno dei 4 cicli espositivi (*Tabella 6*).

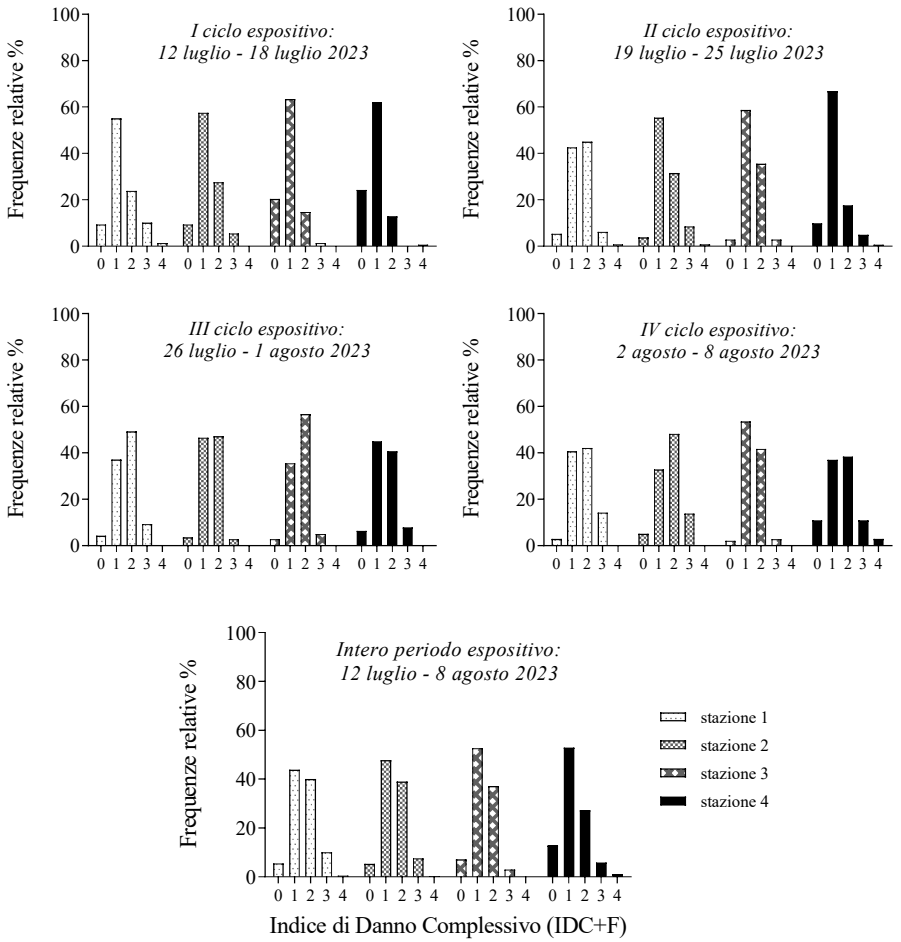

Figura 17. Frequenza relativa degli Indici di Danno Complessivo [ottenuti dalla somma di quelli cotiledonari (IDC, attribuiti alle foglie cotiledonari) e fogliari (IDF, assegnati alla prima foglia vera)] di germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 esposti in ciascuna stazione di biorilevamento in ogni ciclo e per l'intero periodo espositivo (dal 12 luglio all'8 agosto 2023) nel corso della campagna 2023 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 ± 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 2023 di biomonitoraggio (per un totale di 192 lamine fogliari) condotta dal 12 luglio all'8 agosto.

Cicli espositivi	*Stazioni*	*1*	*2*	*3*	*4*
12/7-18/7 (I)	IDC+F	1,39	1,29	0,97	0,91
	±*SEM*	*±0,072*	*±0,063*	*±0,054*	*±0,055*
19/7-25/7 (II)	IDC+F	1,54	1,47	1,38	1,20
	±*SEM*	*±0,064*	*±0,065*	*±0,051*	*±0,059*
26/7-1/8 (III)	IDC+F	1,64	1,49	1,64	1,50
	±*SEM*	*±0,060*	*±0,051*	*±0,053*	*±0,062*
2/8-8/8 (IV)	IDC+F	1,68	1,71	1,45	1,58
	±*SEM*	*±0,064*	*±0,066*	*±0,049*	*±0,079*

Tabella 5. Indice di Danno Complessivo (Cotiledonare e Fogliare; IDC+F), espresso come media ± 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 2023 di biomonitoraggio (per un totale di 768 lamine fogliari) condotta dal 12 luglio all'8 agosto.

Stazioni	IDC+F	±*SEM*
1	1,56	*±0,033*
2	1,49	*±0,031*
3	1,35	*±0,028*
4	1,29	*±0,034*

Tabella 6. Indice di Danno Complessivo (Cotiledonare e Fogliare; IDC+F), espresso come media ± 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 2023 di biomonitoraggio (per un totale di 768 lamine fogliari) condotta dal 12 luglio all'8 agosto.

Cicli espositivi	*IDC+F*	±*SEM*
12/7-18/7 (I)	1,14	*±0,061*
19/7-25/7 (II)	1,40	*±0,060*
26/7-1/8 (III)	1,57	*±0,057*
2/8-8/8 (IV)	1,60	*±0,064*

I valori di IDC+F calcolati per singola stazione per ciascuno dei 4 cicli espositivi e per l'intero periodo espositivo (12 luglio – 8 agosto) sono stati analizzati mediante ANOVA a una via (*post-test* Bonferroni) e riprodotti in forma di istogrammi in *Figura 18 e 19*.

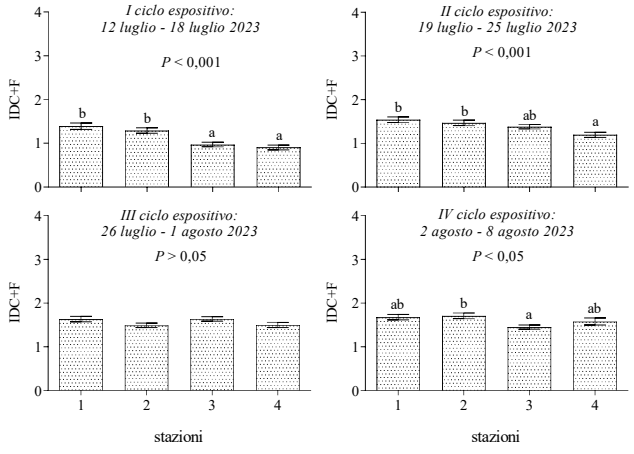

Figura 18. Istogrammi degli Indici di Danno Complessivo (Cotiledonare e Fogliare; IDC+F), espressi come media ± errore *standard* della media (*SEM*), calcolati per singola stazione e per ciascuno dei 4 cicli espositivi, rilevati su germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 nell'intero periodo espositivo della campagna 2023 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 ($P < 0,05$).

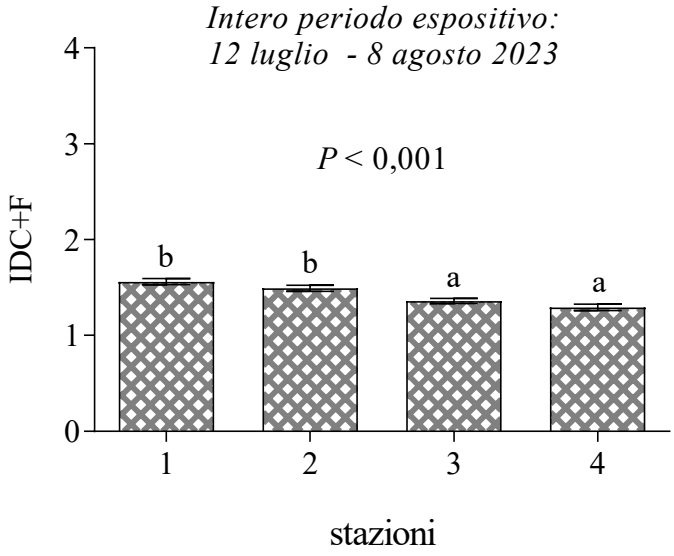

Figura 19. Istogrammi degli Indici di Danno Complessivo (Cotiledonare e Fogliare; IDC+F), espressi come media ± errore *standard* della media (*SEM*), calcolati per singola stazione per l'intero periodo espositivo (12 luglio – 8 agosto), rilevati su germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 nell'intero periodo espositivo della campagna 2023 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 (1,14±0,061, 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 in tutte le stazioni (1,57±0,057 e 1,60±0,064, 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 (1,40±0,060) 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.

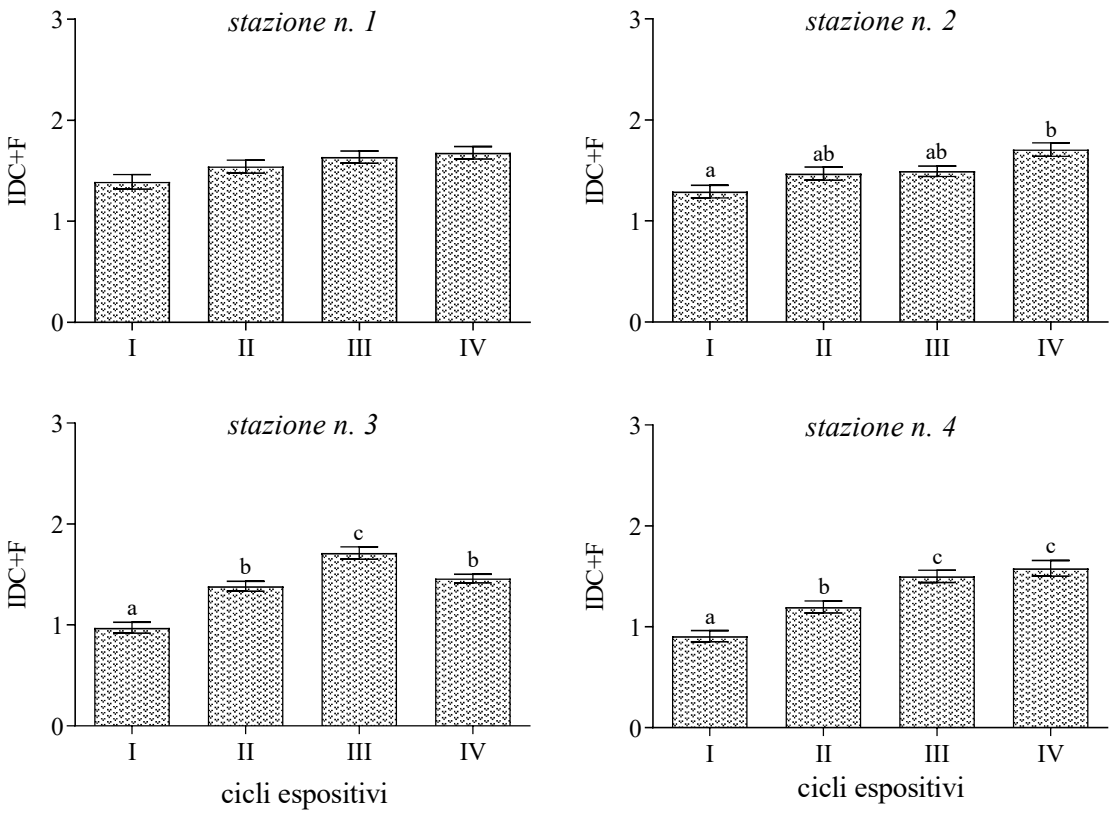

Figura 20. Evoluzione degli Indici di Danno Cotiledonare e Fogliare (IDC+F), espressi come media ± errore *standard* della media (*SEM*), rilevati su germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 in ciascuna stazione di biorilevamento nei 4 cicli espositivi dal 12 luglio all'8 agosto, nel corso della campagna 2023 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 maggiori nei siti corrispondenti alle stazioni n. 1 e 2 (1,56±0,033 e 1,49±0,031, 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) rispetti a quelli ottenuti nell'area delle stazioni n. 3 e 4 (1,35±0,028 e 1,29±0,034).

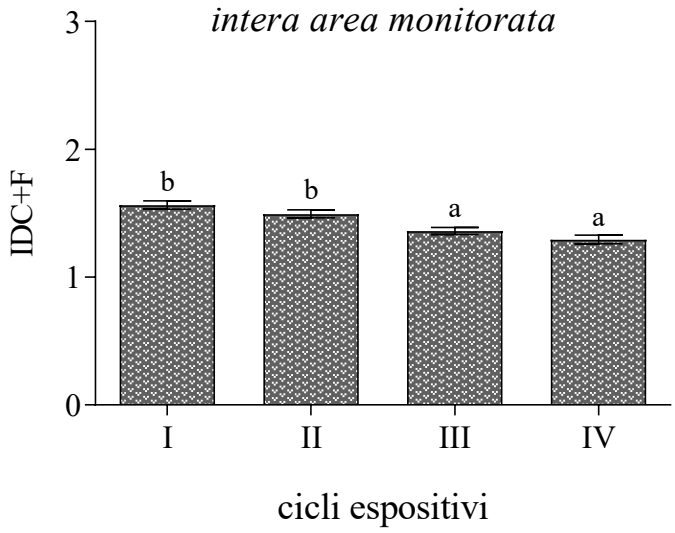

Figura 21. Evoluzione degli Indici di Danno Cotiledonare e Fogliare (IDC+F), espressi come media ± errore *standard* della media (*SEM*), rilevati su germinelli di *Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3 nell'intera area monitorata nei 4 cicli espositivi dal 12 luglio all'8 agosto, nel corso della campagna 2023 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 2023 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 *kit*	≠[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 *kit* all'interno della stazione	=
	Sostituzione dei *kit*	=
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 12 luglio all'8 agosto 2023, 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 12 luglio all'8 agosto 2023) rende pienamente rappresentativi di quest'ultimo i cicli considerati nel loro insieme.

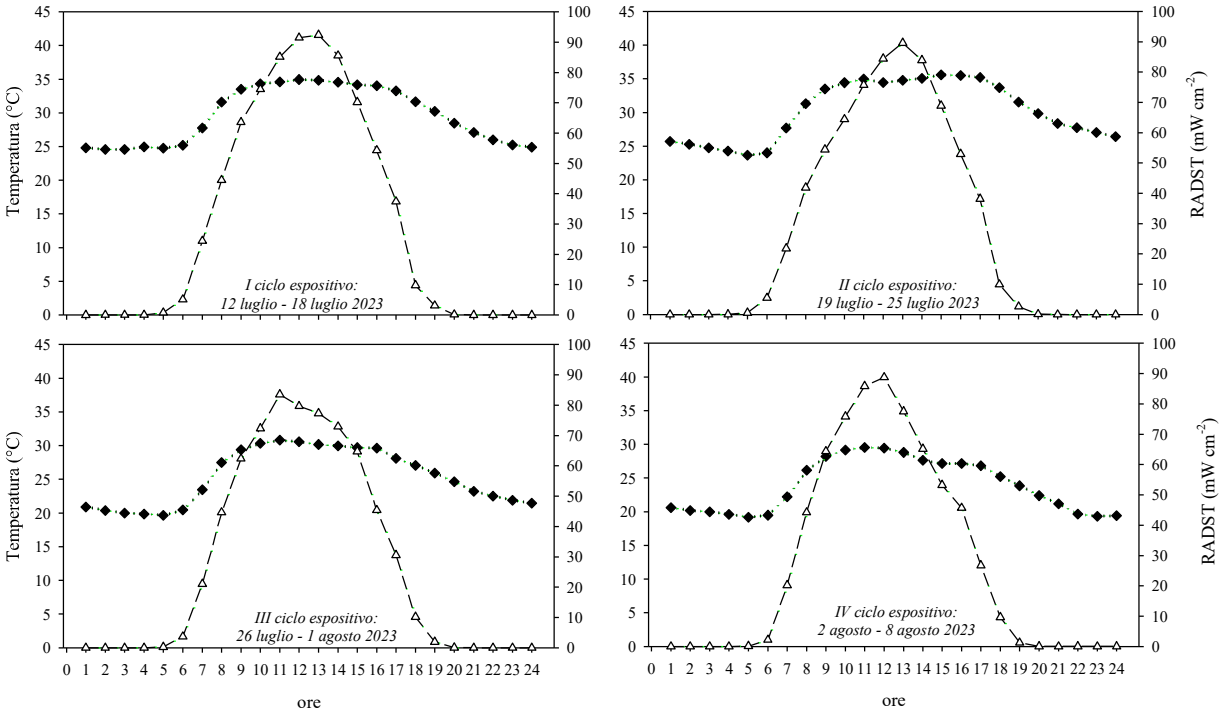

Figura 22. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo , sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

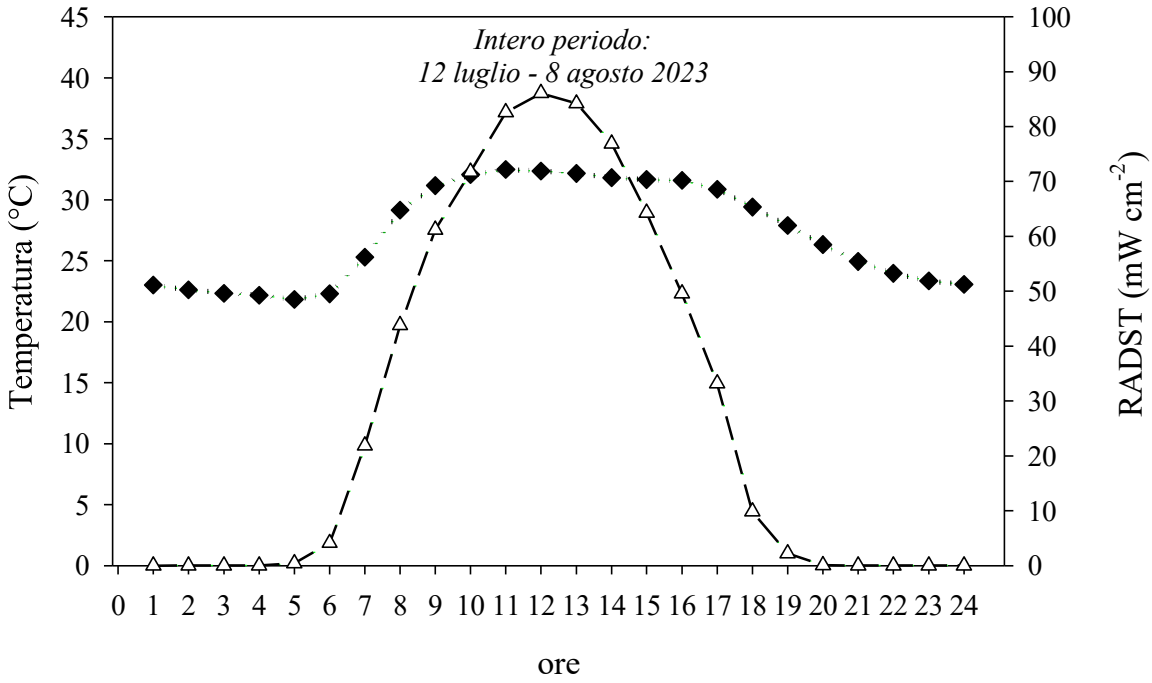

Figura 23. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo , sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), per l'intero periodo espositivo, dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

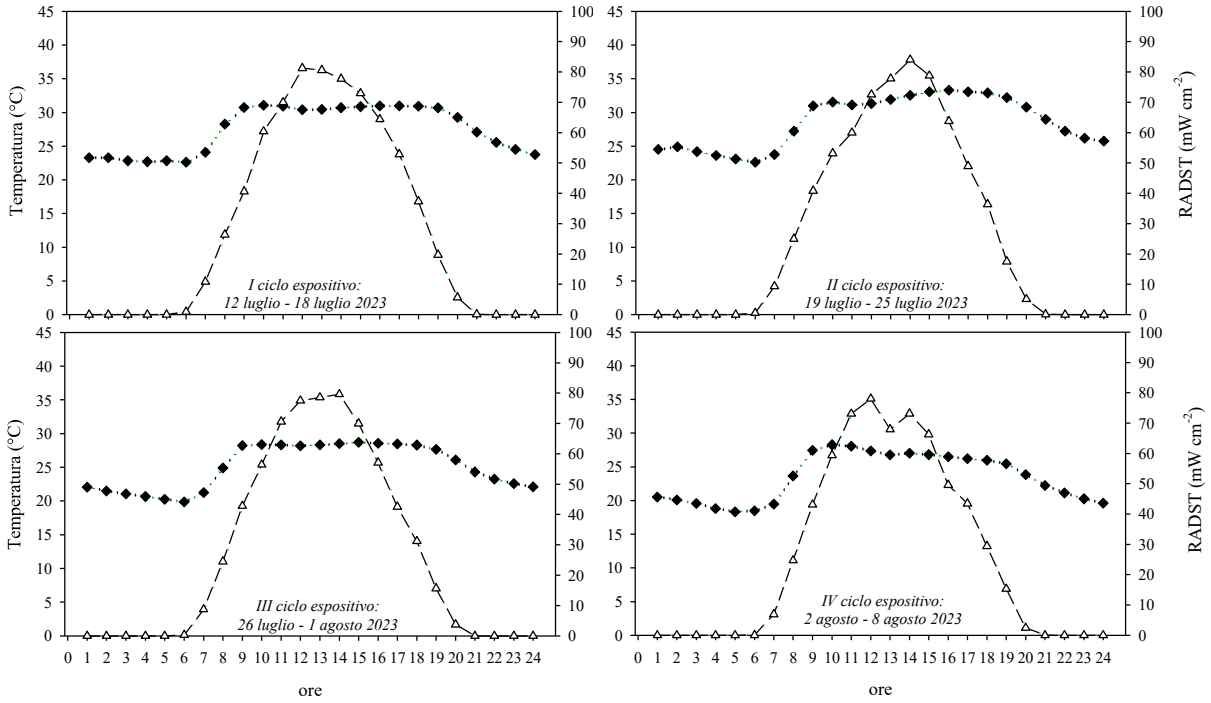

Figura 24. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo , sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

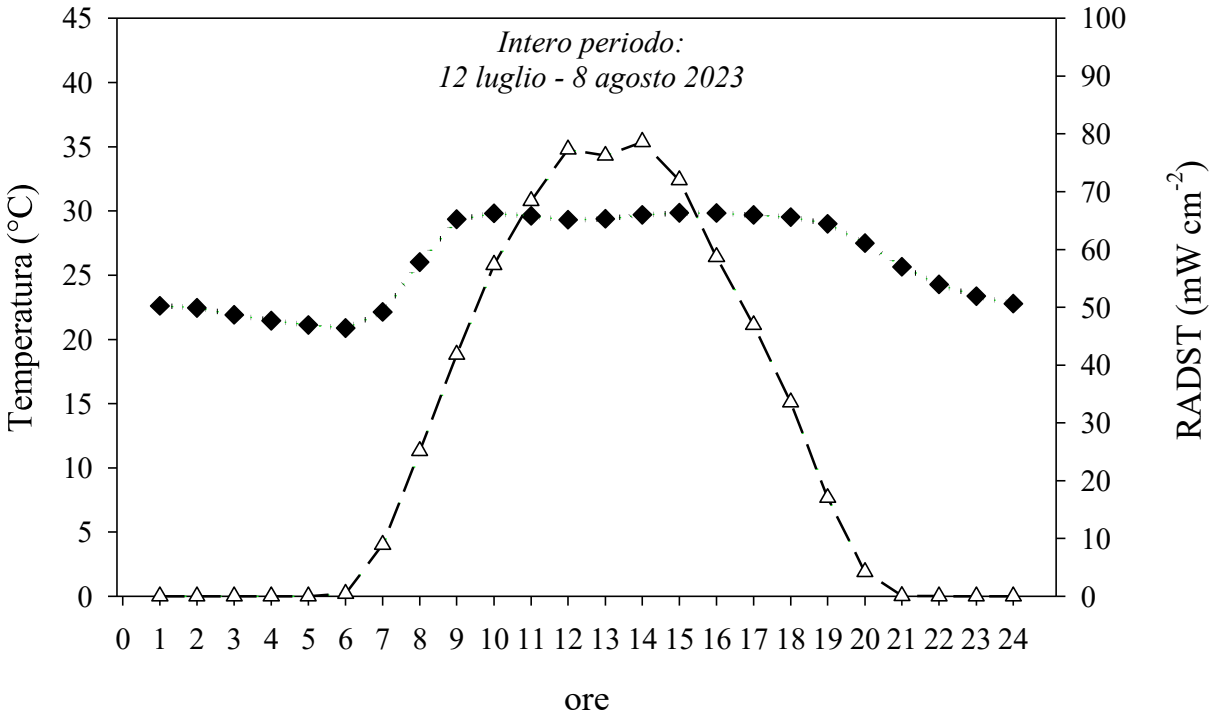

Figura 25. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo a , sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), per l'intero periodo espositivo, dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

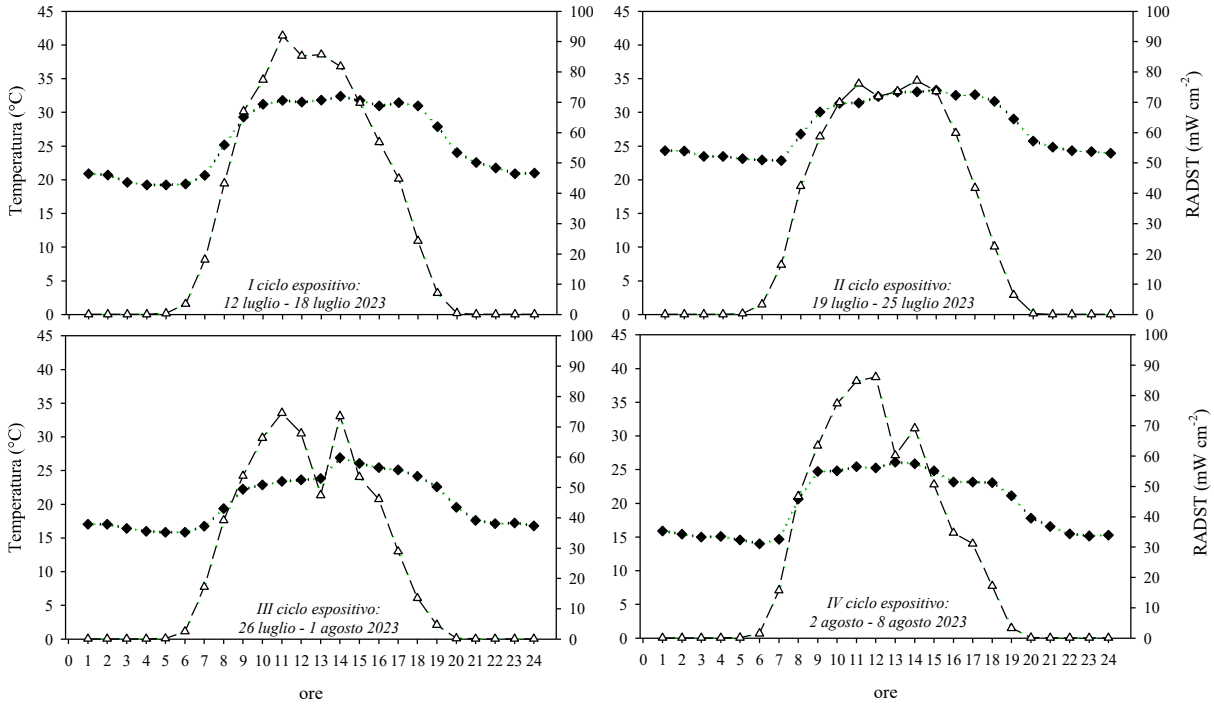

Figura 26. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

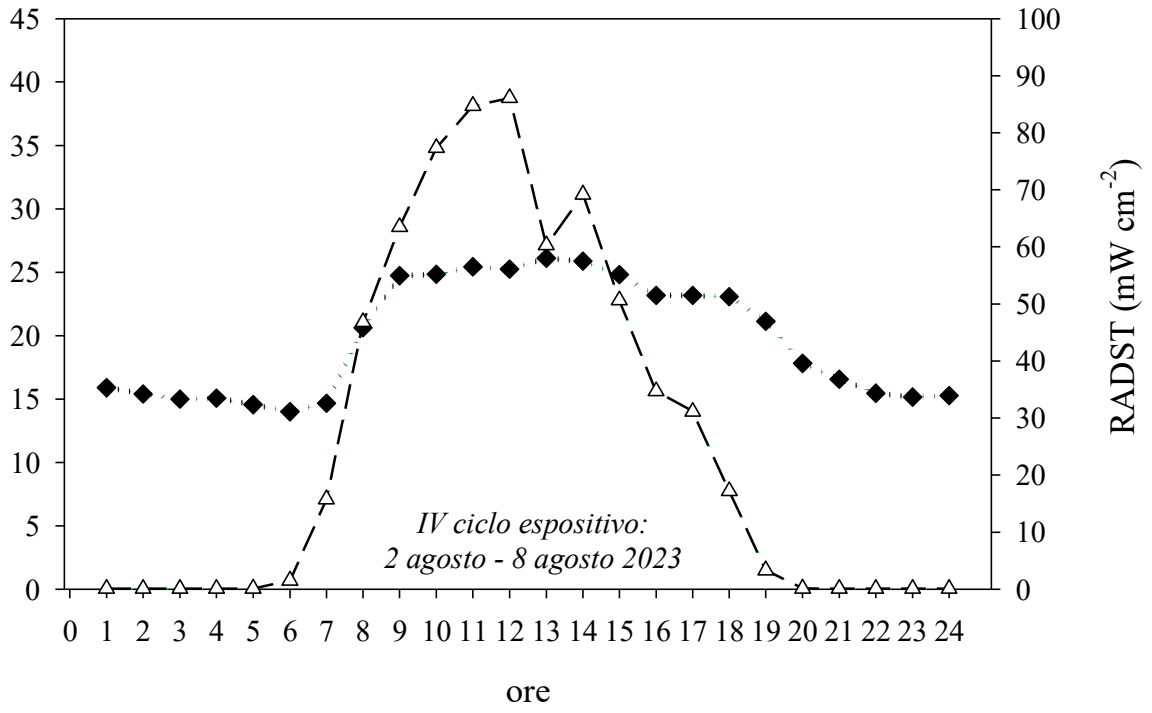

Figura 27. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo , sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), per l'intero periodo espositivo, dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

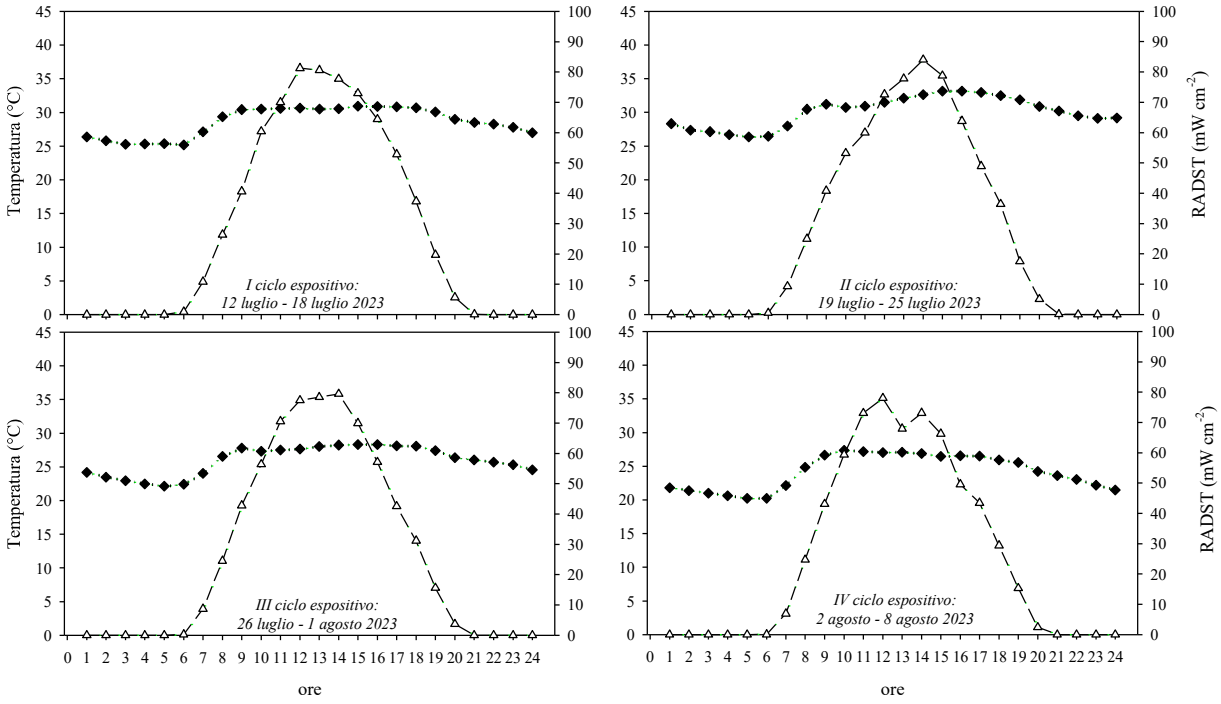

Figura 28. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo , sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

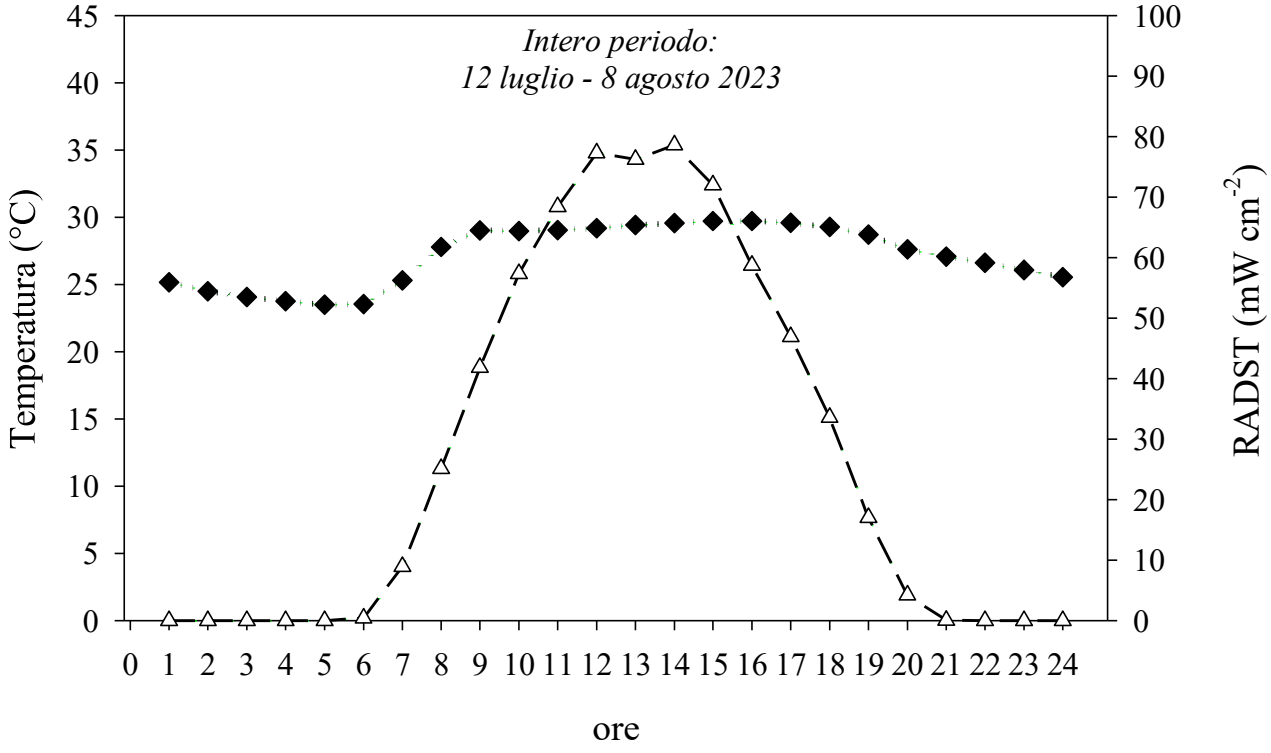

Figura 29. Profili orari medi di una giornata tipo della temperatura (◆) e della radiazione solare totale (RADST; Δ) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo , sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), per l'intero periodo espositivo, dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

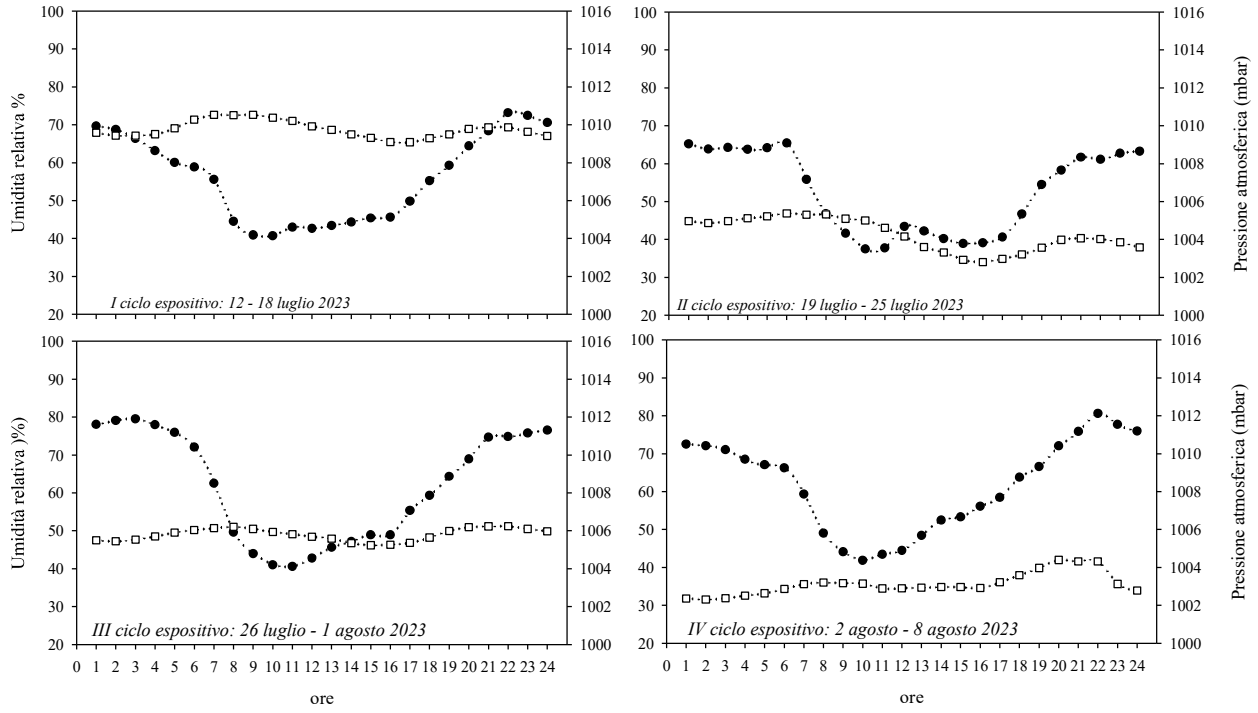

Figura 30. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

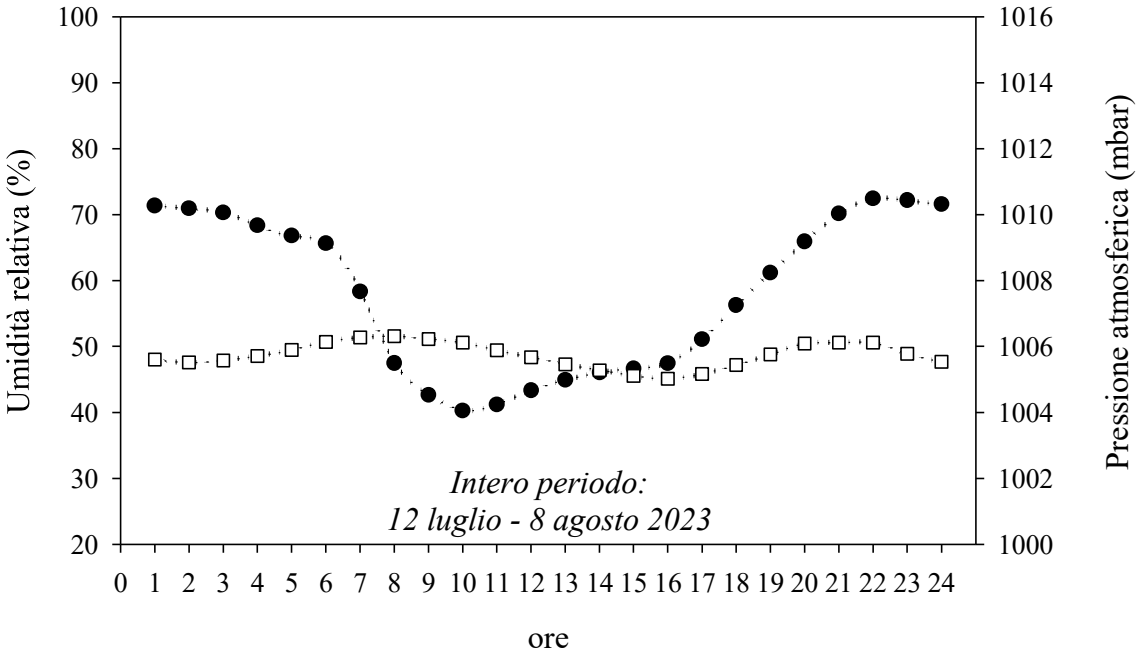

Figura 31. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023. Dati grezzi barometrici (Codice Stazione: 741500) forniti dal Centro Funzionale e Ufficio Idrologia, Idrografico, Mareografico- Agenzia di Protezione Civile della Regione Abruzzo.

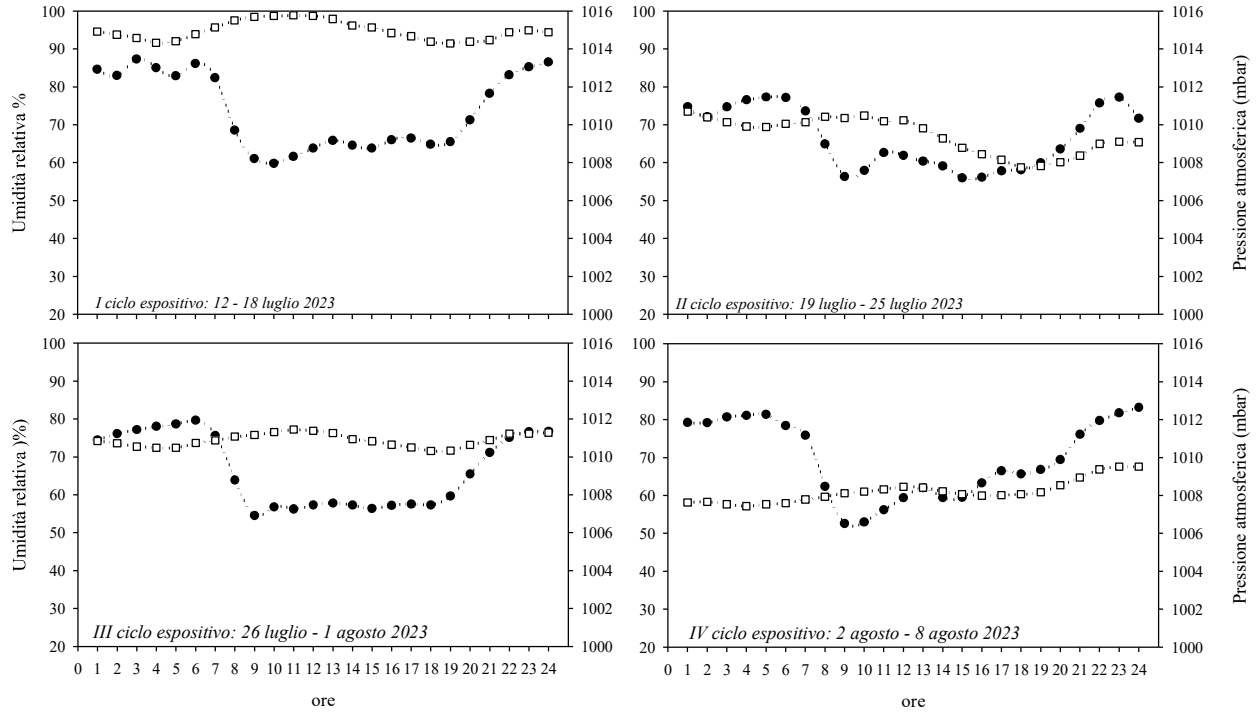

Figura 32. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

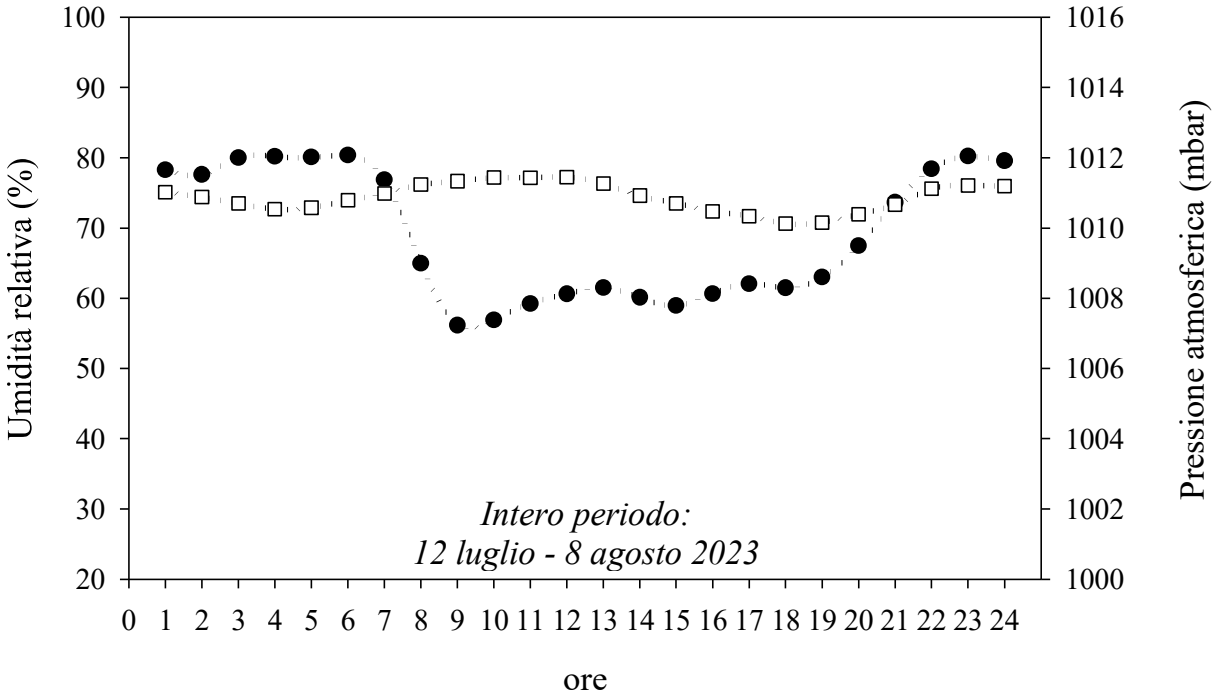

Figura 33. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

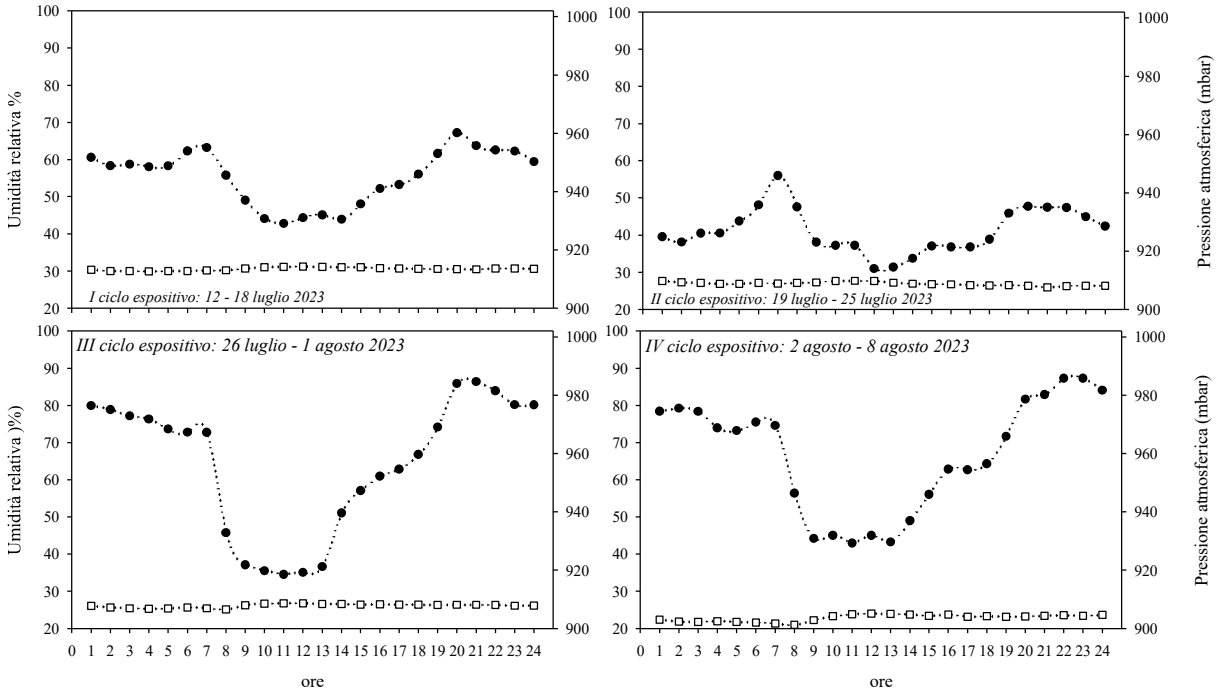

Figura 34. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023. Dati grezzi barometrici (Codice Stazione476400), forniti dal Centro Funzionale e Ufficio Idrogeologia, Idrografico, Mareografico-Agenzia di Protezione Civile della Regione Abruzzo)

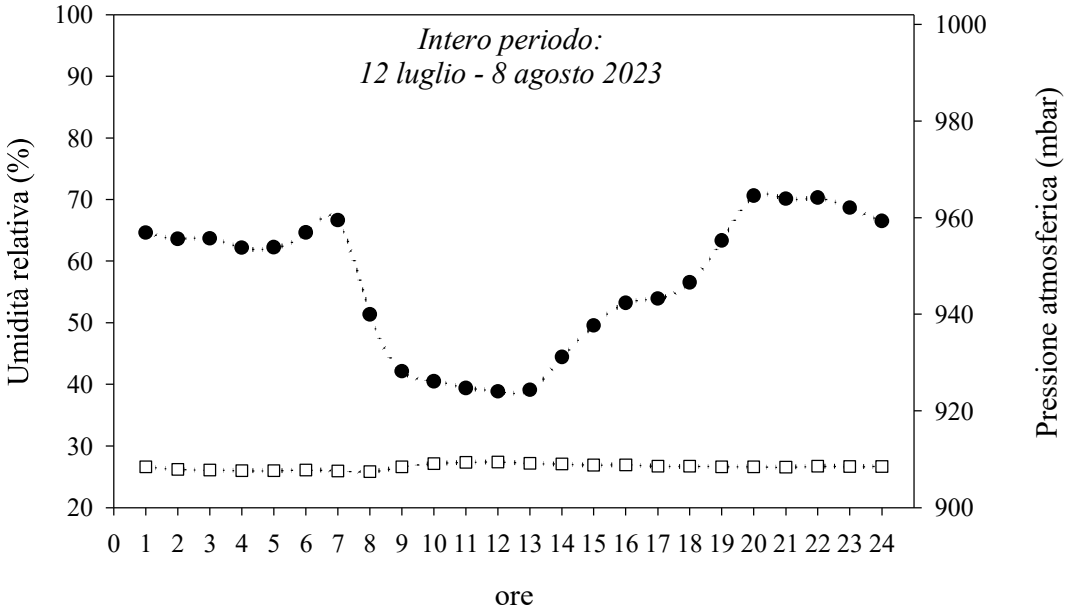

Figura 35. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

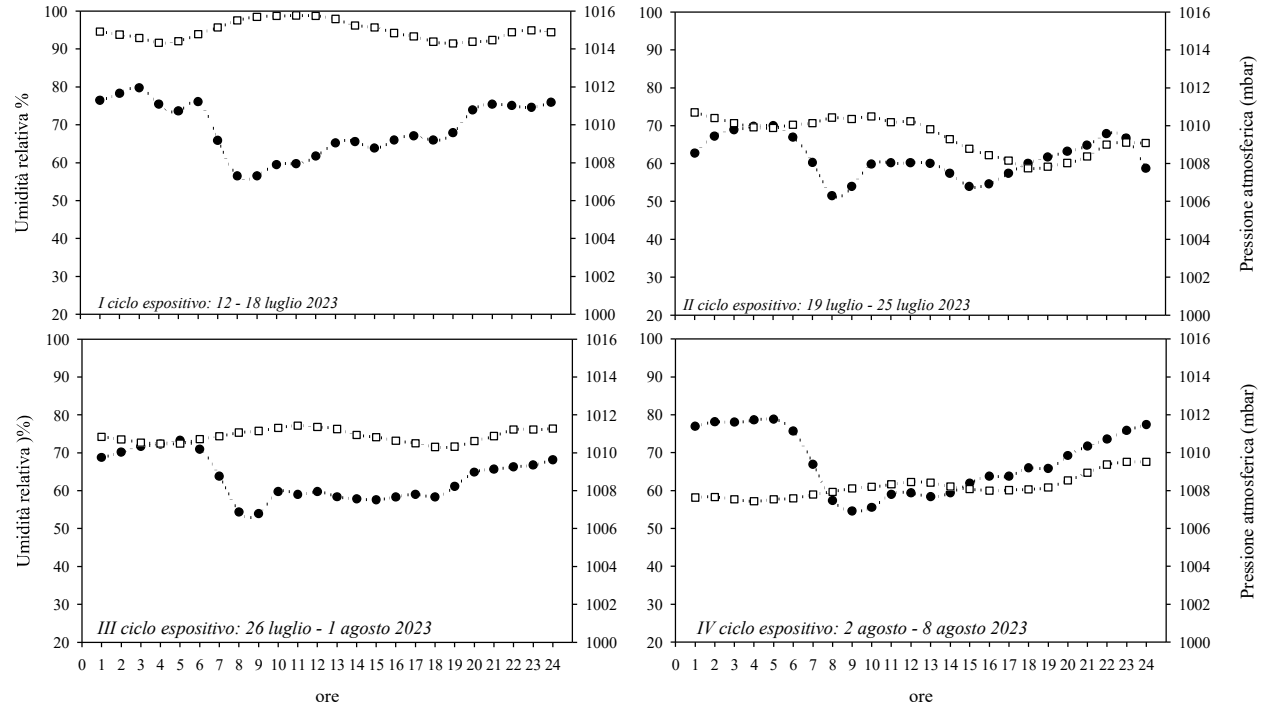

Figura 36. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

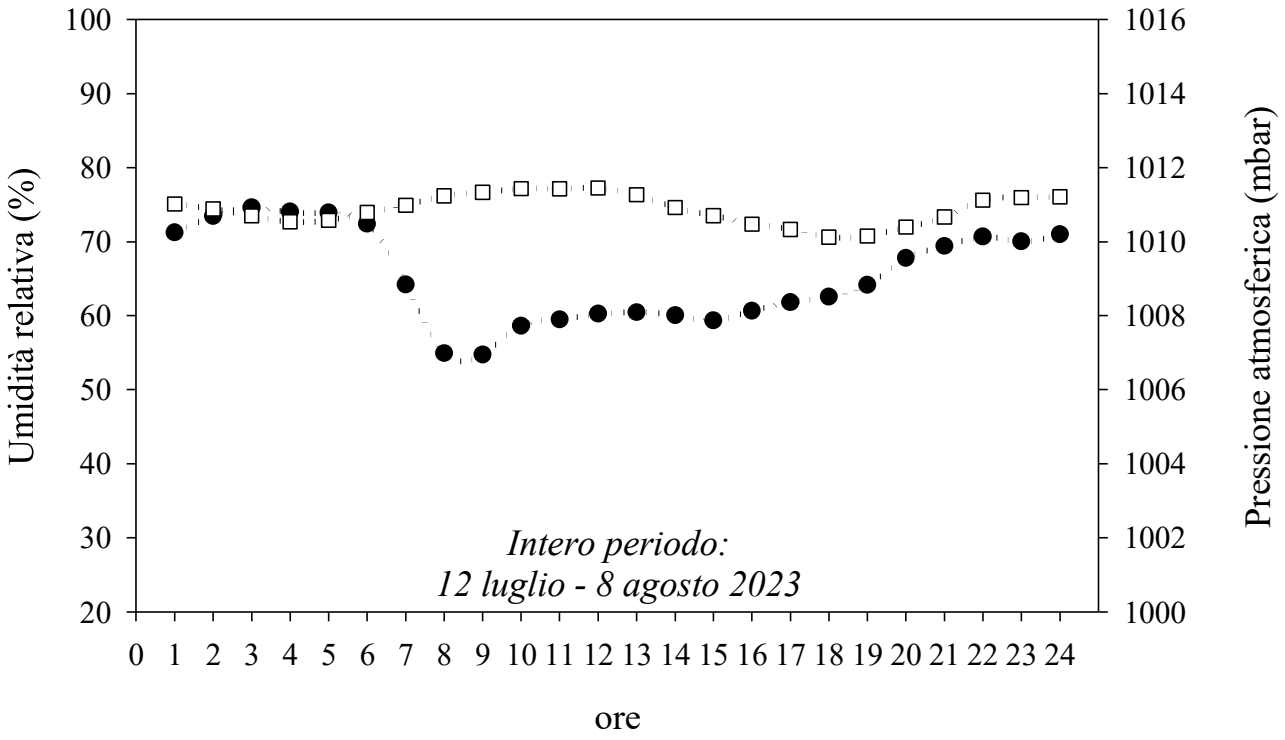

Figura 37. Profili orari medi di una giornata tipo dell'umidità relativa (●) e della pressione atmosferica (□) tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023.

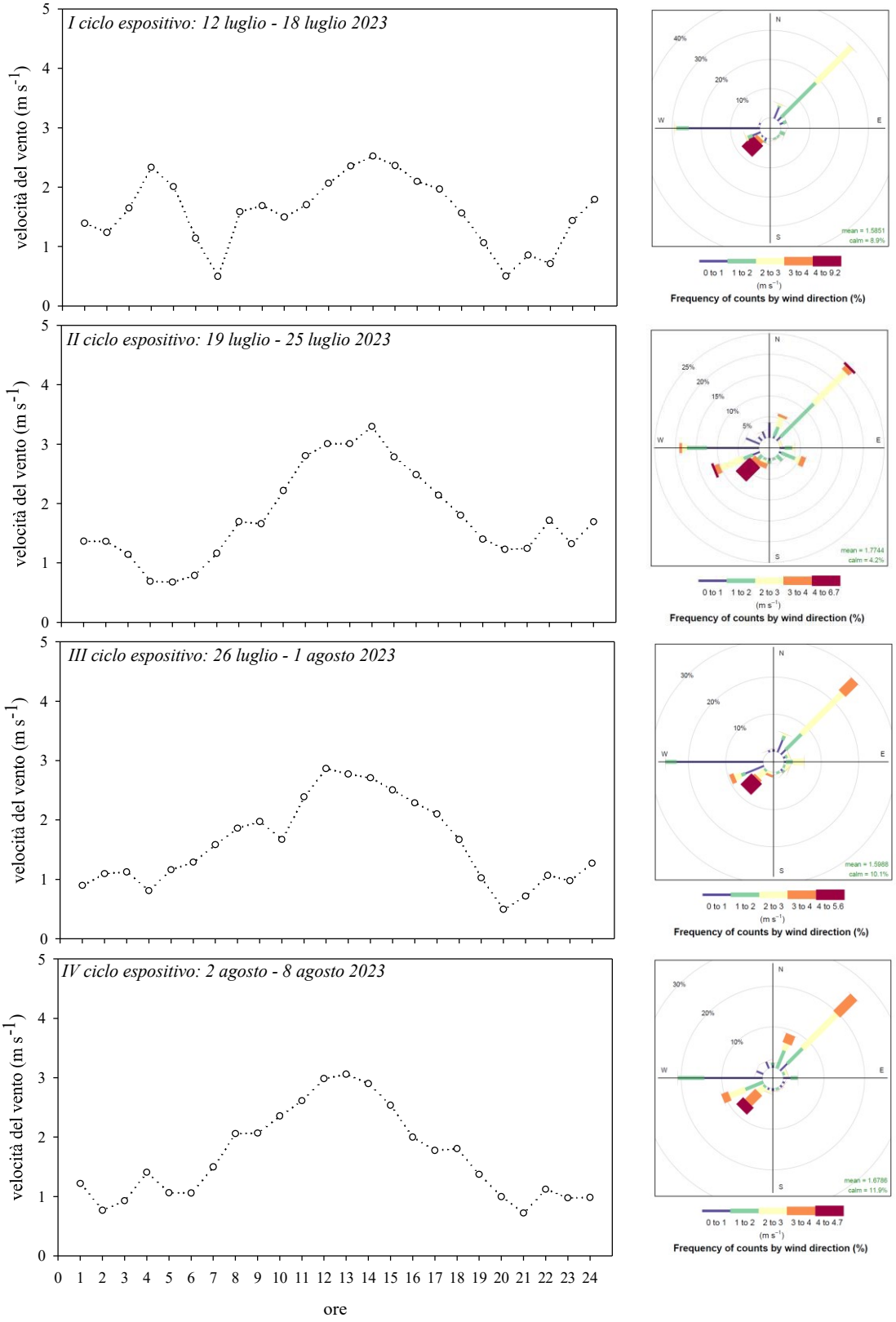

Figura 38. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

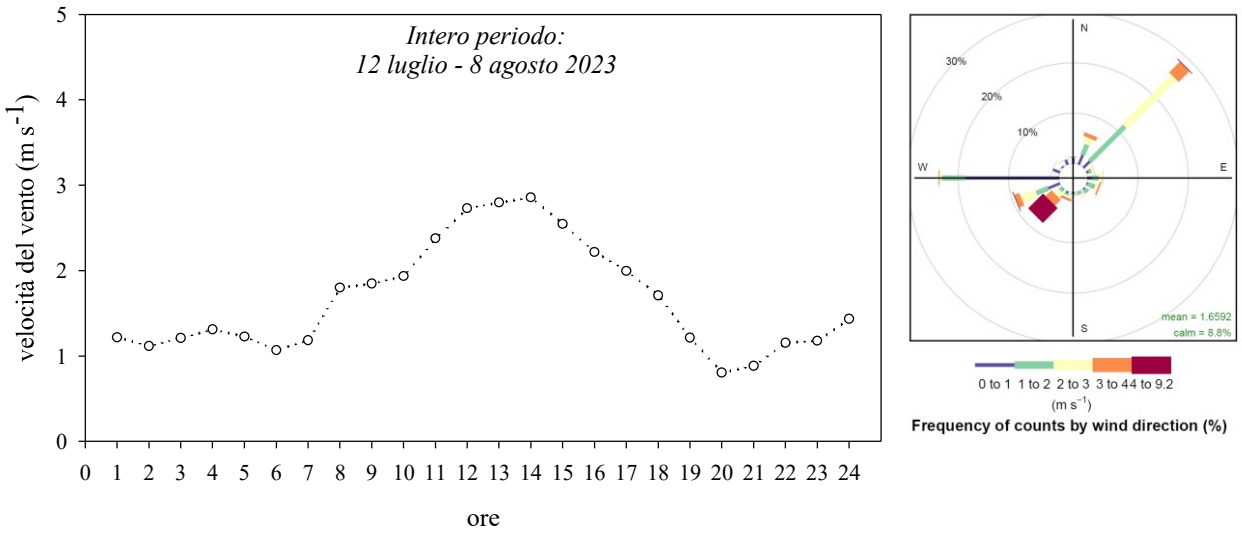

Figura 39. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Cepagatti, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

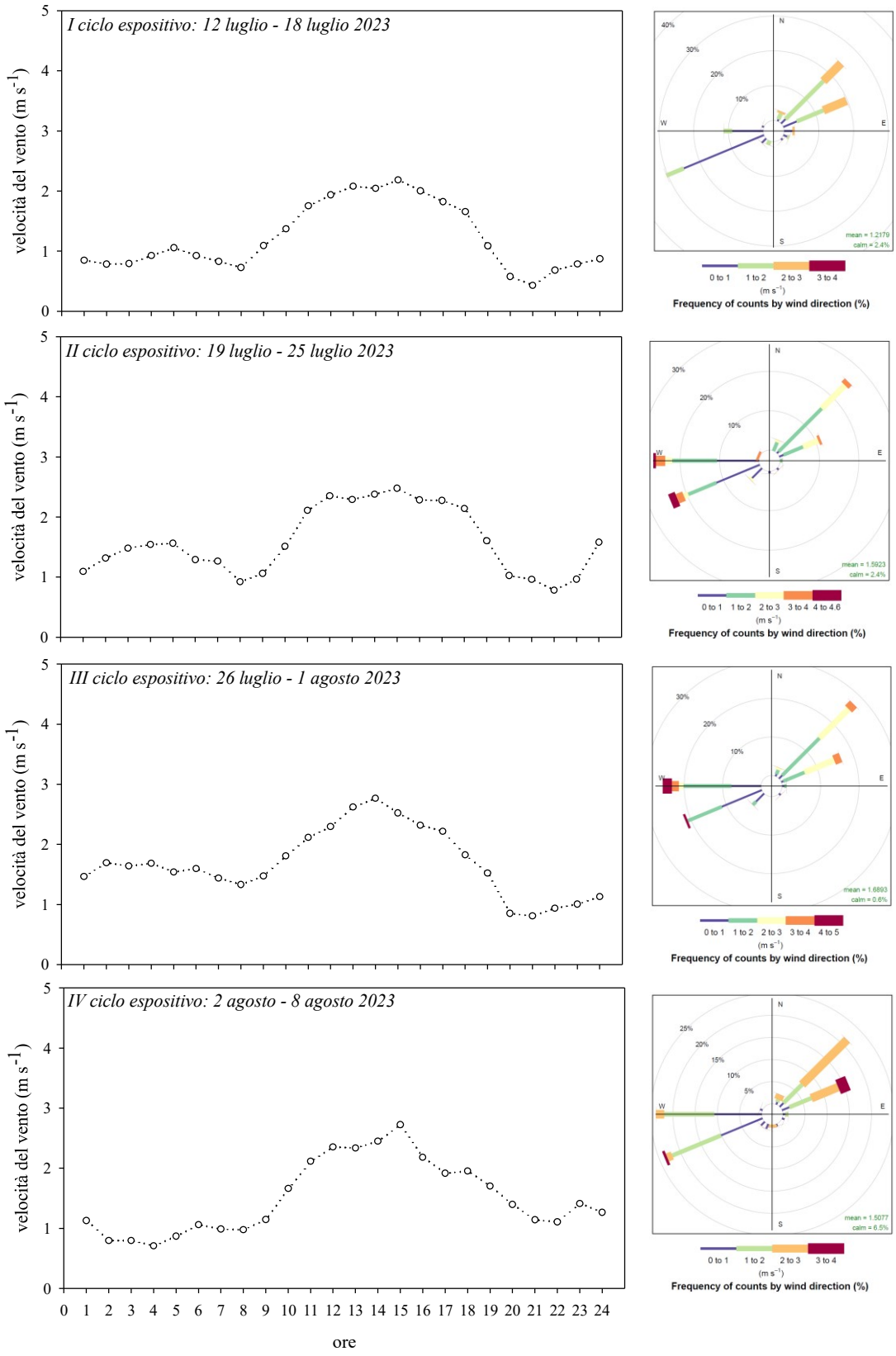

Figura 40. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

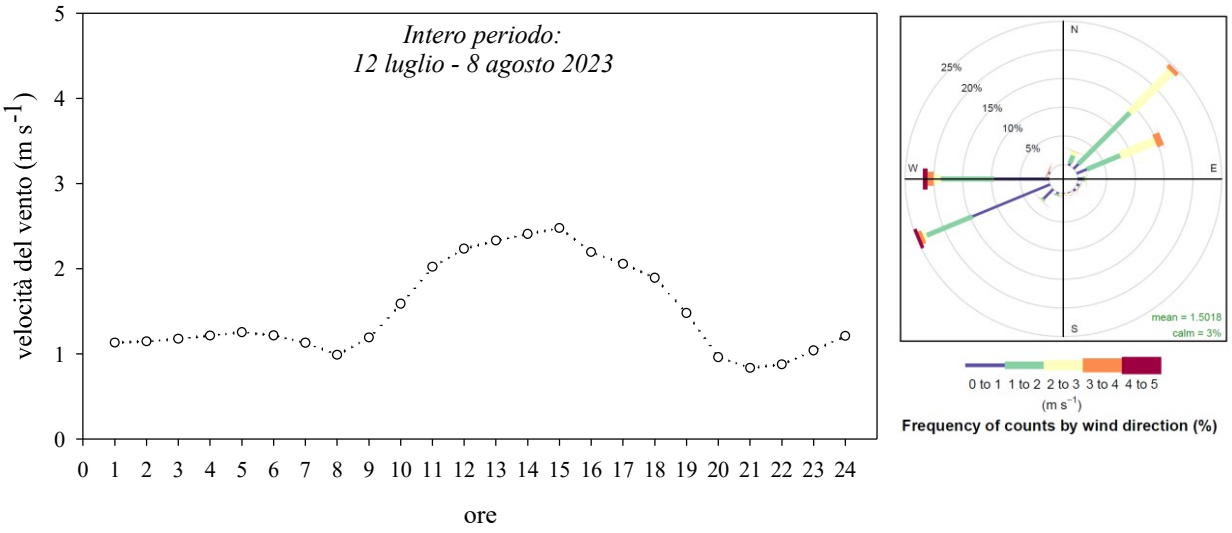

Figura 41. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Francavilla al Mare, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

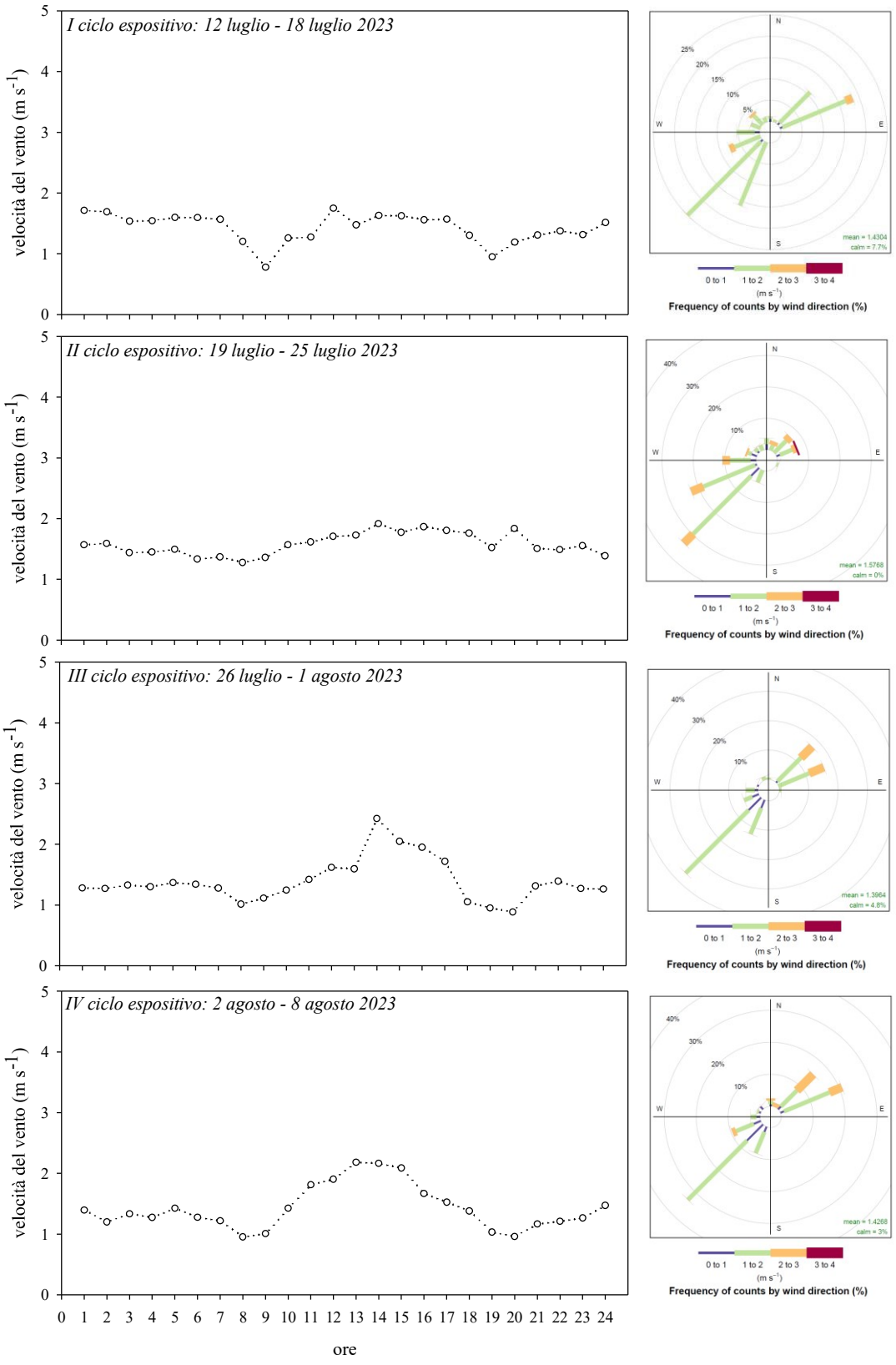

Figura 42. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

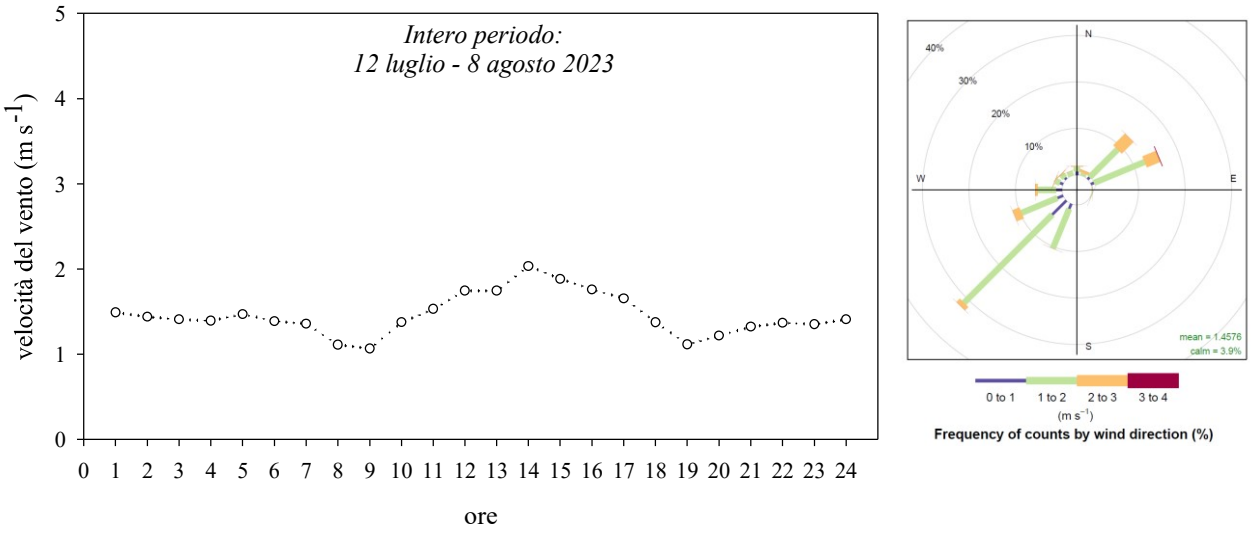

Figura 43. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Sant'Eufemia a Maiella, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

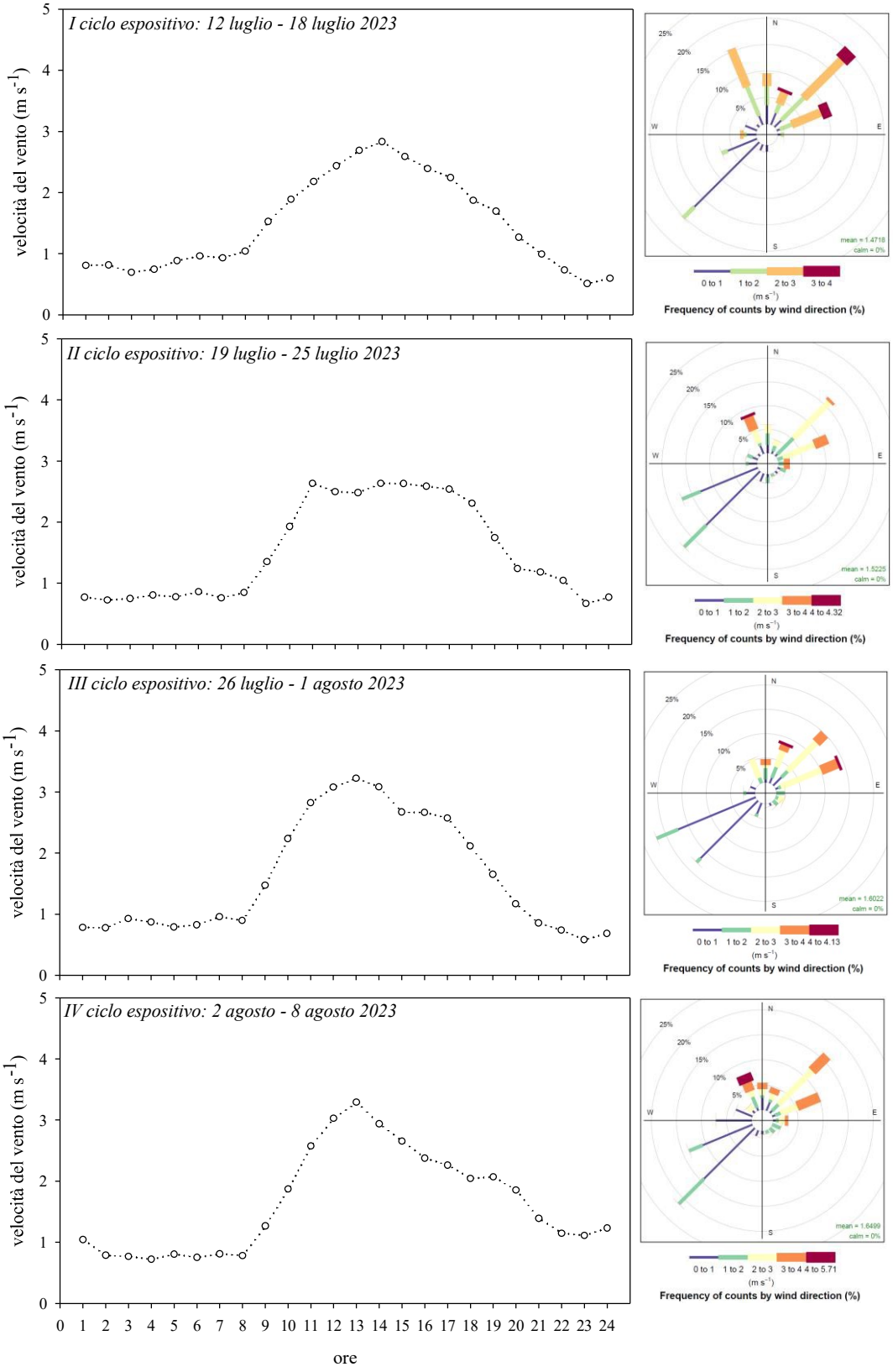

Figura 44. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023; a destra si riportano le frequenze relative dei venti registrati nei medesimi periodi nell'arco delle 24 ore.

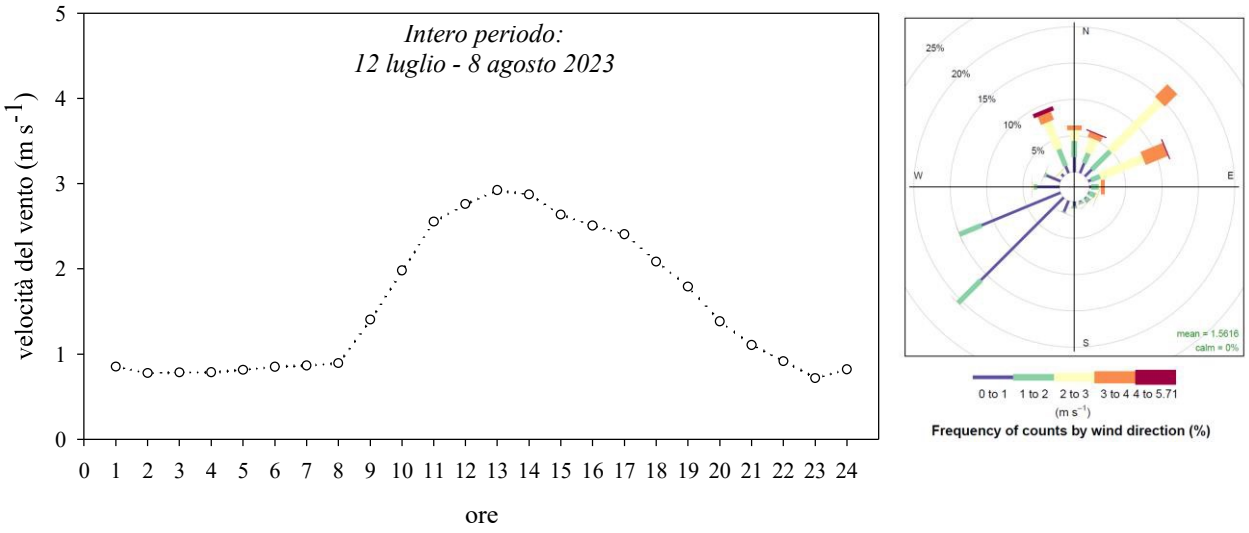

Figura 45. Profili orari medi di una giornata tipo della velocità dei venti, tracciati mediando i valori registrati nella centralina meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, sita a Pescara, a ogni ora (dalle 01:00 alle 24:00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023; 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*.

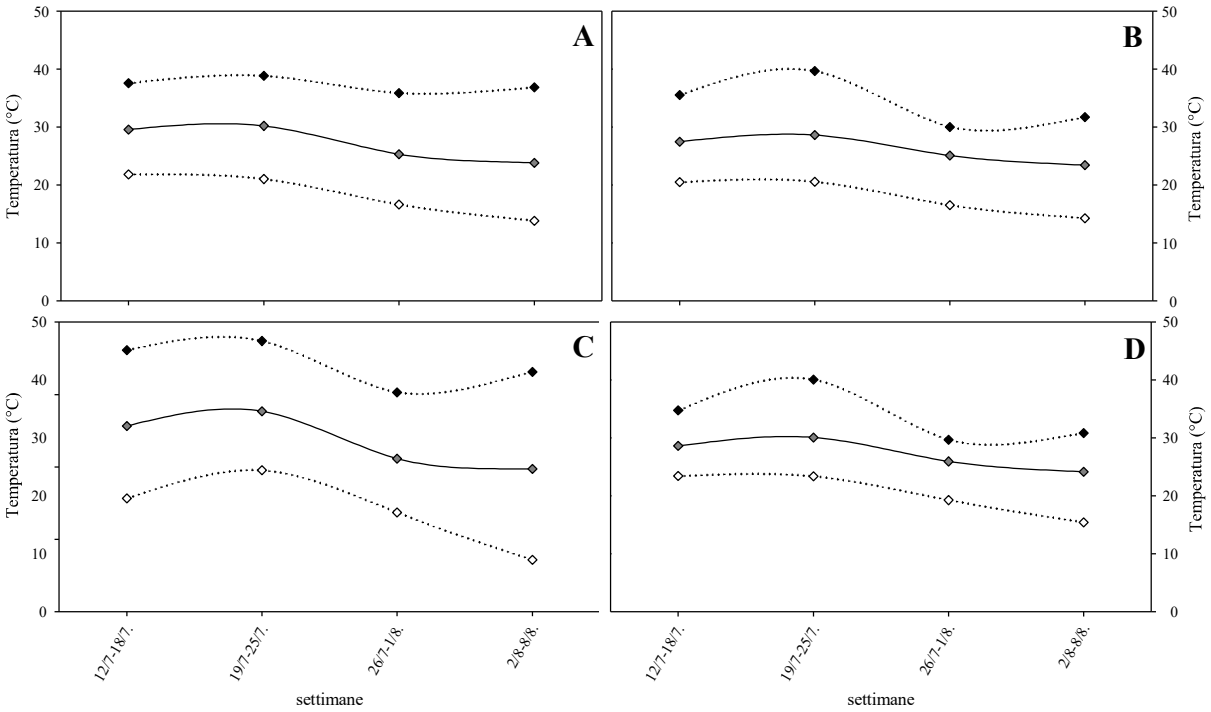

Figura 46. Valori massimi, medi e minimi di temperatura su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 12 luglio all'8 agosto 2023 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (**A**), Francavilla al Mare (**B**), Sant'Eufemia a Maiella (**C**) e Pescara (**D**).

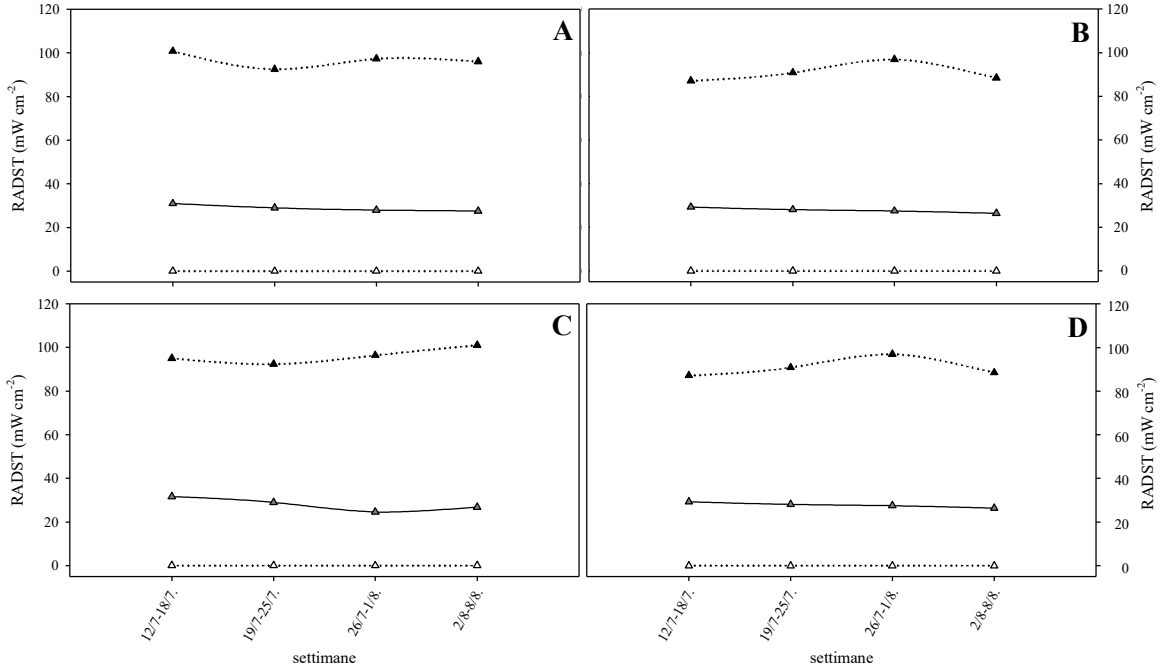

Figura 47. Valori di massimi, medi e minimi Radiazione solare totale (RADST) su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 12 luglio all'8 agosto 2023 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (**A**), Francavilla al Mare (**B**), Sant'Eufemia a Maiella (**C**) e Pescara (**D**).

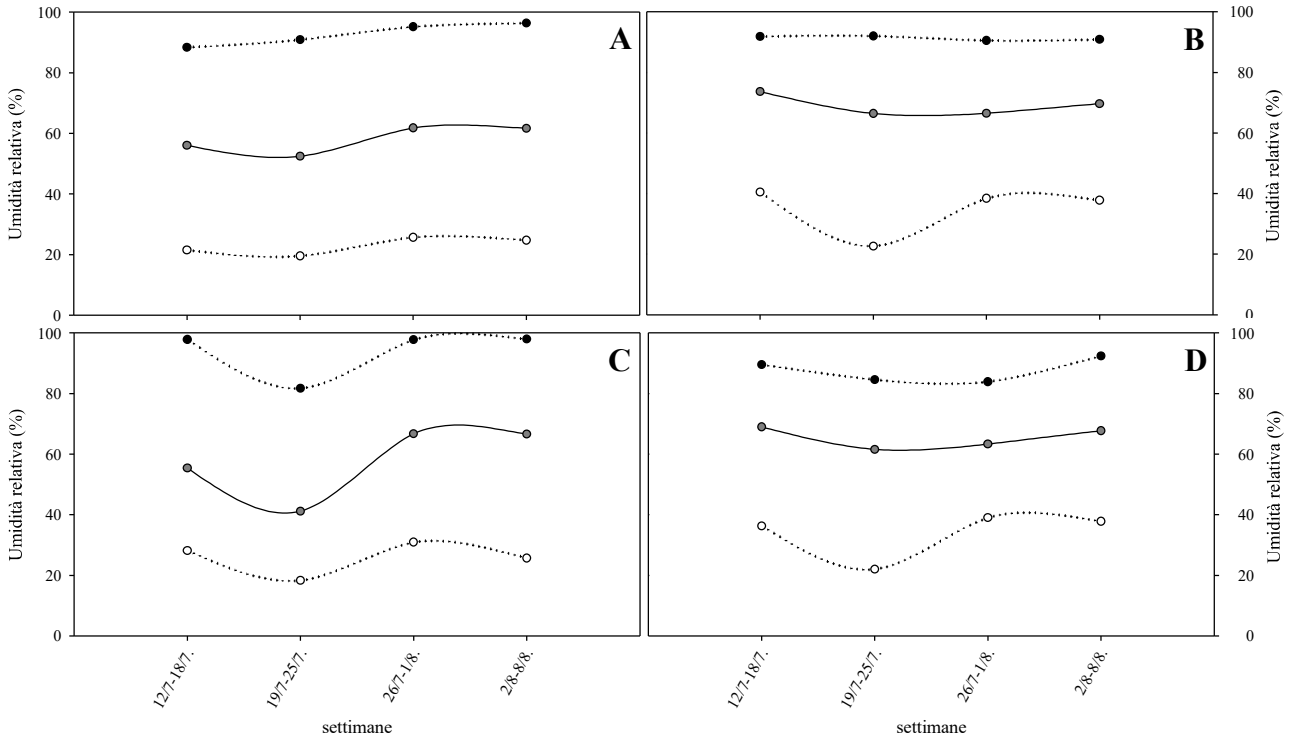

Figura 48. Valori massimi, medi e minimi di umidità relativa su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 12 luglio all'8 agosto 2023 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (**A**), Francavilla al Mare (**B**), Sant'Eufemia a Maiella (**C**) e Pescara (**D**).

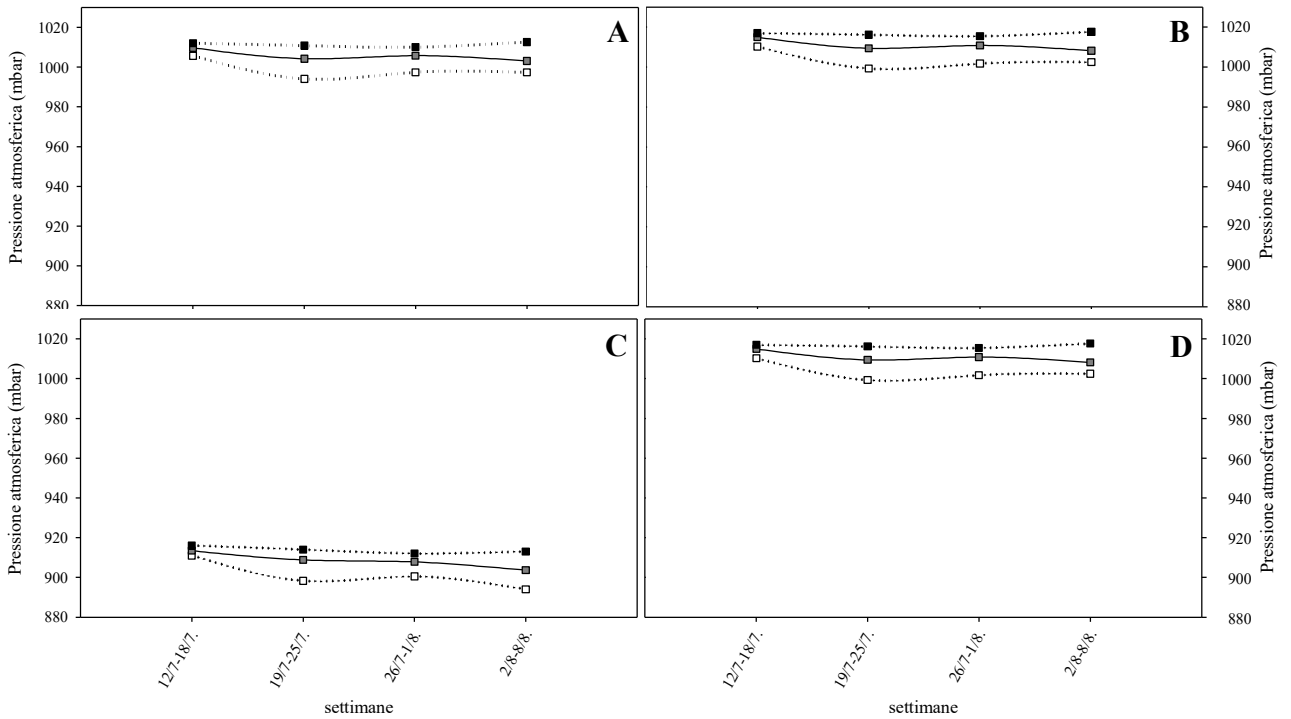

Figura 49. Valori massimi, medi e minimi di pressione atmosferica su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 12 luglio all'8 agosto 2023 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (**A**), Francavilla al Mare (**B**), Sant'Eufemia a Maiella (**C**) e Pescara (**D**).

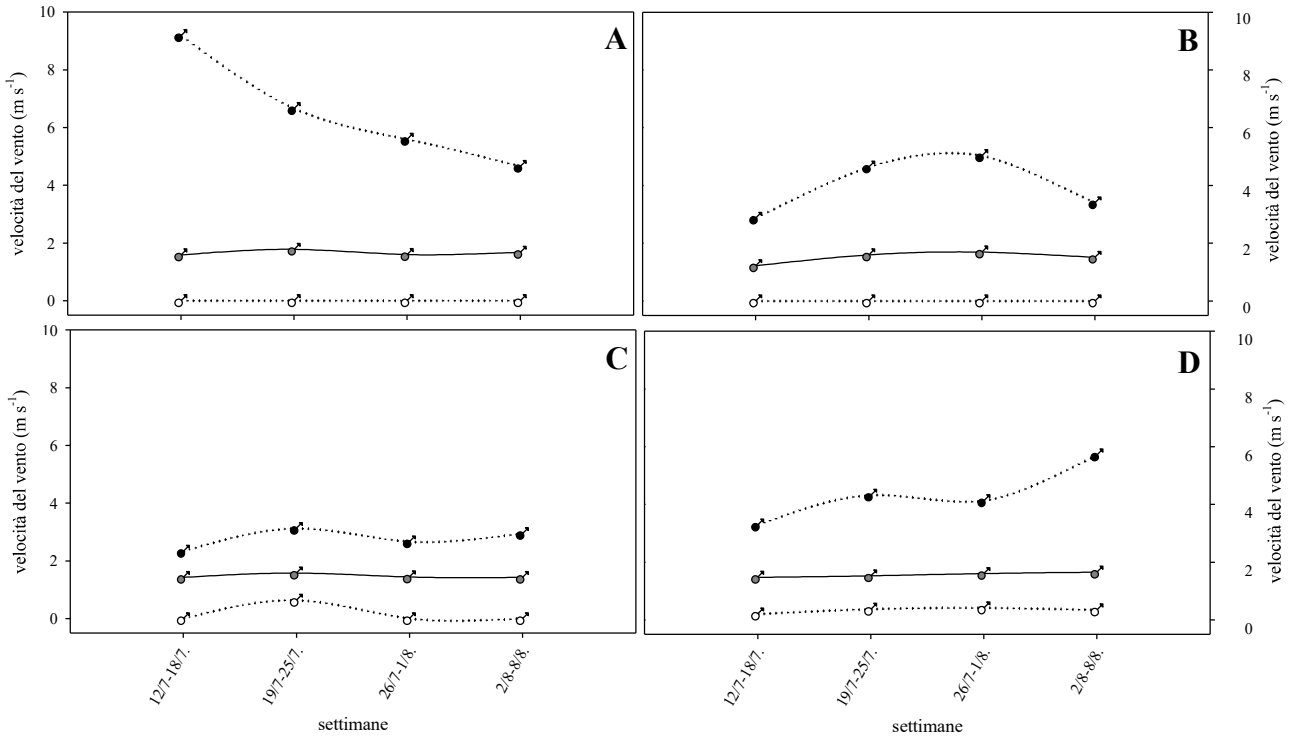

Figura 50. Valori massimi, medi e minimi di velocità del vento su sette giorni nell'arco delle 24 ore per tutto l'arco temporale, dal 12 luglio all'8 agosto 2023 registrate nelle centraline meteo della rete della Regione Abruzzo per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (**A**), Francavilla al Mare (**B**), Sant'Eufemia a Maiella (**C**) e Pescara (**D**).

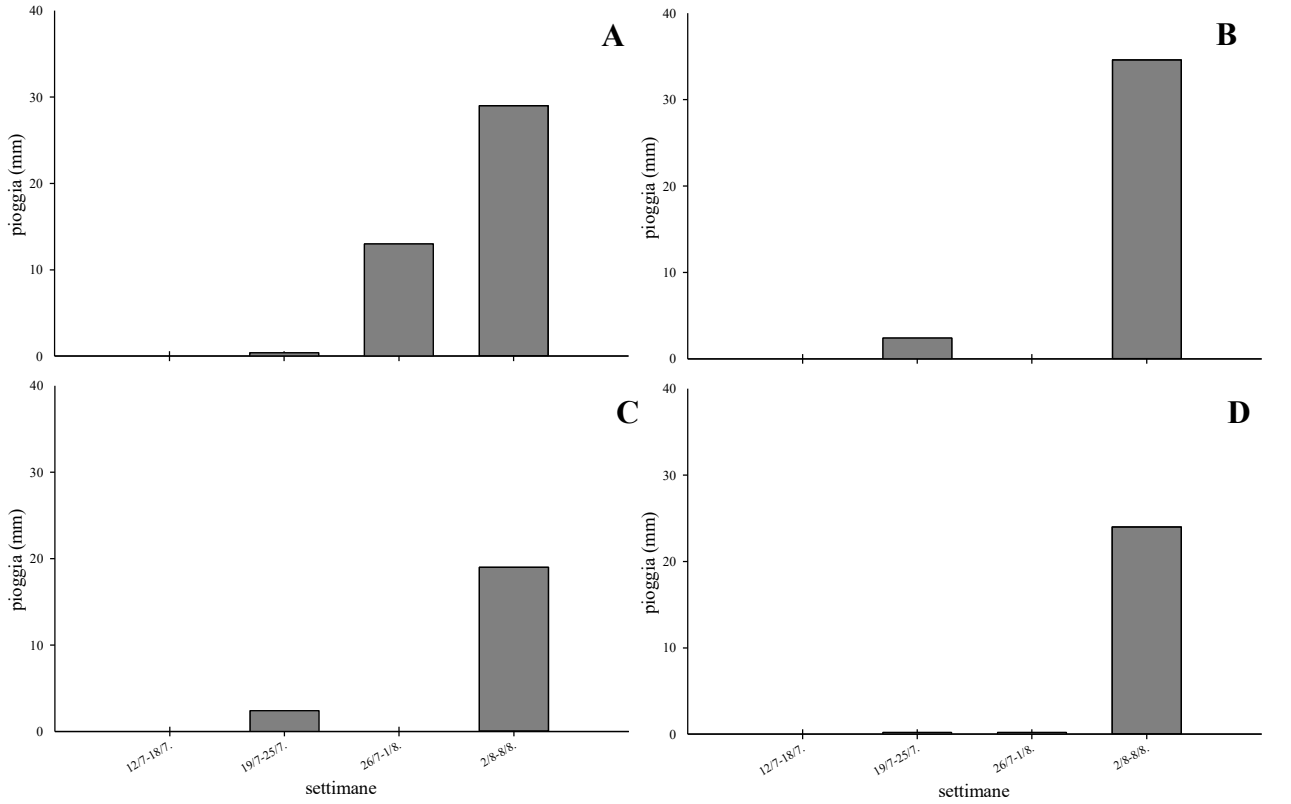

Figura 51. Entità e distribuzione delle piogge cadute in tutte le settimane dell'intero periodo dal 12 luglio all'8 agosto 2023 nelle centraline meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria, site a Cepagatti (**A**), Francavilla al Mare (**B**), Sant'Eufemia a Maiella (**C**) e Pescara (**D**).

Il periodo in esame, dal punto di vista meteorologico, è stato caratterizzato da temperature sensibilmente superiori alla media climatica di riferimento (1961-1990) per i mesi di luglio e agosto, nonché alla media dell'ultimo decennio (2013-2022), con anomalie positive, per Pescara, rispettivamente di 3,5 e 1,7 °C. In particolare, nelle prime 2 settimane, un anticiclone di origine africana ha determinato tempo stabile e soleggiato, con ventilazione debole a regime di brezza e temperature e umidità molto elevate, anche nel periodo notturno. La terza e la quarta settimana sono state caratterizzate da condizioni prevalentemente anticicloniche di origine atlantica, con valori di temperatura e umidità meno elevati, in linea con il *trend* dell'ultimo decennio ma pur sempre superiori a quelli del periodo climatico di riferimento (1961-1990). I venti sono risultati deboli a regime di brezza anche nella seconda metà del periodo preso in esme, con occasionali valori più elevati in presenza di irruzioni di aria più fresca dai quadranti settentrionali. Nella rosa dei venti di Pescara, è bene visibile l'alternarsi, in regime di brezza, tra una ventilazione debole proveniente dall'entroterra nel periodo notturno e della prima mattina (direzioni sud-ovest e ovest-sud-ovest, in particolare) e una dal mare da metà mattina al tardo pomeriggio (nord-est e est-nord-est). Le provenienze da nord-ovest e nord-nord-ovest sono inerenti agli episodi di irruzione di aria fresca cui si è accennato prima. Per quanto riguarda le stazioni di Cepagatti e Francavilla al Mare, si possono ripetere le considerazioni già fatte per Pescara, mentre per Sant'Eufemia a Maiella, collocata in territorio montano a circa 900 m di altitudine, si osserva un regime di brezza tra monte (direzione dei venti notturni dal quadrante sud-ovest) e valle (direzione dei venti diurni dal quadrante nord-est).

Nel dettaglio, il mese di luglio è stato caratterizzato da elevati livelli termici (con temperature medie giornaliere di oltre 28 e 27 °C registrate nel corso del I e II ciclo, rispettivamente con valori massimi di oltre 36 °C e minimi termici di 19,6 e 20,9 °C, come media delle 4 centraline meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria) ed igrometrici (con valori medi giornalieri di umidità relativi di oltre 55%, con valori massimi e minimi di 92,2 e 31,6%, 87,4 e 20,6% rispettivamente nel corso del I e II ciclo espositivo). Da segnalare la totale assenza di fenomeni piovosi in corrispondenza del I ciclo espositivo. Al contrario, il II ciclo espositivo è stato caratterizzato da lievi piogge verificatesi durante le ore diurne di venerdì 21 luglio (0,4, 2,4, 2,4 e 0,2 mm caduti rispettivamente a Cepagatti, Francavilla al Mare, Sant'Eufemia a Maiella e Pescara).

Al contrario, agosto viene ricordato come un mese in cui le condizioni meteo sono risultate più miti con temperature medie giornaliere intorno a 24 °C (con valori massimi di 31,5 e 30,6 °C nel III e IV ciclo, rispettivamente) e minimi termici di 16,5 e 12,7 °C (come media delle 4 centraline meteo della rete per il rilevamento della qualità dell'aria). Questi periodi hanno

beneficiato dell'effetto ristoratore di discrete piogge: durante il III ciclo espositivo, si segnalano fenomeni temporaleschi di forte entità nella centralina meteo di Cepagatti: l'idrometeora più intensa si è verificata il 26 luglio, tra le ore 15:00 e le ore 17:00, con 13,0 mm di pioggia caduta in sole tre ore e la massima velocità di vento (5,6 m s^{-1}) registrata alle ore 8:00 con direzione sud-ovest. Durante il IV ciclo espositivo, sono stati osservati eventi piovosi durante le ore diurne e notturne nei giorni 4, 5 e 7 agosto (29,0, 34,6, 19,0 e 24,0 mm caduti rispettivamente a Cepagatti, Francavilla al Mare, Sant'Eufemia a Maiella e Pescara).

3. Monitoraggio strumentale dell'ozono troposferico (attività 2023)

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 antecedentemente 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 O_3 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 52-54*.

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 µg m^{-3} h), per la quale testualmente si intende la somma della differenza tra le concentrazioni orarie superiori a 80 µg m^{-3} (= 40 ppb) e 80 µg 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 µg/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 µg/m^3•h come media su cinque anni (3)	1.1.2010

(1) Il raggiungimento del 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 é 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 µg/m^3	non definito
Protezione della vegetazione	Da maggio a luglio	AOT40, (calcolato sulla base dei valori di 1 ora) 6 000 µg/m^3•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 µg/m^3
Allarme	1 ora ([1])	240 µg/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.

3.2. Stazioni di rilevamento strumentale

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

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. Abbreviazioni: CO, monossido di carbonio, CO_2, biossido di carbonio, C_6H_6, benzene, NO_2, biossido di azoto, NO_x, ossidi di azoto, O_3, ozono, PM, *particulate matter*.

Stazione	**Ubicazione**	**O_3**	**NO_x**	**NO_2**	**C_6H_6**	**CO**	**CO_2**	**PM10**	**PM2.5**
1	Cepagatti (PE)	X	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		X	X

3.3. Elaborazione ed esito dei dati strumentali

La distribuzione spaziale delle 4 stazioni strumentali di rilevamento dell'O_3 nell'area oggetto di studio è rappresentata nella *Figura* 9, 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 μg m^{-3}, sono stati convertiti in fase elaborativa in ppb, sapendo che 1 ppb è uguale a 1,995 μg m^{-3}, a 20 °C e 101.325 kPa.

Si ricorda che l'O_3 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 12 luglio all'8 agosto 2023, sono stati riprodotti i corrispondenti profili giornalieri medi orari del giorno "tipo" di ciascun intervallo considerato e sono riportati nelle *Figure 55* e *56*.

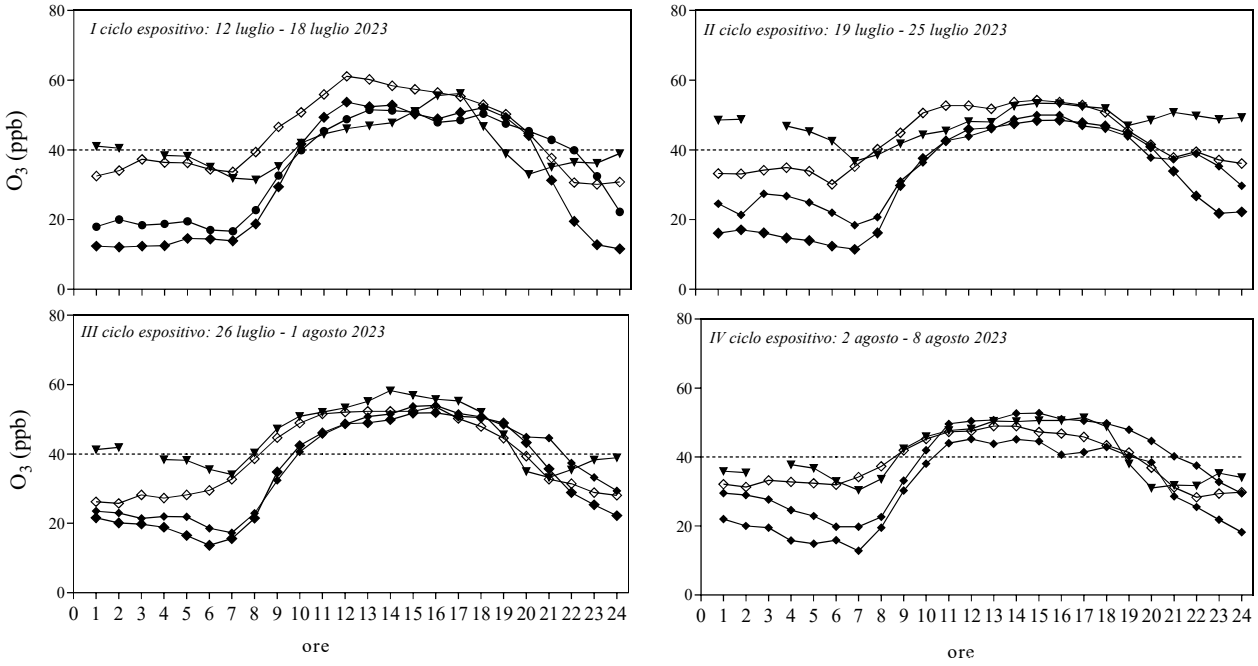

Figura 55. Profili giornalieri delle concentrazioni di ozono tracciati mediando i valori registrati nelle 4 stazioni strumentali, Cepagatti (◇), Francavilla al Mare (◆), Sant'Eufemia a Maiella (▼) e, Pescara (⬥) della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo, a ogni ora (dalle 01.00 alle 24.00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi (dal mercoledì al martedì successivo) condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023. 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'O_3, 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 e II 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'O_3 (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 12 luglio all'8 agosto 2023), 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 O_3. 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 $\mu g\ m^{-3}$ (~60 ppb) non deve essere superato per più di 25 giorni l'anno, calcolati come media su tre anni consecutivi.

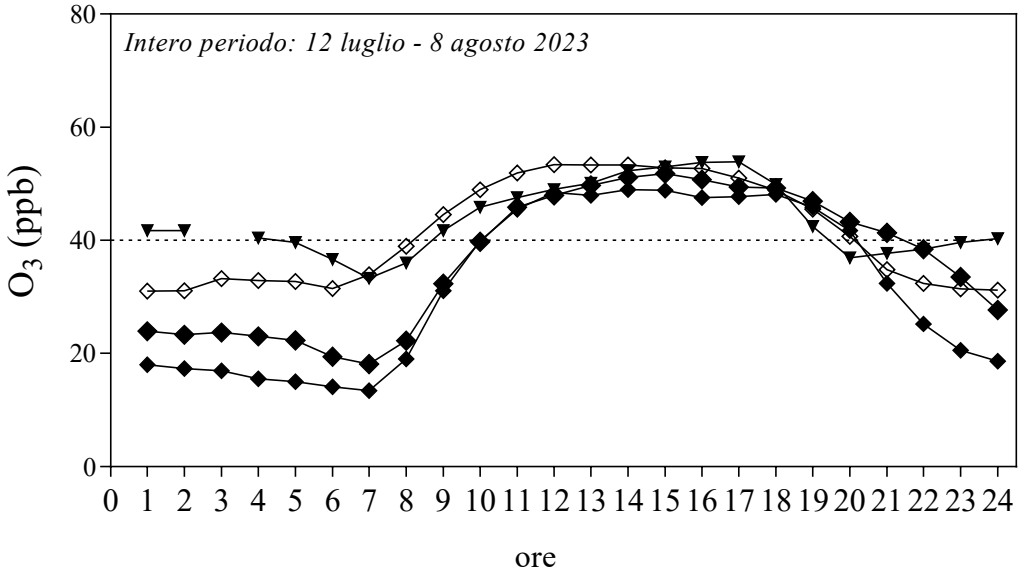

Figura 56. Profili giornalieri delle concentrazioni di ozono tracciati mediando i valori registrati nelle 4 stazioni strumentali, Cepagatti (◇), Francavilla al Mare (◆), Sant'Eufemia a Maiella (▼) e, Pescara (⬥) della rete per il rilevamento della qualità dell'aria della Regione Abruzzo a ogni ora (dalle 01.00 alle 24.00), nei sette giorni di ognuno dei 4 cicli espositivi (dal mercoledì al martedì successivo) condotti dal 12 luglio all'8 agosto 2023. 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 3 e 2 giorni per le stazioni strumentali di Cepagatti e Sant'Eufemia a Maiella, rispettivamente (evidenziato dalla campitura delle caselle). Concentrazioni orarie dell'inquinante di 180 µg 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 µg m^{-3} (pari a ~120 ppb)]. Per ciascun giorno sono stati ricavati i principali parametri descrittori di episodi puntiformi all'inquinante, corrispondenti ai valori medi della concentrazione oraria di O_3 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 12 luglio all'8 agosto 2023). 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 44,3 e 42,9 ppb, rispettivamente durante il I e II ciclo espositivo). Per il sito di Francavilla al Mare, la seconda decade di luglio è risultata il periodo in cui in cui le concentrazioni giornaliere di O_3 si sono assestate su livelli più alti (e.g., i valori di M24 sono 31,2 e 34,5 ppb, rispettivamente durante il II e III ciclo espositivo) con punte massime di 39,1 e 43,5 ppb. Anche per il sito di Sant'Eufemia a Maiella, la seconda decade di luglio è risultata il periodo in cui in cui le concentrazioni giornaliere di O_3 si sono assestate su livelli più alti (e.g., i valori di M24 sono 47,6 e 44,1 ppb, rispettivamente durante il II e III ciclo espositivo) con punte massime di 56,6 e 52,7 ppb. Per il sito di Pescara, l'ultima settimana di luglio e la prima di agosto sono risultati il periodo in cui in cui le concentrazioni giornaliere di O_3 si sono assestate su livelli più alti (e.g., i valori di M24 sono 37,0 e 37,9 ppb, rispettivamente durante il III e IV ciclo espositivo) con punte massime di 40,1 e 41,2 ppb.

Tabella 10. Media mobile su otto ore massima giornaliera delle concentrazioni di ozono delle 4 settimane del periodo complessivo dal 12 luglio all'8 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
12/7-18/7	12/7	**60,0**	-	**57,2**	-	**66,3**	-	**52,6**	-
	13/7	**53,1**	-	**48,1**	-	**44,3**	-	**43,2**	-
	14/7	**48,7**	-	**47,7**	-	**51,2**	-	**47,6**	-
	15/7	**54,7**	-	**50,0**	-	**55,8**	-	**51,6**	-
	16/7	**58,6**	-	**49,1**	-	**53,5**	-	**52,0**	-
	17/7	**66,9**	-	**54,0**	-	**48,7**	-	**51,5**	-
	18/7	**59,0**	-	**56,0**	-	**52,0**	-	**54,9**	-
19/7-25/7	19/7	**61,7**	-	**58,8**	-	**50,5**	-	**55,5**	-
	20/7	**54,9**	-	**50,2**	-	**54,9**	-	**48,5**	-
	21/7	**47,9**	-	**39,3**	-	**46,7**	-	**41,5**	-
	22/7	**44,5**	-	**43,1**	-	**51,6**	-	**46,2**	-
	23/7	**50,3**	-	**43,9**	-	**54,0**	-	**46,2**	-
	24/7	**61,0**	-	**50,6**	-	**51,2**	-	**50,7**	-
	25/7	**53,7**	-	**45,0**	-	**58,7**	-	**43,8**	-
26/7-1/8	26/7	**50,4**	-	**48,8**	-	**55,8**	-	**46,3**	-
	27/7	**46,9**	-	**45,5**	-	**50,8**	-	**46,9**	-
	28/7	**59,2**	-	**56,4**	-	**64,2**	-	**56,6**	-
	29/7	**53,9**	-	**51,9**	-	**56,2**	-	**53,8**	-
	30/7	**51,1**	-	**50,0**	-	**53,7**	-	**50,4**	-
	31/7	**50,2**	-	**51,9**	-	**51,8**	-	**51,5**	-
	1/8	**53,4**	-	**48,1**	-	**57,1**	-	**54,4**	-
2/8-8/8	2/8	**50,3**	-	**43,0**	-	**53,8**	-	**50,3**	-
	3/8	**49,8**	-	**48,0**	-	**50,0**	-	**57,1**	-
	4/8	**54,5**	-	**48,7**	-	**55,2**	-	**54,7**	-
	5/8	**41,0**	-	**42,4**	-	**42,6**	-	**49,5**	-
	6/8	**47,1**	-	**46,5**	-	**48,7**	-	**54,2**	-
	7/8	**46,1**	-	**42,2**	-	**52,0**	-	**49,1**	-
	8/8	**46,0**	-	**42,4**	-	**48,9**	-	**51,3**	-

Tabella 11. Valori minimi (*Min*), medi (*Med*) e massimi (*Max*) di ozono dei principali parametri descrittori 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 12 luglio all'8 agosto 2023: 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**		
	Min	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*
12/7-18/7	38,7	44,3	52,0	47,8	54,2	60,3	48,5	57,8	68,7	49,4	62,0	77,9
19/7-25/7	38,0	42,9	49,2	42,2	50,4	58,0	43,9	53,1	61,5	45,3	57,1	67,7
26/7-1/8	33,3	39,5	43,3	43,7	49,2	56,4	46,2	52,0	59,3	49,6	55,4	63,2
2/8-8/8	31,8	38,5	47,3	36,8	45,1	52,2	39,3	47,5	54,8	43,8	51,3	60,3
Intero periodo 12/7-8/8	31,8	41,3	52,0	36,8	49,7	60,3	39,3	52,6	68,7	43,8	56,5	77,9

Tabella 12. Valori minimi (*Min*), medi (*Med*) e massimi (*Max*) di ozono dei principali parametri descrittori 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 12 luglio all'8 agosto 2023: 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**		
	Min	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*
12/7-18/7	29,0	31,7	37,9	45,9	47,9	52,4	46,0	51,2	56,2	52,6	56,6	66,9
19/7-25/7	25,8	31,2	39,1	35,9	43,9	53,5	36,9	46,7	59,2	42,2	50,4	62,1
26/7-1/8	30,6	34,5	43,5	43,3	47,4	52,3	44,1	49,8	55,9	47,6	53,6	60,4
2/8-8/8	27,3	30,4	34,1	33,5	41,2	45,4	35,2	43,5	48,2	39,3	48,1	54,2
Intero periodo 12/7-8/8	25,8	32,0	43,5	33,5	45,1	53,5	35,2	47,8	59,2	39,3	52,2	66,9

Tabella 13. Valori minimi (*Min*), medi (*Med*) e massimi (*Max*) di ozono dei principali parametri descrittori 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 12 luglio all'8 agosto 2023: 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**		
	Min	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*
12/7-18/7	36,5	41,2	44,6	40,7	45,4	52,1	41,6	49,8	55,6	45,2	60,3	71,8
19/7-25/7	42,4	47,6	56,6	40,9	49,0	57,5	40,3	50,6	57,3	49,2	56,7	63,0
26/7-1/8	31,9	44,1	52,7	42,7	50,8	59,0	50,8	55,0	62,3	51,6	58,3	68,4
2/8-8/8	33,0	40,5	50,3	37,6	46,3	52,2	42,7	49,9	53,6	47,0	54,3	59,0
Intero periodo 12/7-8/8	31,9	43,3	56,6	37,6	47,9	59,0	40,3	51,3	62,3	45,2	57,4	71,8

Tabella 14. Valori minimi (*Min*), medi (*Med*) e massimi (*Max*) di ozono dei principali parametri descrittori 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 12 luglio all'8 agosto 2023: 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**		
	Min	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*	*Min*	*Med*	*Max*
12/7-18/7	33,0	35,4	37,8	41,2	46,7	50,4	41,7	49,2	53,9	48,0	55,6	63,2
19/7-25/7	26,4	36,7	45,4	36,6	44,1	49,8	42,0	47,1	55,3	47,1	52,5	62,5
26/7-1/8	33,7	37,0	40,1	43,0	47,7	51,4	45,1	50,8	54,6	49,0	55,2	62,2
2/8-8/8	34,5	37,9	41,2	40,1	47,9	53,3	43,7	51,1	57,7	48,2	54,7	60,4
Intero periodo 12/7-8/8	26,4	36,8	45,4	36,6	46,6	53,3	41,7	49,5	57,7	47,1	54,5	63,2

Il livello massimo di concentrazione di O_3 è stato rilevato, nell'ambito dell'intero periodo, il 17 luglio con 77,9 (dalle ore 12:00 alle ore 13:00 nella stazione di Cepagatti), 66,9 (dalle ore 11:00 alle ore 12:00 nella stazione di Francavilla al Mare), 71,8 (dalle ore 15:00 alle ore 16:00 nella stazione di Sant'Eufemia a Maiella) e 63,2 ppb (dalle ore 12:00 alle ore 13:00 nella stazione di Pescara) durante il I ciclo espositivo. 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 12 luglio all'8 agosto 2023).

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 12 luglio al 18 luglio 2023.

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono sita a Cepagatti						
	AOT0	**AOT10**	**AOT20**	**AOT30**	**AOT40**	**AOT60**	**AOT80**
12/7-18/7	4552	3712	2872	2032	1192	76	0
19/7-25/7	4237	3397	2557	1717	886	44	0
26/7-1/8	4130	3290	2450	1617	815	6	0
2/8-8/8	3789	2949	2109	1278	510	0	0
Intero periodo 12/7-8/8	16708	13348	9988	6644	3403	126	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 12 luglio al 18 luglio 2023.

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono sita a Francavilla al Mare						
	AOT0	**AOT10**	**AOT20**	**AOT30**	**AOT40**	**AOT60**	**AOT80**
12/7-18/7	4024	3184	2353	1533	753	7	0
19/7-25/7	3689	2849	2146	1186	467	6	0
26/7-1/8	3978	3138	2298	1459	659	1	0
2/8-8/8	3462	2622	1782	955	297	0	0
Intero periodo 12/7-8/8	15153	11793	8578	5133	2176	14	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 12 luglio al 18 luglio 2023.

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**
12/7-18/7	3810	2970	2130	1336	621	28	0
19/7-25/7	4020	3200	2391	1565	799	7	0
26/7-1/8	4009	3230	2449	1681	953	42	0
2/8-8/8	3887	3047	2212	1398	652	0	0
Intero periodo 12/7-8/8	15727	12447	9182	5980	3024	77	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 12 luglio al 18 luglio 2023.

Periodi settimanali (dal mercoledì al martedì)	Stazione di misura strumentale dell'ozono sita a Pescara						
	AOT0	**AOT10**	**AOT20**	**AOT30**	**AOT40**	**AOT60**	**AOT80**
12/7-18/7	3920	3080	2240	1411	639	3	0
19/7-25/7	3464	2674	1885	1122	440	3	0
26/7-1/8	4009	3169	2329	1493	720	2	0
2/8-8/8	4025	3185	2345	1511	743	0	0
Intero periodo 12/7-8/8	15417	12107	8798	5538	2542	8	0

Nella *Figura 57* è visualizzato l'andamento assunto dall'AOT40. Si osserva, anche per questo descrittore, come i maggiori livelli siano stati raggiunti per la stazione strumentale di Cepagatti con valori di AOT40 cumulata lungo l'intero periodo di studio pari a 3403 ppb h con conseguente 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'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), dopo 22 giorni a partire dal 12 luglio (definito tempo 0). Elevati livelli di AOT40 sono stati altresì raggiunti per la stazione strumentale di Sant'Eufemia a Maiella con valori pari a 3024 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 29 giorni (al termine del IV ciclo espositivo). Per le restanti stazioni, i livelli di AOT40 sono risultati di 2176 e

2542 ppb h (lungo l'intero periodo di studio), rispettivamente a Francavilla al Mare e Pescara. 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.

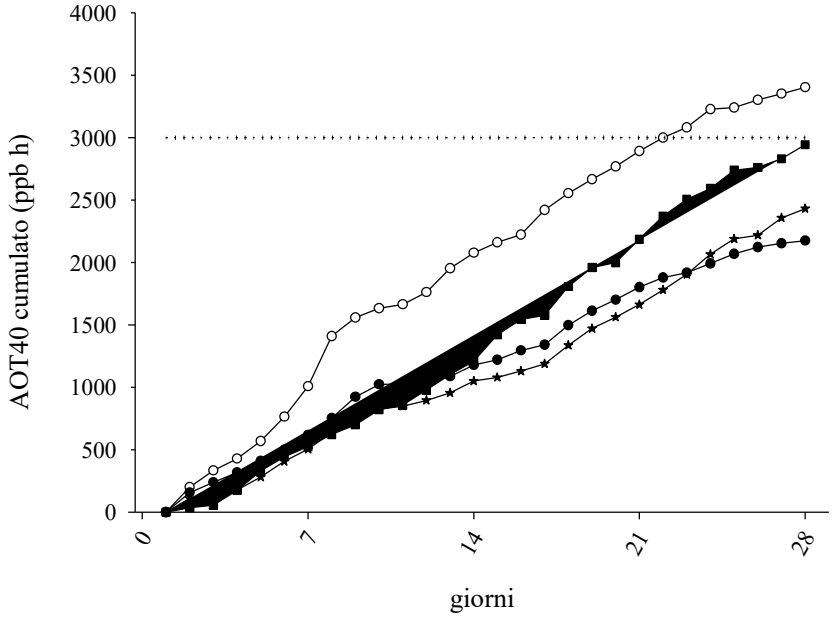

Figura 57. Andamento dei valori di AOT40 calcolati cumulatamente lungo tutto l'arco temporale dal 12 luglio (giorno 0) all'8 agosto ottobre dai dati di concentrazione oraria dell'inquinante registrati dalle stazioni strumentali, Cepagatti (○), Sant'Eufemia a Maiella (■), Francavilla a Mare (★) e Pescara (●), 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 O_3 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 (12 luglio - 8 agosto) durante la campagna di biomonitoraggio condotta nella Regione Abruzzo, estate 2023. In grassetto sono riportati i valori con $P \leq 0{,}01$.

	IDF	AOT40	M24	M12	M7	M1
IDF	-	0,71	**0,91**	0,68	0,77	**0,90**
AOT40		-	0,89	**0,94**	**0,99**	0,89
M24			-	0,85	**0,91**	**0,99**
M12				-	**0,99**	**0,85**
M7					-	**0,91**
M1						-

4. Considerazioni conclusive

Dai risultati ottenuti dalla prima 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 (eccetto nella stazione n. 1; *Figura 20*) con un minimo e un massimo registrati nel I (stazioni n. 2, 3 e 4), nel III (stazioni n. 3 e n. 4) e IV (stazioni n. 2 e 4) 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 (II), gli indici hanno mostrato alta similarità, mantenendosi su valori relativamente contenuti (1,40±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 e 2 rispetto quelli nell'area delle stazioni n. 3 e 4 (*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 µg 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 µg 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 22 e 29 giorni a partire dal 12 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 le stazioni di Cepagatti e Sant'Eufemia a Maiella, valori significativamente più elevati rispetto a Francavilla al Mare e Pescara (3403 e 3024 *vs* 2176 e 2542 ppb h).

Nel corso dell'intero periodo espositivo, si riscontra una buona correlazione tra i livelli d'O_3 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 è emerso avvalora in modo eclatante l'insostituibile ruolo del biomonitoraggio quale metodo integrante e non suppletivo del monitoraggio convenzionale. Il vantaggio insito nell'impiego di bioindicatori è essenzialmente da addurre alla possibilità di visualizzare e misurare direttamente, in modo immediato e inequivocabile, il reale impatto che l'inquinante ha su un sistema biologico sensibile, non sempre desumibile da dati di postazioni strumentali e descrittori derivati; per di più, esso offre la possibilità di monitorare un ampio raggio di piccole superfici difficilmente controllate direttamente. L'intensità del sintomo fogliare su soggetti di tabacco Bel-W3 consente di valutare in maniera specifica e precoce il danno indotto da O_3 fornendo una solida e affidabile base di partenza per la valutazione dell'effettiva incidenza dello stesso sulle specie coltivate e spontanee presenti nell'areale di studio. È opportuno specificare che tale risposta macroscopica consente di rilevare il reale effetto combinato delle componenti immissive dell'inquinante con le variabili climatiche locali ma non può essere generalizzabile ad altre specie coltivate o spontanee, in virtù del loro differente grado di sensibilità/tolleranza all'O_3.

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.

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. (2014*a*). 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. (2014*b*). 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.