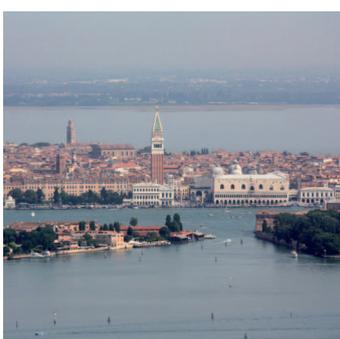


IL CONTROLLO AMBIENTALE DELLA COSTRUZIONE DEL MOSE

10 anni di monitoraggi
tra mare e laguna di Venezia
2004 - 2015



Editors

P. Campostrini, C. Dabalà, P. Del Negro, L. Tosi



Questo volume riassume i principali risultati dei "Monitoraggi degli effetti dei cantieri prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari" condotti a partire dal 2004 nell'ambito degli Studi B.6.72 B/1 - B/11 del Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche Veneto - Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia (già Magistrato alle Acque di Venezia), affidati al Consorzio Venezia Nuova e sviluppati da CORILA.

Alta sorveglianza

Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche Veneto - Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia (già Magistrato alle Acque)
Ufficio Salvaguardia di Venezia
Giampietro Mayerle, Fabio Riva, Valerio Volpe, Maria Adelaide Zito

A cura di

CORILA
Editors: Pierpaolo Campostrini, Caterina Dabalà, Paola Del Negro, Luigi Tosi

Con i contributi specialistici di

CORILA
Pierpaolo Campostrini, Caterina Dabalà, Chiara Dall'Angelo
Dipartimento di Biologia, sezione di Etologia, Università di Pisa
Natale Emilio Baldaccini

Dipartimento di Georisorse e Territorio, Politecnico di Torino
Alessandro Casasso, Antonio Di Molfetta, Rajandrea Sethi

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli Studi di Padova (DICEA-UNIPD)
Giampaolo Di Silvio

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara
Renzo Cremonini, Patrizio Fausti, Maria Carmen Guerra, Andrea Santoni, Giuliano Scalpelli Quiqueto, Nicolò Zuccherini Martello

Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica, Università Ca' Foscari di Venezia (DAIS-UNIVE)
Marco Anelli Monti, Francesco Cavarro, Francesca Coccon, Piero Franzoi, Vyrion Georgalas, Elisa Morabito, Fabio Pranovi, Simone Redolfi Bristol, Giovanni Sburlino, Patrizia Torricelli, Matteo Zucchetto

© Copyright CORILA
Consorzio per il Coordinamento delle Ricerche inerenti al sistema Lagunare di Venezia

S. Marco 2847, Palazzo Franchetti
30124 Venezia

Tel. +39-041.2402511 - pec: corila@pec.it

direzione@corila.it

www.corila.it

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Stampa Nuova Jolly, Padova 2017

Coordinamento generale

Consorzio Venezia Nuova
Fabio Beraldin, Giovanni Cecconi, Claudia Cerasuolo, Massimo Gambillara

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISAC-CNR)
Franco Belosi, Daniela Cesari, Daniele Contini

Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISMAR-CNR)
Giuliano Lorenzetti, Giorgia Manfè, Marco Sigovini, Davide Tagliapietra, Luca Zaggia

Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali, Consiglio Nazionale delle Ricerche (IDPA-CNR)
Andrea Gambaro

Museo di Storia Naturale di Venezia
Luca Mizzan, Marco Uliana, Cecilia Vianello

SELC soc. coop.
Isabelle Cavalli, Emiliano Checchin, Daniele Curiel, Daniele Mion, Chiara Miotti, Andrea Rismondo, Francesco Scarton

Università IUAV di Venezia
Marco Della Puppa, Marco Mazzarino

Francesco Barbieri, Elena Elvini, Leonardo Ghirelli, Lorenzo Zanella

Tutti i rapporti relativi ai monitoraggi dei cantieri del MOSE sono a disposizione al sito web www.monitoraggio.corila.it.

La presente relazione scientifica è parte delle attività finanziate dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche del Veneto - Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia (PROVV.OO.PP.), già Magistrato alle Acque di Venezia (MAG.ACQUE), tramite il concessionario Consorzio Venezia Nuova (CVN).

Tutte le figure, salvo quelle di cui è indicata esplicitamente la fonte, sono di proprietà di CORILA e degli autori.

Le affermazioni qui riportate sono di responsabilità degli autori e non necessariamente sono condivise dal Provveditorato o dal Concessionario.



Valutazione dell'impatto atmosferico della costruzione del MOSE

Atmospheric impact assessment of the MOSE construction

Franco Belosi, Daniele Contini, Daniela Cesari, Elena Elvini, Andrea Gambaro, Elisa Morabito

Introduzione

La laguna di Venezia è soggetta a diverse fonti di inquinamento atmosferico dovute ad emissioni provenienti da attività industriali, impianti per la produzione di energia elettrica, impianti petrolchimici, termovalorizzatori, riscaldamento domestico, emissioni da traffico marittimo e terrestre (trasportate dalla terraferma) ed emissioni provenienti dalla lavorazione del vetro.

La costruzione delle barriere mobili alle bocche della laguna di Venezia (MOSE) rappresenta una ulteriore potenziale pressione, per le emissioni dovute ai mezzi off-roads terrestri e marittimi, per la movimentazione di terreno e pietrame e per il sollevamento di polveri, nelle aree di cantiere, dovuto all'azione del vento.

Al fine di valutare l'eventuale impatto atmosferico dovuto alle attività di costruzione delle barriere mobili, è stato predisposto ed attuato un articolato Piano di monitoraggio che nel corso degli anni si è modificato sulla base delle lavorazioni svolte e dei risultati acquisiti.

La strategia di monitoraggio ha preso in esame gli inquinanti individuati dalla legislazione europea ed italiana come indicatori della qualità dell'aria (DM 60 del 2002 e D.Lgs. 155/2010).

Nello specifico gli inquinanti oggetto del monitoraggio sono stati: PM_{10} (cioè il particolato con dimensioni inferiori a $10 \mu m$) e la sua composizione elementare, gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sia in fase gassosa che particellata, i gas NO_x , NO_2 e CO. L'attività di monitoraggio si è estesa inoltre alla raccolta delle deposizioni atmosferiche.

La figura 1 riporta la dislocazione alle tre bocche di porto delle stazioni di misura per i diversi inquinanti considerati.

La strategia di elaborazione dei dati acquisiti si è basata sul confronto dei risultati delle misure svolte in campo con i valori legislativi di riferimento, con valori di soglia ottenuti da elaborazioni svolte in assenza di attività cantieristiche e per mezzo di correlazioni con i parametri meteorologici. Inoltre, la comparazione fra i dati acquisiti ed i parametri meteorologici (principalmente direzione e velocità del vento) ha costituito una analisi molto importante ai fini della individuazione di eventi di pressioni ambientali dovuti alle attività cantieristiche piuttosto che alle condizioni generali di inquinamento presenti in laguna.

In aggiunta alle misure puntuali, un ulteriore strumento per valutare l'impatto sulla qualità dell'aria delle attività dei cantieri è consistito nell'utilizzo di tecniche di modellazione mediante la applicazione di un modello numerico di dispersione di inquinanti in atmosfera.



1. Stazioni di monitoraggio alle bocche di porto di A) Lido, B) Malamocco, C) Chioggia.
 Immagine aerea da Google Earth.

Materiali e metodi

Lo schema generale della procedura di elaborazione dei dati acquisiti con misure sperimentali puntuali è stato così caratterizzato:

- confronto delle concentrazioni medie di un dato inquinante fra periodi di attività cantieristica e periodi di assenza di lavorazioni (giorni festivi, ferie, ecc.);
- correlazioni fra le concentrazioni degli inquinanti e le condizioni meteorologiche (intensità e direzione del vento) al fine di identificare le sorgenti responsabili;
- confronto con i valori obiettivo e valori limite previsti dalla legislazione vigente e con soglie elaborate all'interno della attività di monitoraggio e riviste periodicamente.

Di seguito vengono descritti in dettaglio i materiali ed i metodi utilizzati per i singoli parametri rilevati e per la tecnica di modellazione impiegata.

Monitoraggio del PM_{10}

Il PM_{10} rappresenta la frazione di particolato atmosferico con dimensioni inferiori a 10 μm ed ha una elevata probabilità di essere inalato e quindi di penetrare all'interno delle vie respiratorie. Diversi studi epidemiologici riportano correlazioni fra le concentrazioni di PM_{10} e la frequenza di effetti sanitari negativi (Pope and Dockery, 2006; Aphekom 2011). Per questo, a partire dal 1994 (DM 25/11/94), la legislazione italiana sulla qualità dell'aria ha introdotto l'obbligo di monitorare il PM_{10} in sostituzione delle polveri totali sospese.

La frazione di particolato PM_{10} è stata monitorata in tempo reale a Punta Sabbioni, da dicembre 2004 ad aprile 2013, per mezzo di un campionatore basato sulla diffusione della luce da parte delle polveri campionate (LSPM10, Unitec, Ferrara, Italy, figura 2).

Il sistema di campionamento è costituito da una pompa che aspira l'aria alle portate e alle condizioni previste dalla legislazione italiana (DM 60, 2002 e D.Lgs. 155/2010) permettendo la determinazione, per mezzo della tecnica gravimetrica, del contenuto di polveri PM_{10} sul filtro. Prima di raggiungere il filtro le particelle percorrono una camera di misura attraversata da un fascio di luce bianca; l'interazione della radiazione luminosa con il particolato aerosospeso provoca un segnale diffuso che viene elaborato e conver-



2. Stazione di monitoraggio del PM_{10} a Punta Sabbioni (Circolo Vela).



3. Stazioni di monitoraggio del PM₁₀ lungo la strada dei Murazzi (A), e presso le abitazioni (B).

tito in una concentrazione di aerosol. La centralina fornisce una concentrazione media oraria di PM₁₀ con la possibilità di accedere al dato non elaborato di concentrazione di particolato alla frequenza di una misura ogni 6 minuti.

A fianco del campionatore di particolato è stata posizionata una stazione meteorologica (MET 3000R) equipaggiata con sensori standard (direzione e velocità del vento, temperatura, pressione ed umidità dell'aria). I valori orari medi acquisiti sono disponibili sia su computer che on line.

Sono state considerate per il PM₁₀ tre diverse soglie di riferimento: il valore limite legislativo di 50 µg m⁻³ come concentrazione media giornaliera; una soglia di concentrazione media oraria ottenuta dalle concentrazioni in assenza di attività lavorative nel periodo temporale dalle ore 8 alle ore 20 (soglia diversa per i mesi invernali ed estivi); una soglia per il sollevamento eolico, ottenuta dalle concentrazioni medie misurate prima dell'inizio delle attività cantieristiche in condizioni di vento con velocità superiori a 4 m s⁻¹ e vento proveniente dalla spiaggia di Punta Sabbioni.

Al fine di monitorare eventuali rilasci di breve durata (anche inferiori all'ora) di polveri PM₁₀ dalle aree di cantiere verso recettori sensibili (centri abitati, case di cura, ristoranti, ecc) sono state svolte delle campagne di misura su base mensile (un campionamento della durata di due/tre giorni al mese) alternando la bocca di Lido con quella di Malamocco, con due centraline mobili funzionanti in parallelo (Dust Track, TSI), anche esse basate sulla diffusione della luce. Le misure sono state svolte nel periodo compreso tra maggio 2006 ed aprile 2011. Lo schema generale di misura prevedeva il posizionamento di una centralina all'interno di uno dei cantieri mentre la seconda nei pressi dei recettori sensibili.



4. Dust Track all'interno del cantiere (A) e presso la casa di cura Santa Maria del Mare (B).

La figura 3 mostra un caso particolare di impiego delle centraline mobile lungo la strada dei Murazzi sull'isola di Pellestrina, nel centro abitato, per determinare il contributo di PM_{10} alle abitazioni presenti lungo la strada, dovuto al passaggio di mezzi pesanti impiegati nel cantiere del MOSE (MAG.ACQUE-CORILA, 2009).

La figura 1 mostra la posizione delle centraline per la misura della concentrazione di PM_{10} a Malamocco. La stazione POLV16 è collocata all'interno del cantiere, mentre l'altra stazione (POLV15) è situata vicino alla casa di cura Santa Maria del Mare (figura 4: sulla sinistra POLV15 e sulla destra POLV16).

Composizione elementale del PM_{10}

Studi sperimentali, sia in vitro che in vivo, hanno evidenziato effetti dannosi per la salute umana dovuti alla presenza di Cadmio, Nichel, Arsenico e Piombo nel particolato inalato (Air Quality in Europe, 2013). Per questo motivo la normativa prevede di misurare il contenuto dei metalli pesanti nel PM_{10} . La presenza di specifici elementi, oltre a identificare il rischio per la salute umana, può contribuire ad identificare le sorgenti di PM_{10} (Querol *et al.*, 2004; Contini *et al.*, 2012).

I campionamenti di PM_{10} per la determinazione della sua composizione elementale (in particolare di metalli pesanti) sono stati periodicamente svolti alle tre bocche della laguna: Chioggia, Malamocco e Punta Sabbioni.

I tre siti di campionamento, ubicati nei pressi dei rispettivi cantieri del MOSE, risultano approssimativamente allineati lungo la direttrice NNE-SSW e distanziati l'uno dall'altro circa 12 km (figura 1). I campioni giornalieri sono stati raccolti dal 2007 al 2014 in diverse campagne di misura (generalmente della durata di due settimane ciascuna), distribuite fra la stagione invernale (gennaio/febbraio) e quella estiva/autunnale (settembre/ottobre) di ciascun anno di monitoraggio.

I campionamenti sono stati svolti utilizzando centraline sequenziali (16 filtri di capacità a basso volume (Skypost PM-TCR Tecora) alla portata di $2.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (figura 5). Le polveri sono state raccolte su filtri in fibra di quarzo Sartorius (diametro 47 mm) preventivamente decontaminati in laboratorio, secondo la procedura descritta da Capodaglio *et al.* (1994) e Buccolieri *et al.* (2005), e prepesati con bilancia analitica (risoluzione $\pm 10 \mu\text{g}$). Dopo il campionamento i filtri (compresi i bianchi di campo) sono stati nuovamente pesati per la determinazione gravimetrica e successivamente analizzati per la determina-



5. Campionatore sequenziale di PM_{10} utilizzato nei monitoraggi del MOSE.

zione degli elementi inorganici.

Le concentrazioni di Vanadio (V), Cromo (Cr), Ferro (Fe), Cobalto (Co), Nichel (Ni), Rame (Cu), Zinco (Zn), Arsenico (As), Molibdeno (Mo), Cadmio (Cd), Antimonio (Sb), Tallio (Tl) e Piombo (Pb) nel PM_{10} sono state determinate mediante spettrometria di massa (ICP-QMS, Agilent 7500I) presso l'Istituto di Dinamica dei Processi Ambientali del CNR (IDPA-CNR, Venezia).

Anche se il monitoraggio non è stato effettuato continuativamente nell'anno per motivi di carattere logistico ed economico, i valori obiettivo di Ni, As, Cd e il valore limite per il Pb, indicati nei decreti DM 60 e D.Lgs 155/2010, sono stati considerati come valori di riferimento. Al fine di evidenziare eventuali contributi dovuti alle attività cantieristiche sono state confrontate le medie giornaliere relative ai periodi di attività con quelle dei periodi di sospensione dei cantieri stessi.

Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)

Gli Idrocarburi Policiclici Aromatici sono composti ad alto peso molecolare. La pericolosità di alcuni IPA deriva dalla loro semi-volatilità che li rende particolarmente mobili attraverso le varie matrici ambientali. Il particolato atmosferico per la sua elevata superficie specifica presenta una elevata capacità di adsorbimento degli IPA. L'Agenzia per la Ricerca sul Cancro (IARC) ha fino ad ora classificato 48 diversi IPA come probabili o possibili cancerogeni per l'uomo (IARC, 2009).

Gli IPA sono stati raccolti per mezzo di un campionatore ad alto volume (AirFlowPUF, Tish Environmental Inc., Village of Cleves, OH) che permette di separare la fase gassosa e la fase aerosol (figura 6). Quest'ultima viene raccolta su filtri in fibra di quarzo (QFF) della porosità di 1 μm e del diametro di 102 mm (SKC Inc.), mentre la fase gassosa è raccolta su una spugna in poliuretano (PUF) dello spessore di 75 mm e diametro di 65 mm (SKC Inc.). Il sistema di campionamento mantiene una portata costante di $0.3 m^3 min^{-1}$. L'estrazione degli IPA dai PUF e dai filtri è stato effettuato presso il Centro Studi Microinquinanti Organici (CSMO) di Voltabarozzo (Pd), utilizzando il metodo EPA 8270 D.

Il campionamento degli IPA è stato effettuato per un periodo di 10 anni, da novembre 2005 a novembre 2014, nei siti PAH1 a Punta Sabbioni e PAH2 a Malamocco (figura 1). Ogni anno sono state svolte 2-3 campagne, della durata di 14 giorni, a seconda delle



6. Campionatore ad alto volume per gli IPA a Malamocco.

attività cantieristiche in atto. Durante ogni campagna sono stati raccolti 8 filtri (48/72 ore di campionamento ciascuno). Dato che le concentrazioni degli IPA in atmosfera seguono un andamento stagionale, con valori più elevati nei periodi freddi dell'anno per le emissioni da riscaldamento domestico, e la loro ripartizione fra la fase gassosa e quella particellata è dipendente dalla temperatura atmosferica, le campagne di misura sono state condotte sempre negli stessi periodi dell'anno: in settembre e gennaio/febbraio a Malamocco, in novembre e febbraio a Punta Sabbioni. A partire dal mese maggio 2014 la concentrazione di IPA è stata misurata soltanto presso il cantiere di Malamocco poiché l'attività cantieristica a Punta Sabbioni era notevolmente ridotta.

La legislazione nazionale (D.Lgs. 155/2010) stabilisce un valore obiettivo annuale per il Benzo(a)Pyrene (BaP) nella frazione PM_{10} di 1 ng m^{-3} . Dato che all'inizio del monitoraggio era stato previsto di controllare la concentrazione di BaP nel particolato totale, e non nel PM_{10} , si è deciso di non modificare lo schema di misura per favorire la continuità storica dei dati acquisiti. La misura di BaP nel particolato totale risulta inoltre più conservativa rispetto alla determinazione del contenuto di BaP nel solo PM_{10} .

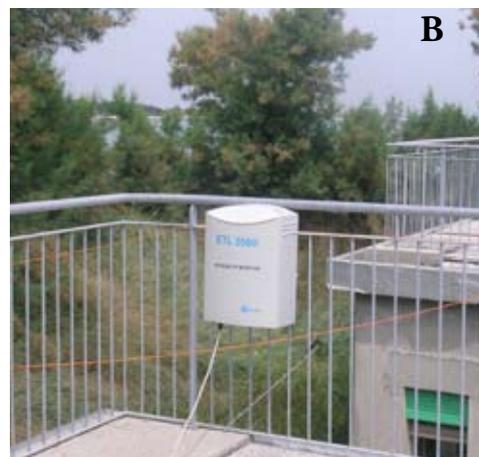
I valori ottenuti per il BaP sono stati confrontati con le concentrazioni medie mensili ottenute da ARPAV nelle stazioni di Circonvallazione e Bissuola: è stata utilizzata la concentrazione media mensile del mese nel quale sono stati effettuati i campionamenti per il monitoraggio dei cantieri del MOSE in considerazione della forte dipendenza degli IPA dalla temperatura dell'atmosfera.

Composti gassosi

Il D.Lgs. 155/2010 prevede anche il monitoraggio di composti gassosi, fra i quali:

- il biossido di azoto (NO_2), il cui valore limite orario di $200 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ non può essere superato più di 18 volte/anno e il valore limite annuale deve essere pari a $40 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$;
- il monossido di carbonio (CO), il cui valore limite di 10 mg m^{-3} va inteso come media massima giornaliera (su 8 ore);
- gli ossidi di azoto (NO_x), il cui valore limite per la vegetazione è pari a $30 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ all'anno.

I campionamenti di questi composti gassosi, dovuti alle emissioni dei mezzi navali e terrestri ma anche alle emissioni industriali, sono stati effettuati utilizzando un sensore a stato solido a film sottile (ETL2000, Unitech srl, Ferrara) che permette una risoluzione temporale oraria (figure 1 e 7). I dati sono stati raccolti da maggio 2006 ad aprile 2014, con cadenza mensile (una settimana di campagna di misura), presso Punta Sabbioni e Malamocco.



7. Centralina per la misura dei gas. Punta Sabbioni (A) e Malamocco (B).

La validità dei dati acquisiti è stata verificata considerando la soglia minima di rilevanza dei sensori utilizzati, cioè 0.1 mg m^{-3} per CO, $10 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ per NOx e $5 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ per NO₂. I valori di concentrazione ottenuti sono stati confrontati con i valori limite previsti dalla legislazione vigente per ogni singolo composto (D.Lgs. 155/2010). Anche in questo caso, sono stati confrontati i valori di concentrazione dei diversi composti misurati nei giorni lavorativi (dalle 8 alle 20) con i valori di concentrazione misurati nei periodi di inattività degli stessi giorni (dalle 21 alle 7 di ogni giorno), nei giorni festivi e durante le ferie.

Deposizioni atmosferiche

Al fine di verificare eventuali ricadute di inquinanti, organici ed inorganici, sui terreni circostanti i cantieri, si sono monitorate le deposizioni atmosferiche.

Sono stati utilizzati deposimetri passivi, posizionati ad un metro dal suolo, composti da due contenitori: uno in polietilene per i composti inorganici e l'altro in vetro per i composti organici (figura 8). Prima della raccolta, il contenitore in polietilene è stato ripetutamente lavato con acqua Milli-Q al 2% di acido nitrico (HNO₃ Suprapure), mentre quello in vetro è stato pulito con solventi organici. Al termine del periodo di raccolta le quantità depositate sono state versate in contenitori di polietilene a bassa densità (LDPE) per i composti inorganici e in vetro per i composti organici. Le quantità raccolte sulle pareti sono state lavate e filtrate su filtri in nitrato di cellulosa (contenitore inorganici) o su filtri in fibra di quarzo (contenitore organici).

La raccolta delle deposizioni atmosferiche è avvenuta per un periodo di 5 anni, da giugno 2005 a marzo 2010. Sono state effettuate due campagne all'anno (giugno-ottobre e dicembre-marzo) ed in ciascuna sono stati ottenuti tre campioni, la cui raccolta è durata un mese ciascuno. Complessivamente sono stati raccolti più di cento campioni in sei diversi siti delle bocche di porto della laguna. La figura 1 mostra la posizione della raccolta delle deposizioni atmosferiche: i deposimetri D1-D4 sono stati posizionati presso la bocca di Lido, D5 presso Malamocco e D6 a Chioggia.

Per studiare eventuali contributi dovuti al cantiere ed il loro andamento spaziale, presso Punta Sabbioni sono stati posizionati quattro deposimetri a diverse distanze dal cantiere: il deposimetro D1, posizionato all'interno dell'area cantieri, per monitorare le emissioni dirette; D2 posizionato diverse centinaia di metri da D1 all'esterno dell'area cantieri; D3 alla stessa distanza da D1 ma in posizione sopraelevata (circa 3 m dal suolo) per evitare interferenze locali; D4 posizionato alla distanza di circa 2 km dai cantieri in un'area non interessata da emissioni dirette (scuola elementare S. Pertini, Punta Sabbioni). Questi deposimetri hanno raccolto le deposizioni atmosferiche in simultanea da gennaio 2005 a maggio 2006.

I dati di precipitazione sono stati registrati dalla stazione meteorologica posizionata a Punta Sabbioni (Circolo Vela), vicino ai deposimetri D2 e D3, dalla stazione di misura dell'ARPAV vicino al deposimetro D4 e dalla stazione di Ceppe (gestita dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti-ex Magistrato alle Acque di Venezia) vicino al deposimetro D5.

Le analisi dei microinquinanti organici sono state condotte presso il Centro Studi Microinquinanti Organici (CSMO) di Voltabarozzo (Pd) mentre le analisi degli inquinanti inorganici presso l'Istituto IDPA del CNR (la metodologia seguita è riportata in Gambaro *et al.*, 2009).

Dato che non esistono limiti legislativi per le deposizioni atmosferiche, sono stati considerati i limiti in vigore in alcuni paesi della Comunità Europea (EC, 2001) e dati ottenuti dalla letteratura scientifica (Rossini *et al.*, 2005; Rossini *et al.*, 2005b; MAG. ACQUE, 2009).

8. Deposimetro bulk per la misura dei flussi di deposizione atmosferica a Punta Sabbioni.



Elaborazioni modellistiche

Le tecniche di modellazione sono un importante strumento di aiuto per la valutazione della qualità dell'aria, secondo la Direttiva sulla valutazione e gestione della qualità dell'aria 96/62/CE recepita in Italia con il D.Lvo. 4 agosto 1999 n. 351, e rappresentano uno strumento fondamentale per la realizzazione di piani e programmi di miglioramento e mantenimento della qualità dell'aria, secondo le indicazioni del DM 60 del 2002. Più recentemente, in seguito all'adozione della nuova Direttiva 2008/50/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, il D.Lgs. 155/2010 ha riorganizzato tutta la materia, definendo in particolare nuovi "criteri per l'utilizzo dei metodi di valutazione diversi dalle misurazioni in siti fissi", con particolare riferimento alle tecniche di modellizzazione.

Pur con le innumerevoli incertezze intrinseche nel modello (le equazioni fisiche e chimiche vengono inserite nel modello tramite formule approssimate, le variabili spaziali e temporali sono discretizzate) ed esterne (incertezza sull'input meteorologico e sulla stima delle emissioni di inquinanti), i risultati di un calcolo modellistico forniscono informazioni che un monitoraggio tramite misure dirette, effettuate in singoli punti del territorio, non può dare e, inoltre, permettono di evidenziare il contributo complessivo delle diverse fonti inquinanti. In sintesi con i modelli di diffusione è possibile:

- ottenere campi di concentrazione anche nelle aree all'interno delle zone ove non esistono stazioni di misurazione o estendere la rappresentatività spaziale delle misure stesse;
- comprendere le relazioni tra emissioni e immissioni, discriminare i contributi delle diverse sorgenti alle concentrazioni in una determinata area (source apportionment) e determinare i contributi transfrontalieri e quelli derivanti da fenomeni di trasporto su larga scala (per esempio, le polveri sahariane);
- integrare e combinare le misurazioni effettuate tramite le stazioni di misurazione in siti fissi, in modo tale da ridurre il numero;
- valutare la qualità dell'aria nelle zone in cui non sono presenti stazioni di misurazione;
- prevedere la qualità dell'aria sulla base di scenari ipotetici di emissione o in funzione di variazioni delle condizioni meteorologiche;
- valutare l'efficacia delle misure di contenimento delle emissioni in atmosfera.

Un modello numerico è costituito da equazioni, risolte al calcolatore, che traducono le relazioni tra le variabili fisiche e chimiche del sistema che si sta studiando (in questo caso l'atmosfera, le sue interazioni con la superficie terrestre e marina, la presenza di sostanze

chimiche inquinanti e le reazioni con i componenti dell'atmosfera) e la loro evoluzione temporale. Le variabili in esame devono essere quantificate in modo da descrivere proprio la situazione che si sta analizzando: quindi, nel caso di un modello di dispersione di inquinanti in atmosfera, vanno introdotti nel modello i valori che descrivono le caratteristiche della superficie terrestre o marina della regione esaminata, la quantità delle sostanze emesse dalle varie fonti inquinanti e immesse in atmosfera, e le variabili meteorologiche, che costituiscono il "motore" che porta alla diffusione degli inquinanti.

Per lo studio dell'impatto dei cantieri del MOSE è stato utilizzato il sistema modellistico denominato CALPUFF (Scire *et al.*, 1990a,b), abbinato al suo pre-processore meteorologico CALMET, applicato su tre aree geografiche dell'ampiezza di 20x20 km² comprendenti le bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia.

CALPUFF è un modello di dispersione atmosferica non stazionario e multispecie che simula gli effetti di una meteorologia variabile nello spazio e nel tempo sul trasporto, la trasformazione e la rimozione degli inquinanti. CALPUFF viene utilizzato su scale che vanno dalle centinaia di metri alle centinaia di chilometri dalle sorgenti. Esso include sia algoritmi su scale spaziali ridotte, sia algoritmi su grandi scale spaziali (rimozione degli inquinanti per effetto di deposizione umida e secca, trasformazione chimica).

CALPUFF e CALMET sono stati considerati dall'EPA (Environmental Protection Agency), nelle linee guida sui modelli della qualità dell'aria, come modelli preferiti. Sono ampiamente utilizzati anche nel nostro paese e in particolare, fra gli altri, la Agenzia Regionale ARPA Veneto li utilizza quale strumento modellistico a supporto decisionale per le politiche della qualità dell'aria.

CALPUFF può descrivere sorgenti puntiformi, volumetriche, areali e lineari. Un sistema modellistico come CALMET/CALPUFF può correttamente riprodurre fenomeni quali la stagnazione degli inquinanti (calme di vento), il ricircolo dei venti, e la variazione temporale e spaziale delle condizioni meteorologiche.

Il modello viene implementato con le caratteristiche morfologiche della regione di interesse tramite matrici di orografia e uso del suolo.

Le informazioni necessarie per l'applicazione modellistica sono costituite dai dati meteorologici, provenienti da stazioni al suolo e da misure in quota, che il modello diagnostico CALMET provvede ad interpolare su tutto il dominio di calcolo. I dati al suolo sono ottenuti da 40 stazioni (con anemometro a 10 m di altezza in pianura e a 5 m di altezza in zona montuosa) di cui 9 stazioni sinottiche dell'Aeronautica Militare e 30 stazioni della rete del Centro Meteorologico di Teolo; a questi si aggiungono i dati della stazione off-shore gestita dal Comune di Venezia e posizionata sulla piattaforma del CNR al largo della laguna di Venezia e i dati delle stazioni 5 e 23 gentilmente forniti dall'Ente Zona Industriale di Porto Marghera. Per i dati verticali CALMET è inizializzato con tre radiosondaggi (Milano-Linate, Udine-Campoformido e Bologna-San Pietro Capofiume).

L'uscita di CALMET permette di predisporre, con cadenza oraria, l'input meteorologico e micrometeorologico per il modello di dispersione CALPUFF. Quest'ultimo richiede come dati ingresso le caratteristiche delle sorgenti emissive (tipologia, durata ed intensità). Nel caso in esame ciò ha richiesto la quantificazione delle attività dei cantieri (utilizzo di mezzi a motore, sia terrestri che acquei, presenza di aree sterrate su cui la circolazione dei mezzi e l'azione del vento provoca risollevarimento di polveri), a partire dalla quale si effettua, applicando metodologie riportate nella letteratura tecnica e scientifica, una stima dei quantitativi di inquinanti (ossidi di azoto e polveri) immessi in atmosfera. Per la stima delle emissioni legate alle attività dei cantieri, secondo quanto previsto nel Disciplinare Tecnico, sono stati forniti i dati relativi ai mezzi impiegati in ciascun cantiere, suddivisi per zone di lavoro e mesi, in termini di numero di mezzi per numero di giorni e percentuali di utilizzo. La procedura applicata per stimare i diversi fattori di emissione fa riferimento alla metodologia EMEP-CORINAIR (European Monitoring

and Evaluation Programme-CORe INventory AIR emissions).

Inoltre, per l'applicazione dello schema chimico che porta alla determinazione delle concentrazioni di NOx e NO₂, sono richiesti i valori di ozono misurati in una o più stazioni di riferimento per l'area in esame. Le emissioni di PM₁₀ primario e NOx da combustione nei mezzi di cantiere vengono modellizzate come sorgenti volumetriche, mentre le emissioni di PM₁₀ per risollevarimento da aree sterrate sono più adeguatamente introdotte nel modello come sorgenti areali.

Risultati

Monitoraggio del PM₁₀

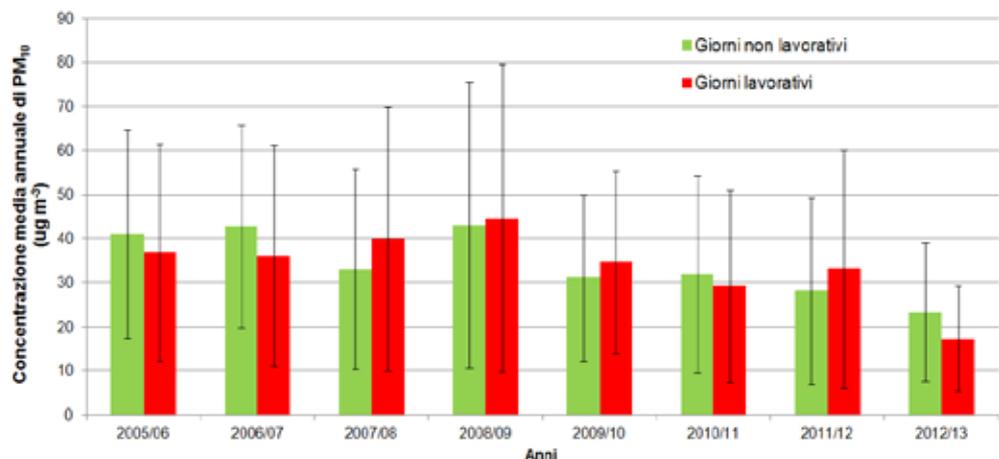
La figura 9 riporta il valore medio delle concentrazioni orarie di PM₁₀ nel periodo 2005-2013. Le medie orarie sono state suddivise fra giorni lavorativi e giorni non lavorativi (festività, periodo di ferie). La suddivisione fra periodi di lavoro e di chiusura dei cantieri ha lo scopo di evidenziare eventuali incrementi nel livello medio di concentrazione delle polveri nel caso di rilascio da parte dei cantieri.

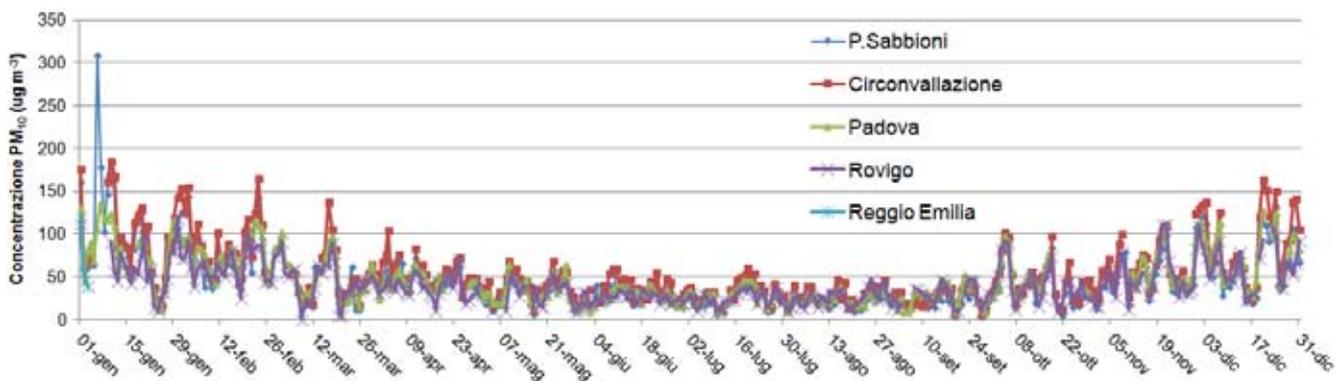
Come si nota dalla figura, i risultati non mettono in evidenza differenze statisticamente significative tali da evidenziare un diverso andamento nelle concentrazioni di particolato fra giorni di attività di cantiere e periodi di cantiere chiuso.

Un aspetto interessante, emerso durante gli anni di monitoraggio, riguarda la correlazione spaziale fra i livelli di concentrazione. La figura 10 riporta, per l'anno 2007, preso a titolo di esempio, le concentrazioni medie giornaliere di PM₁₀ in diverse stazioni di misura: quella relativa al monitoraggio dei cantieri (Punta Sabbioni) e quelle gestite dalle ARPA Veneto ed Emilia-Romagna. I risultati ottenuti applicando il coefficiente di correlazione lineare evidenziano una correlazione significativa (maggiore di 0.75) fra le concentrazioni di PM₁₀ misurate tra Punta Sabbioni e quelle misurate a Rovigo, mentre la correlazione tra le concentrazioni di PM₁₀ misurate tra Punta Sabbioni e quelle misurate nelle stazioni di Reggio Emilia risulta inferiore (dell'ordine di 0.6). Ciò significa che esiste un andamento simile fra le concentrazioni di particolato presenti nella laguna di Venezia e nella regione Veneto, mentre per quanto riguarda l'Emilia-Romagna la meteorologia risulta disaccoppiata da quella presente nel Veneto.

Infatti, la maggior parte dei superamenti medi giornalieri di PM₁₀ a Punta Sabbioni (concentrazioni superiori a 50 µg m⁻³) avvengono anche in altre stazioni del Veneto e quindi non sono dovuti ai cantieri quanto piuttosto ad una situazione di inquinamento a scala regionale.

9. Concentrazioni medie di PM₁₀ per anno di monitoraggio suddivise fra periodi lavorativi e non lavorativi a Punta Sabbioni. Nel grafico è riportata anche una deviazione standard rispetto alla media.



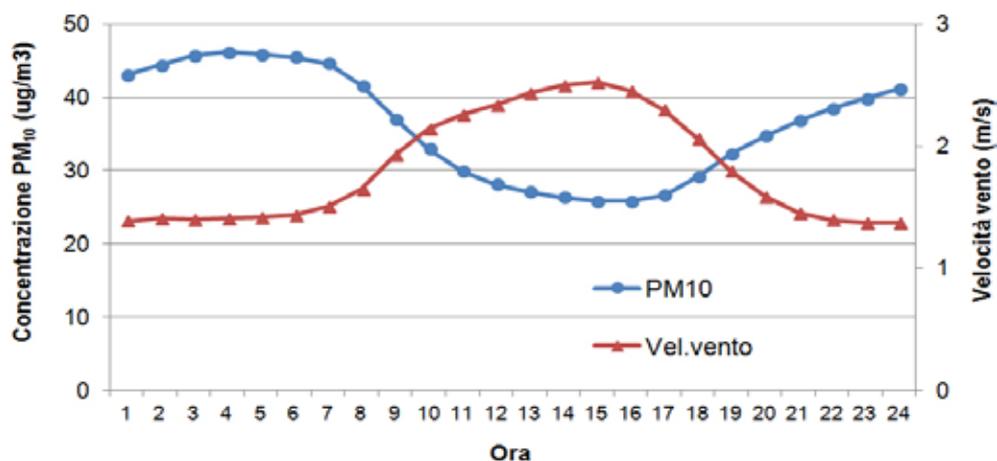


10. Concentrazioni medie giornaliere di PM₁₀ in diverse stazioni di monitoraggio (anno 2007).

La figura 11 mostra la concentrazione di PM₁₀ e la velocità del vento del “giorno tipo”, ottenuto considerando i dati dell’intero periodo di campionamento. Si osserva una anticorrelazione fra i livelli di concentrazione e la velocità del vento: in condizioni di maggiore intensità del vento i valori di concentrazione di particolato diminuiscono. Inoltre si osserva il tipico andamento presente in condizioni di brezza di mare: nella parte centrale della giornata la brezza marina provoca la diminuzione dell’inquinamento, mentre nelle ore notturne si hanno valori di concentrazione di PM₁₀ più elevate; ciò è dovuto principalmente alla minore turbolenza dell’atmosfera nelle ore notturne a seguito della assenza della radiazione solare. Quindi in queste ore il rimescolamento dell’atmosfera risulta minore rispetto alle ore diurne determinando un accumulo delle sostanze inquinanti rilasciate al suolo. Occorre notare, come rilevato in letteratura (Santi *et al.*, 2010), che i sistemi ottici di misura del particolato sono influenzati dalla umidità relativa e quindi, in presenza di valori elevati di quest’ultima, le concentrazioni possono aumentare; per questo motivo l’impiego di sensori ottici di particolato risulta significativo in un contesto di confronto fra valori relativi, come svolto durante il monitoraggio, piuttosto che considerare i singoli valori assoluti delle concentrazioni.

Al fine di evidenziare eventuali eventi di emissione di particolato da parte del cantiere di Punta Sabbioni, alla scala temporale oraria, è stato valutato l’andamento della serie temporale delle concentrazioni medie orarie di particolato. In particolare è stato considerato sia il confronto, come già detto, fra le concentrazioni misurate in orari di attività e di non attività dei cantieri, sia incrementi improvvisi dei livelli di concentrazione (superamento del valore limite orario) in presenza di vento proveniente dalla direzione dove si trova il cantiere rispetto al sensore di misura.

Ciascuno di questi eventi è stato analizzato e, in presenza di valori o andamenti “ano-



11. Giorno tipo a Punta Sabbioni per il PM₁₀ e la velocità del vento.

12. Esempio di rilascio di polveri dovuto al transito di mezzi pesanti all'interno del cantiere di Punta Sabbioni.



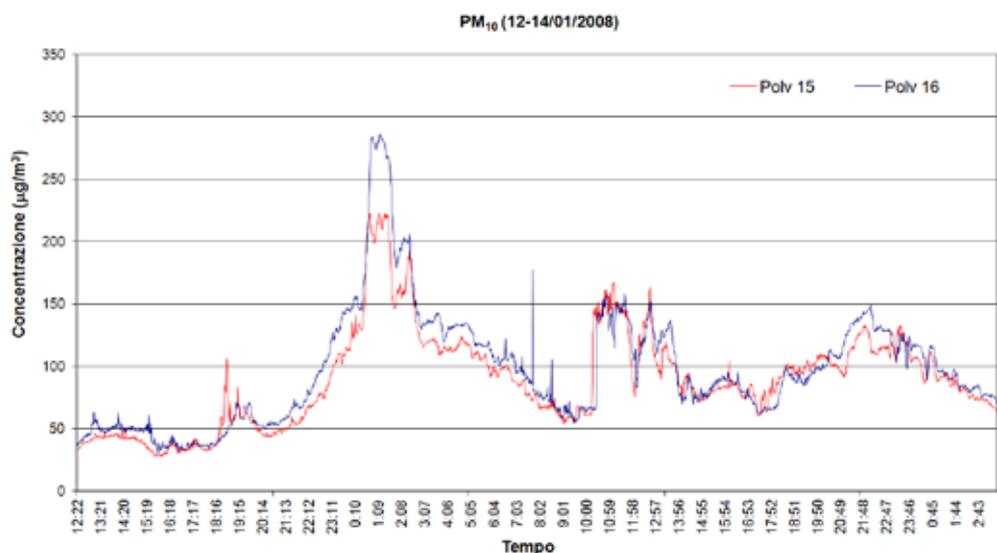
mali”, è stato inviato alla Direzione Lavori dei cantieri un Rapporto di Anomalia, con la richiesta di avere dettagli sulle attività svolte in quel dato momento. Nella maggiore parte dei casi tali eventi sono risultati conseguenti alle particolari condizioni atmosferiche presenti nel territorio e non dovuti alle specifiche attività in corso in cantiere in quel dato momento.

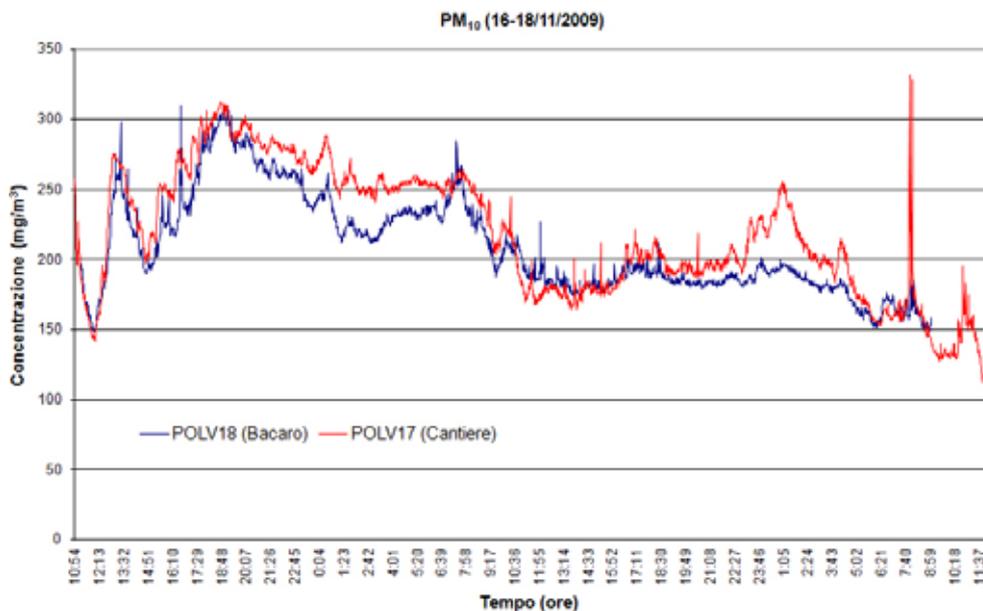
Durante il monitoraggio sono state considerate anche le concentrazioni di particolato ad una scala temporale ancora più breve (minuto) al fine di evidenziare brevi rilasci da parte dei cantieri non visibili nel processo di media giornaliera o oraria. Scopo principale di questa tipologia di monitoraggio, confrontando livelli di concentrazione di particolato all'interno ed all'esterno dei cantieri nelle stesse condizioni, è quello di evidenziare episodi acuti di trasporto di polveri quali quelli evidenti nella figura 12 dovuti, in questo caso, al passaggio di mezzi pesanti su percorsi non asfaltati.

Occorre sottolineare che le concentrazioni di polveri misurate con le due centraline mobili non sono confrontabili direttamente con i valori ottenuti con il metodo gravimetrico (previsto dalla normativa vigente). Infatti i valori, fra queste due diverse metodiche, possono differire notevolmente sia per l'interferenza dell'umidità relativa, già citata, sia per la diversa risposta fornita dai due metodi (quello ottico e quello gravimetrico).

La figura 13 riporta un tipico esempio di monitoraggio, eseguito a Malamocco dal 12

13. Misure di polveri effettuate con le centraline mobili (Dust Track): POLV16 posizionato all'interno del cantiere e POLV15 all'esterno.





14. Misure di polveri effettuate con le centraline mobili (Dust Track): POLV17 posizionato all'interno del cantiere e POLV18 all'esterno.

al 14 gennaio del 2008. Si osserva una sovrapposizione fra le misure ottenute all'interno ed all'esterno del cantiere sia durante le ore notturne che diurne, non evidenziando quindi episodi di trasporto di polveri.

Viceversa la figura 14 riporta un tipico esempio di monitoraggio eseguito a Punta Sabbioni dove risulta evidente un picco di concentrazione di polveri all'interno del cantiere.

Si possono osservare, in entrambi i grafici, dei picchi di concentrazione nelle prime ore del mattino, misurati dalla centralina posizionata all'interno del cantiere. È probabile siano dovuti all'avvio delle macchine di cantiere. Non sono stati comunque osservati eventi di trasporto di polveri verso l'esterno.

La maggior parte delle emissioni di breve periodo all'interno dei cantieri sono dovute al passaggio dei veicoli pesanti o al sollevamento eolico. Per limitare questi episodi risulta fondamentale adottare azioni di mitigazione che, in questo caso, prevedono l'umidificazione dei terreni (figura 15). I monitoraggi di breve periodo hanno permesso quindi di verificare l'applicazione di tali azioni di mitigazione, cosa che non sarebbe stato possibile evidenziare utilizzando metodi più tradizionali di misura basati su medie giornaliere.



15. Bagnatura del terreno all'interno di una area di cantiere per limitare la risospensione di polveri a causa del passaggio di veicoli pesanti.

Composizione elementale del PM₁₀

I campionamenti di PM10 per la determinazione della composizione elementale sono stati effettuati in postazioni prossime ai cantieri fra il 2006 e il 2015 alle tre bocche di porto: Punta Sabbioni, Chioggia e Malamocco.

I risultati medi dei 10 anni di monitoraggio sono riportati nella figura 16.

Gli elementi Ni, As, Cd, e Pb sono soggetti a limiti legislativi (D.Lgs. 155/2010) che identificano valori obiettivo per Ni, As, e Cd ed il valore limite per il Pb.

Nella Tabella 1 sono riportate le concentrazioni medie ottenute presso i siti di misura e quelle determinate da ARPAV presso i siti della propria rete di monitoraggio della qualità dell'aria. Le concentrazioni ottenute nel corso del presente studio sono confrontabili con quelle determinate da ARPAV e paragonabili a quelle ottenute in precedenti studi svolti nell'area lagunare. A titolo di esempio si riporta il caso del Nichel la cui concentrazione, pari a 5, 4 e 14 ng m⁻³, è stata determinata in 3 diversi studi svolti al Lido rispettivamente da Rampazzo *et al.* (2008), Masiol *et al.* (2010) e Toscano *et al.* (2011), tutti valori confrontabili con quanto misurato durante il monitoraggio.

Le concentrazioni misurate durante il monitoraggio sono risultate perciò all'interno dei rispettivi valori obiettivo e limite legislativo, anche se è da osservare che tale confronto è di natura qualitativa in quanto le campagne effettuate non coprono l'anno solare, come invece prevede la normativa.

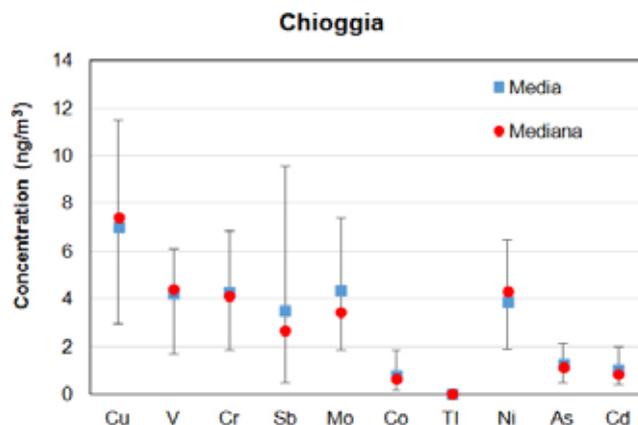
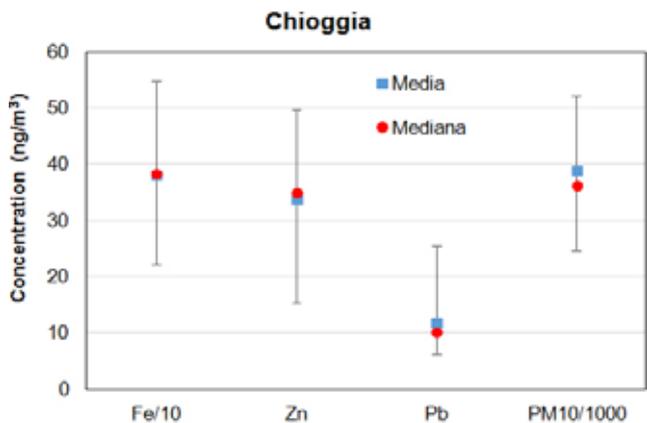
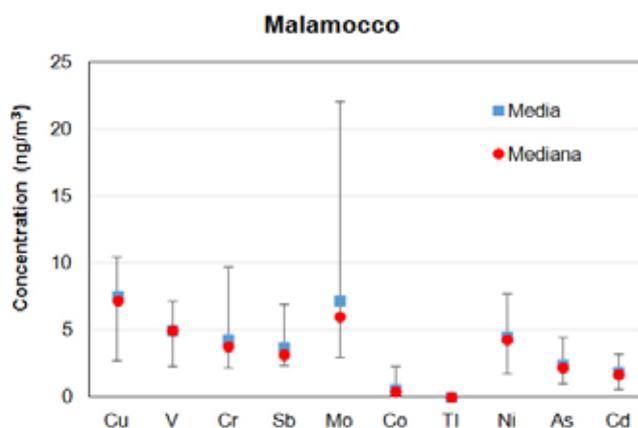
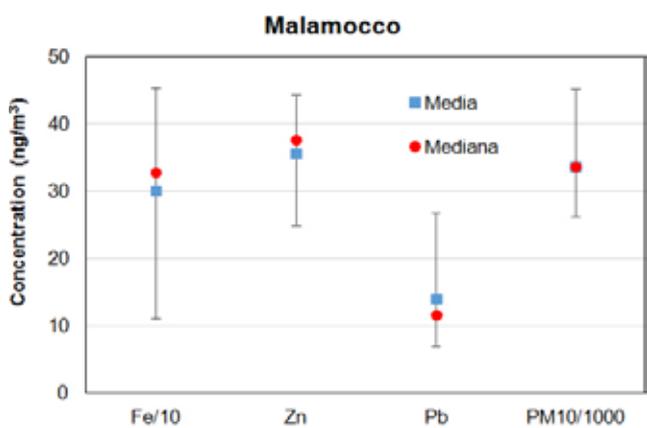
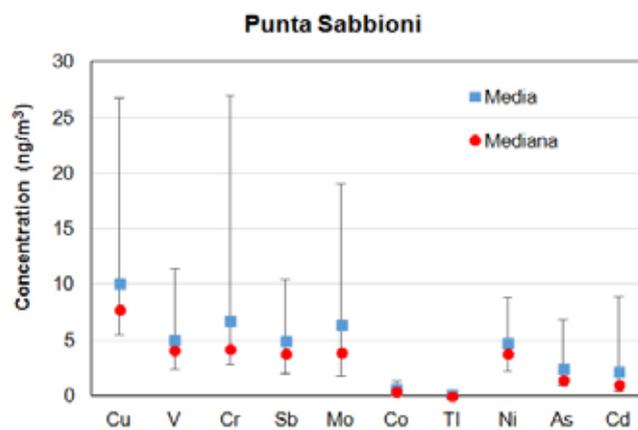
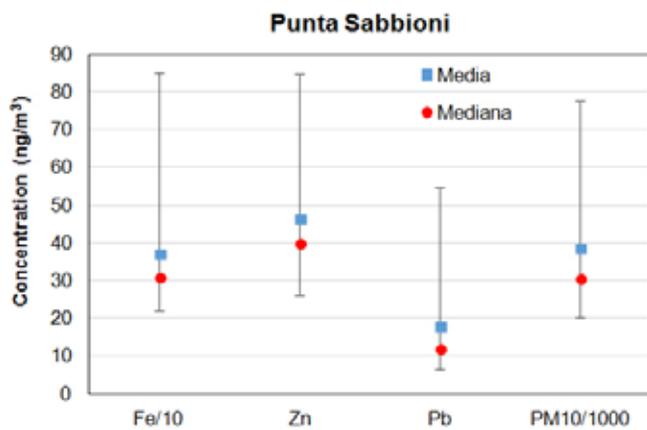
La figura 17 mostra gli andamenti delle concentrazioni assolute e relative (cioè il rapporto fra le concentrazioni di ogni elemento e la concentrazione di PM₁₀) per Cd, Ni, e V presso i tre siti di misura alle bocche di porto. Il primo valore (secondo anno di monitoraggio), per quanto riguarda Punta Sabbioni, è relativo ad una sola campagna di misura e quindi meno significativo rispetto agli altri anni. Si osserva un decremento nella concentrazione del Cd a Punta Sabbioni non visibile presso gli altri siti, mentre le concentrazioni di Ni mostrano, sempre a Punta Sabbioni, un generale incremento nel corso degli anni di monitoraggio (incremento meno visibile a Malamocco), che non è tuttavia correlato con un incremento delle concentrazioni di Vanadio.

Vanadio e Nichel sono frequentemente utilizzati come traccianti di emissioni dovute alla combustione di motori diesel, incluse le emissioni da traffico marittimo (Viana *et al.*, 2009; Cesari *et al.*, 2014).

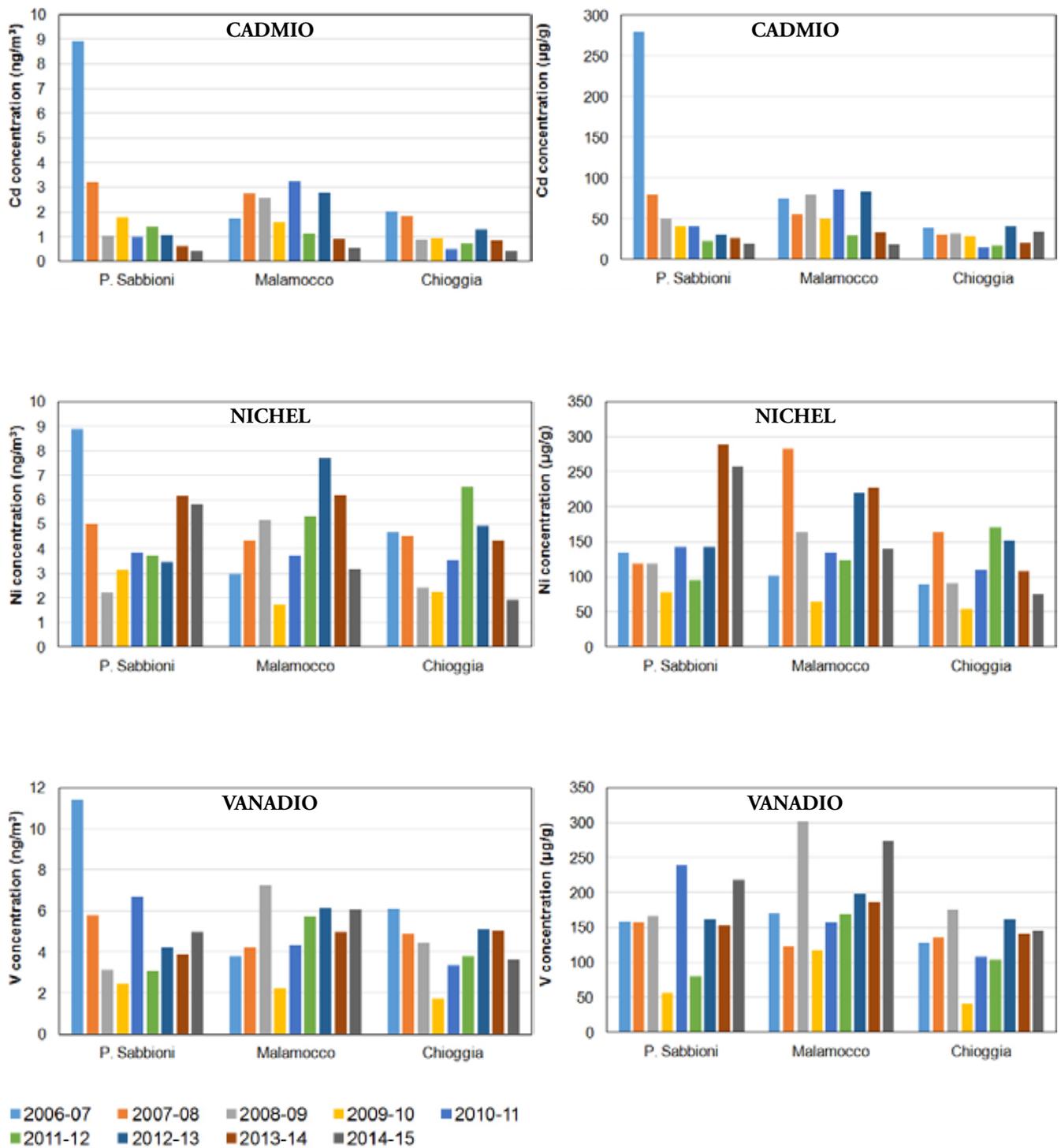
I valori misurati nei giorni lavorativi sono stati confrontati con quelli dei giorni di assenza di attività cantieristica. Nella figura 18 sono riportati i rapporti fra le due medie. Si osserva che le concentrazioni medie nei giorni lavorativi sono di poco superiori a

Tabella 1. Concentrazioni medie (ng m⁻³) dei metalli rilevate nei siti di misura (Chioggia, Malamocco, Punta Sabbioni) e in alcuni siti della rete di Monitoraggio dell'ARPA Veneto.

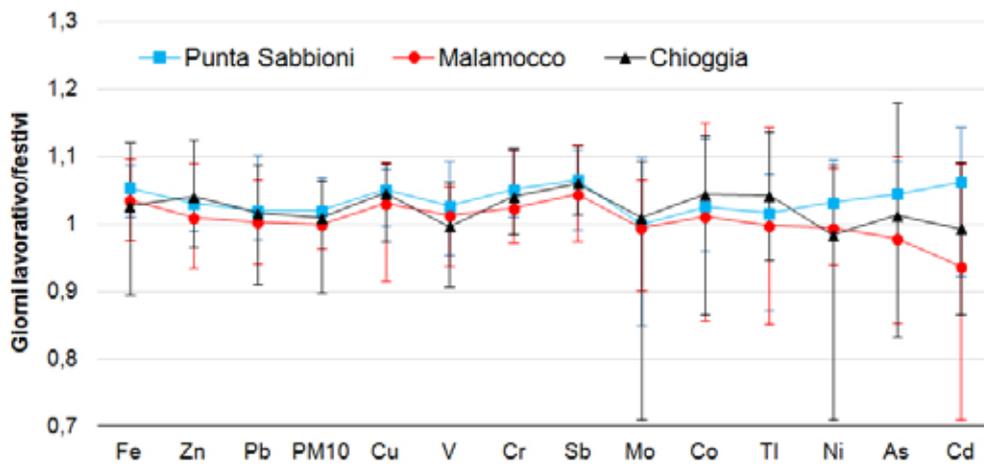
Elemento	Chioggia	Malamocco	Punta Sabbioni	ARPA Veneto (Relazioni Qualità dell'aria 2005-2014)		
				A. Da Mestre	Bissuola	Via Circonvallazione
Nichel	3.9 (STD 1.5)	4.5 (STD 1.8)	4.7 (STD 2.2)	5.5 (2005)	5.4 (2006), 6.9 (2007), 7.2 (2008), 3.9 (2009), 3.8 (2010), 3.2 (2011), 3.2 (2012), 4.6 (2013), 2.9 (2014)	7.1 (2006), 8.7 (2007), 8.3 (2008)
Arsenico	1.3 (STD 0.6)	2.4 (STD 1.0)	2.4 (STD 1.9)	2.9 (2005)	4.5 (2006), 3.4 (2007), 3.0 (2008), 2.3 (2009), 1.8 (2010), 2.2 (2011), 2.1 (2012), 2.9 (2013), 2.1 (2014)	4.3 (2006), 3.5 (2007), 2.7 (2008)
Cadmio	1.1 (STD 0.6)	1.9 (STD 1.0)	2.2 (STD 2.7)	3.7 (2005)	4.1 (2006), 3.5 (2007), 2.8 (2008), 1.9 (2009), 1.6 (2010), 1.7 (2011), 1.4 (2012), 1.3 (2013), 1.8 (2014)	4.2 (2006), 3.2 (2007), 2.4 (2008)
Piombo	11.9 (STD 6.3)	14.0 (STD 6.2)	18 (STD 15.5)	20.1 (2005)	25.4 (2006), 19.0 (2007), 20.0 (2008), 13.8 (2009), 13.8 (2010), 13.4 (2011), 9.0 (2012), 9.0 (2013), 8.0 (2014)	27.8 (2006), 26.2 (2007), 20.0 (2008)



16. Valori mediani e medi di concentrazioni dei metalli nel PM₁₀ misurate alle tre bocche di porto. La barra di errore rappresenta l'intervallo minimo-massimo della variabilità delle concentrazioni. Il Fe è riportato dividendo la concentrazione per un fattore 10 ed il PM₁₀ è riportato in µg/m³.
Le barre di errore mostrano la variabilità dei dati ottenuti (intervallo minimo-massimo) rispetto alla media.



17. Andamenti nelle concentrazioni medie assolute (a sinistra) e relative (a destra) di cadmio (sopra), nichel (in centro) e vanadio (in basso) nel PM₁₀ nei tre siti di misura nel corso degli anni di monitoraggio, dal 2006 al 2015.



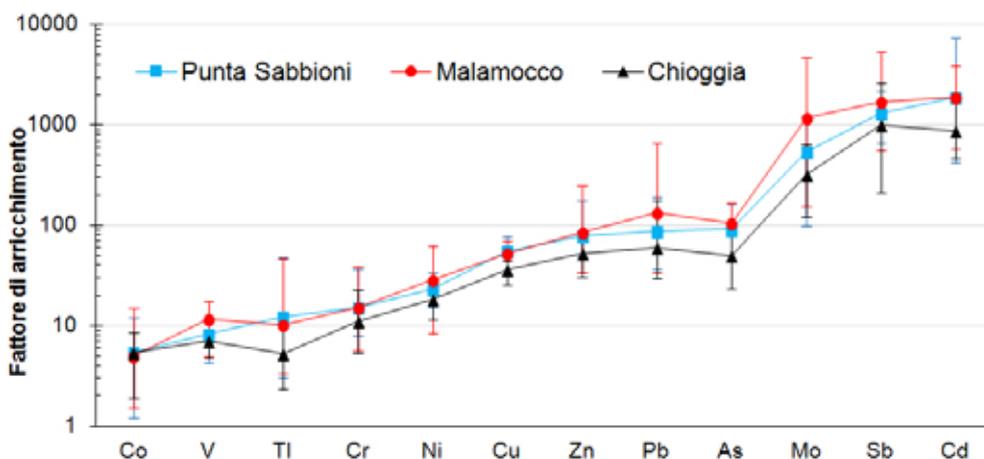
18. Media dei rapporti fra le concentrazioni degli elementi analizzati nel PM_{10} ottenute nei giorni lavorativi e quelle ottenute nei giorni festivi.

quelle dei giorni festivi ma all'interno della variabilità dei dati (barre degli errori); perciò non si osservano differenze statisticamente significative fra i due periodi.

Sono state anche confrontate le concentrazioni medie, per ciascun elemento, separando le situazioni nelle quali la stazione di misura era sottovento rispetto ai cantieri dalle altre direzioni del vento. Anche in questo caso non si sono rilevate differenze statisticamente significative fra i diversi settori di provenienza del vento (Contini *et al.*, 2012). I fattori di arricchimento crostale "crustal enrichment factors-EFs" sono stati calcolati per identificare contributi antropogenici. I valori di EF possono fornire informazioni sull'origine antropogenica di alcuni elementi e quindi sulle possibili sorgenti di emissioni (Watson *et al.*, 2002, Lu *et al.*, 2007). Valori di EF inferiori a 10 indicano una prevalenza di origine crostale, mentre valori superiori a 20 indicano che quell'elemento ha probabilmente un contributo antropico. Infine valori compresi fra 10 e 20 non permettono di discriminare fra i due casi. (Cesari *et al.*, 2012).

La figura 19 mostra i fattori di arricchimento ottenuti, nel corso del monitoraggio dei cantieri del MOSE, prendendo il Fe come elemento di riferimento, la cui concentrazione crostale è ottenuta da Wedepohl (1995). Anche se Si, Al, Fe e Tl sono generalmente impiegati come elementi di riferimento data la loro abbondanza nella crosta terrestre, in questo caso si è scelto il Ferro in quanto nella laguna di Venezia gli altri elementi potrebbero avere una origine anche antropogenica (Rampazzo *et al.*, 2008; Masiol *et al.*, 2010, Stortini *et al.*, 2009, Toscano *et al.*, 2011).

La figura mostra valori di EF superiori a 20 per Cu, Zn, Pb, As, Mo, Sb, Cd, mentre V, Tl, Cr si trovano nella fascia di non decisione e prossimi a rapporti che indicano una



19. Valori medi di EF calcolati alle tre bocche di porto. Le barre degli errori rappresentano la variabilità nel corso degli anni di monitoraggio.

origine crostale. A Malamocco i fattori di arricchimento per il V e il Ni sono superiori rispetto agli altri siti ed è compatibile con un possibile contributo dovuto al traffico marittimo.

L'analisi statistica relativa al contributo delle varie sorgenti sulla concentrazione delle polveri, cosiddetta analisi di "source apportionment", e la correlazione con i dati meteorologici non ha evidenziato contributi specifici dovuti alle attività cantieristiche. Inoltre il confronto statistico fra i risultati delle misure effettuate presso i tre siti mostra una sostanziale omogeneità nella concentrazione dei metalli nell'area lagunare. (Contini *et al.*, 2012).

Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)

La Tabella 2 riporta i valori medi, minimi e massimi delle concentrazioni di IPA per l'intero periodo di monitoraggio, separando le fasi gas e aerosol.

Le concentrazioni misurate risultano paragonabili a quelle riportate in precedenti studi nella laguna di Venezia (Contini *et al.*, 2011, Gambaro *et al.*, 2004, Gregoris *et al.*, 2014) e inferiori ai dati raccolti in altri siti urbani Europei, quali ad esempio Oporto (Portogallo) con una media di IPA totali di 70 ng m⁻³ (Slezakova *et al.*, 2013) e Kocaeli (Turchia) con una media di IPA totali di 108 ng m⁻³ (Gaga *et al.*, 2012). Le figure 20 e 21 mostrano un esempio dell'andamento giornaliero delle concentrazioni di IPA rilevate alle bocche di porto, sia nella fase gassosa che aerosol, relativo all'anno di monitoraggio 2012.

Risulta evidente un andamento caratterizzato da valori più elevati di IPA nel periodo invernale rispetto ai periodi primaverile ed estivo; tale andamento riflette, come già ricordato, la stagionalità delle sorgenti di IPA legate al riscaldamento domestico. Si osserva inoltre che le concentrazioni risultano maggiori nella fase gas rispetto alla fase aerosol, come già osservato in letteratura (Gambaro *et al.*, 2004).

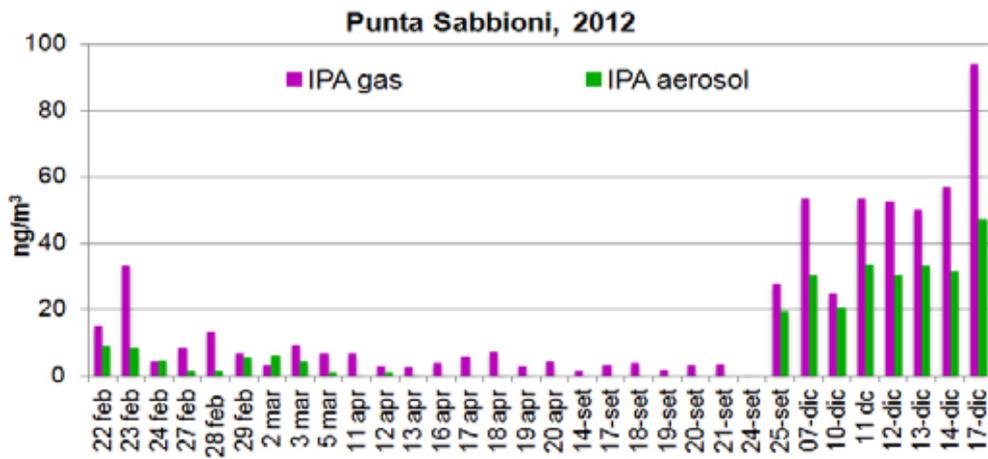
Nelle analisi dei dati relativi agli IPA vengono considerati separatamente le concentrazioni di BaP nella fase aerosol (soggetto al valore obiettivo legislativo di 1 ng m⁻³) e il Fluorantene (fase aerosol), ritenuto significativo per le emissioni diesel (Masclat *et al.*, 1986). Inoltre Khalili *et al.* (1995) hanhno identificato come IPA diesel la somma delle concentrazioni di Naftalene, Acenaftene, Acenaftilene, Fluorene, Fenantrene e BaP. Le figure 22 e 23 mostrano le concentrazioni di BaP, Fluorantene e IPA diesel ottenute nei diversi anni di monitoraggio a Punta Sabbioni e a Malamocco.

Come esempio di elaborazione dei dati si riportano i risultati del monitoraggio relativo agli anni 2013-2014 (PROVV.OO.PP.-CORILA, 2014-2015). La Tabella 3 riporta il confronto fra le concentrazioni di BaP con i rispettivi indici di variabilità stagionale ottenuti dalle misure effettuate da ARPA Veneto e pubblicate nelle Relazioni Regionali della Qualità dell'Aria, in analoghi periodi dell'anno.

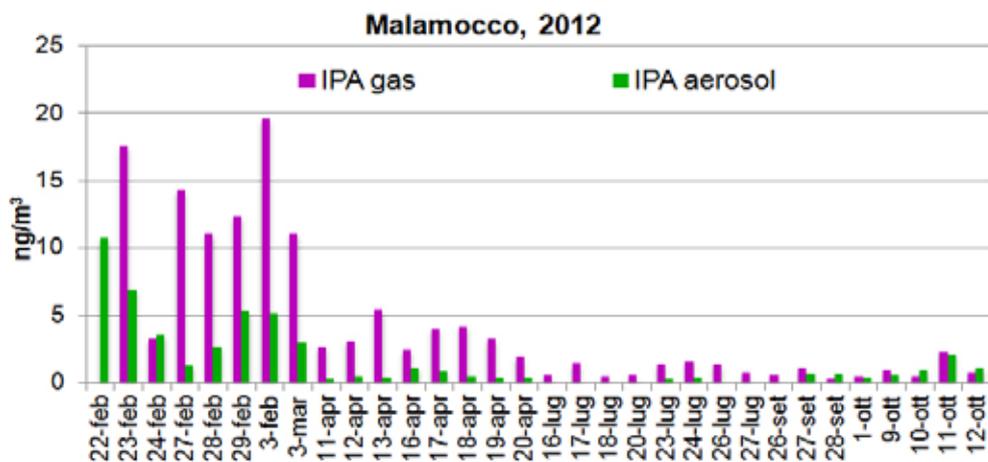
A titolo di esempio nel corso del 2013 presso la stazione di Bissuola, stazione di fondo urbano, è stato osservato un valore medio della concentrazione di B(a)P pari a circa 1.3 ng m⁻³ (Relazione Regionale della Qualità dell'Aria 2013, ARPA Veneto), che risul-

Tabella 2. Concentrazioni (ng m⁻³) medie, minime e massime di IPA sia nella fase gassosa che aerosol per 10 anni di misura.

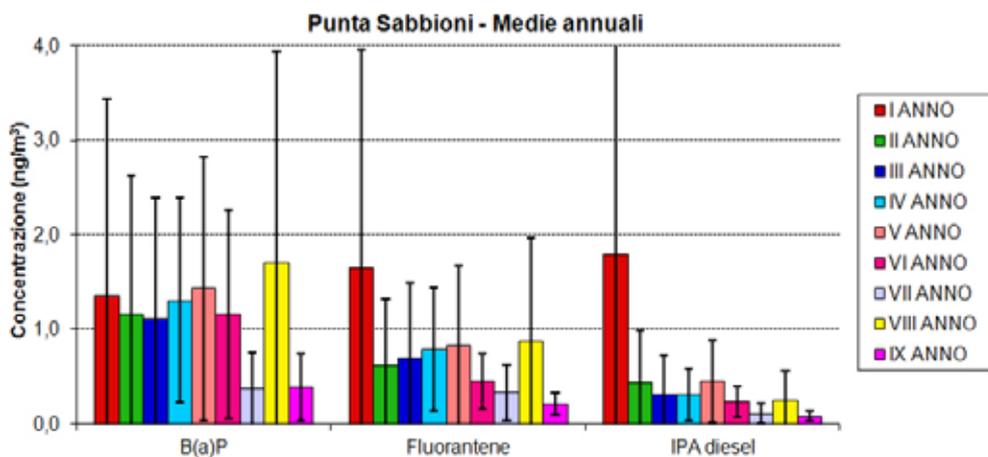
Sito		IPA Particolato	IPA Gas	IPA Totali (particolato+gas)
Punta Sabbioni	Media	9.0	18	27
	Min	0.0	0.6	0.6
	Max	55	120	167
Malamocco	Media	2.0	5.2	7.2
	Min	0.0	0.0	0.5
	Max	18	73	91



20. Concentrazione di IPA nella fase aerosol e gas a Punta Sabbioni per l'anno 2012.



21. Concentrazione di IPA nella fase aerosol e gas a Malamocco per l'anno 2012.



22. Andamento delle concentrazioni di B(a)P, Fluorantene e IPA Diesel negli anni di monitoraggio (Punta Sabbioni), dal 2005 al 2015.

ta inferiore a quello ottenuto durante il monitoraggio.

Dalla tabella si osserva che le concentrazioni medie di BaP, ottenute in tutte le campagne effettuate a Punta Sabbioni ed a Malamocco, sono inferiori al limite legislativo di 1 ng m^{-3} ed al valore indicativo della variabilità stagionale.

23. Andamento delle concentrazioni di B(a)P, Fluorantene e IPA Diesel negli anni di monitoraggio (Malamocco), dal 2005 al 2015.

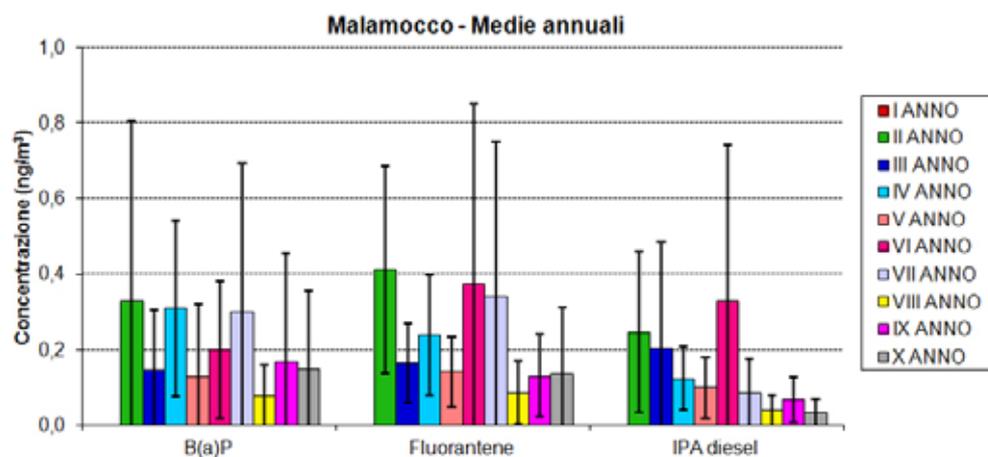


Tabella 3. Concentrazioni medie di BaP a Punta Sabbioni e Malamocco e soglie. L'indice stagionale è ottenuto dalla media annuale incrementata di una deviazione standard per tenere conto della variabilità annuale.

Sito		Media Benzo(a)pirene (ng/m ³)	Indice stagionale Benzo(a)pirene (ng/m ³)
Malamocco	1° Campagna: 01/10/13 – 16/10/13		
	Media	0.07	0.8
	Dev. Stand.	0.03	/
	2° Campagna: 14/02/14-03/03/14		
	Media	0.42	2.1
	Dev. Stand.	0.40	/
Punta Sabbioni	3° Campagna: 04/07/13-19/07/13		
	Media	0.01	0.1
	Dev. Stand.	0.01	/
	1° Campagna: 09/11/13-20/11/13		
	Media	0.20	3.4
	Dev. Stand.	0.13	/
Punta Sabbioni	2° Campagna: 14/02/14-03/03/14		
	Media	0.57	2.1
	Dev. Stand.	0.43	/

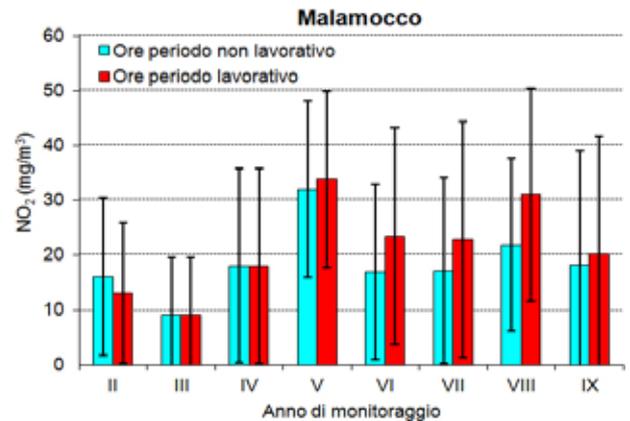
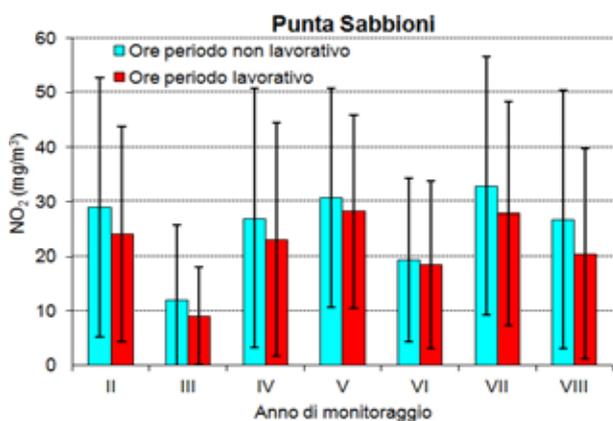
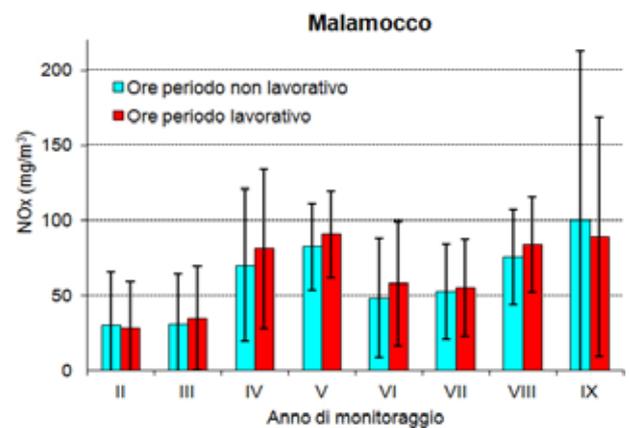
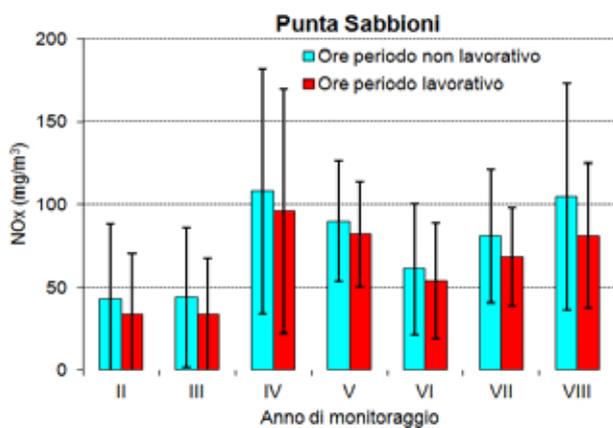
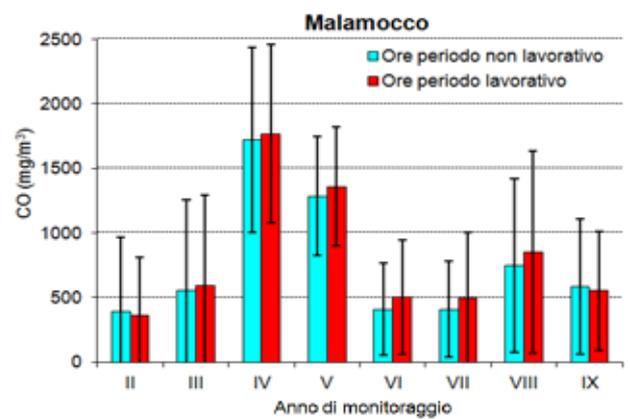
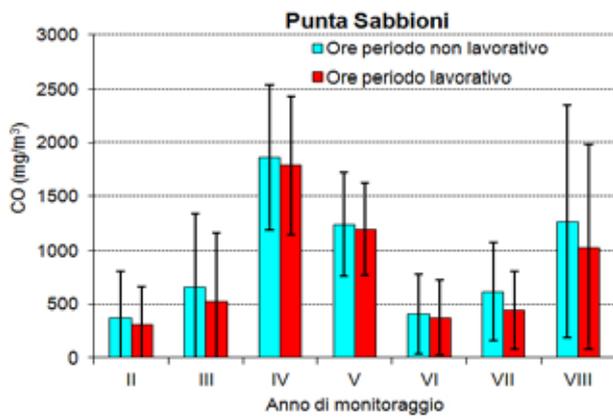
Composti gassosi

I composti gassosi (NO_x, NO₂, e CO) sono stati monitorati con la frequenza oraria durante campagne di misura della durata di 8 giorni. I dati sono stati analizzati considerando le medie ottenute nei periodi lavorativi e confrontate con quelle dei periodi festivi o di chiusura dei cantieri. La figura 24 mostra i risultati ottenuti per i diversi anni di monitoraggio per i due siti indagati di Punta Sabbioni e Malamocco. Le analisi non evidenziano differenze statisticamente significative fra i due periodi considerati.

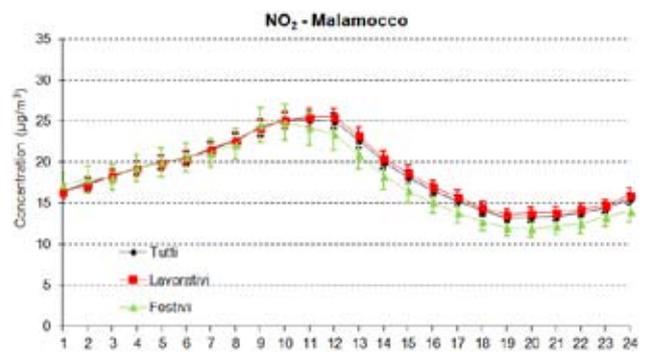
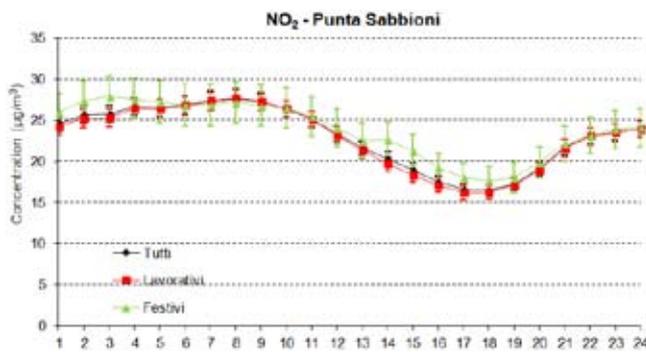
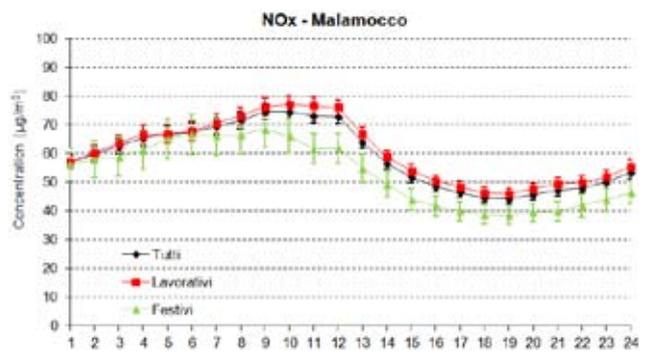
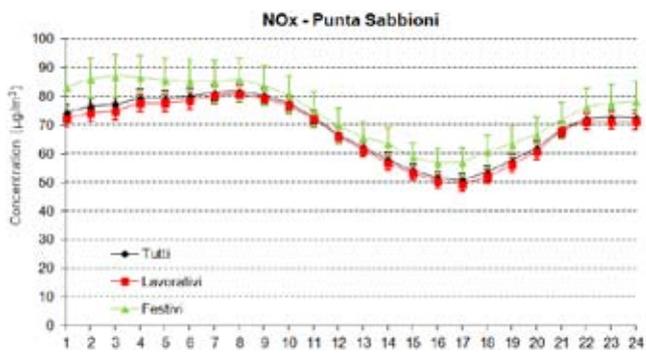
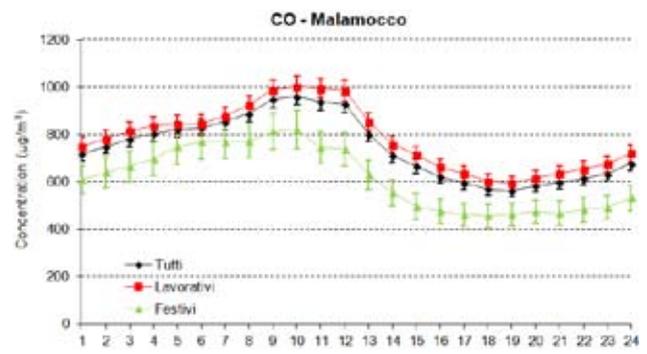
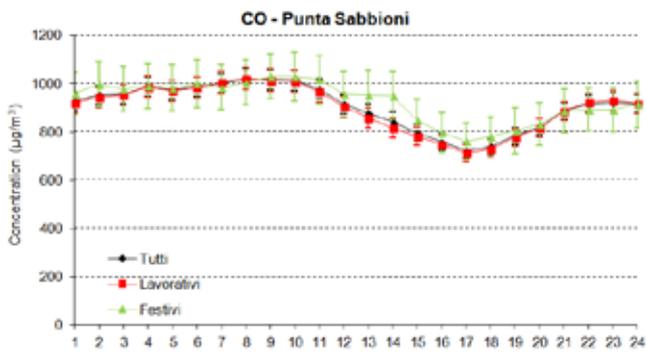
Il “giorno tipo” per ciascun composto gassoso viene riportato nella figura 25.

Il “giorno tipo” a Punta Sabbioni è diverso rispetto a quello di Malamocco: in quest’ultimo i picchi di concentrazione per tutti i gas sono visibili nella mattinata (dalle 9 alle 12) mentre a Punta Sabbioni è visibile l’effetto del regime di brezza che porta a un decremento delle concentrazioni dei gas in quelle ore. In entrambi i siti i “giorni tipo” non sono diversi fra periodi lavorativi e non, fornendo un ulteriore indizio di assenza di contributi specifici e diretti provenienti dalle attività di cantiere. Le concentrazioni dei gas tendono a crescere nelle ore notturne in entrambi i siti mostrando una correlazione con l’andamento dell’altezza dello strato limite atmosferico.

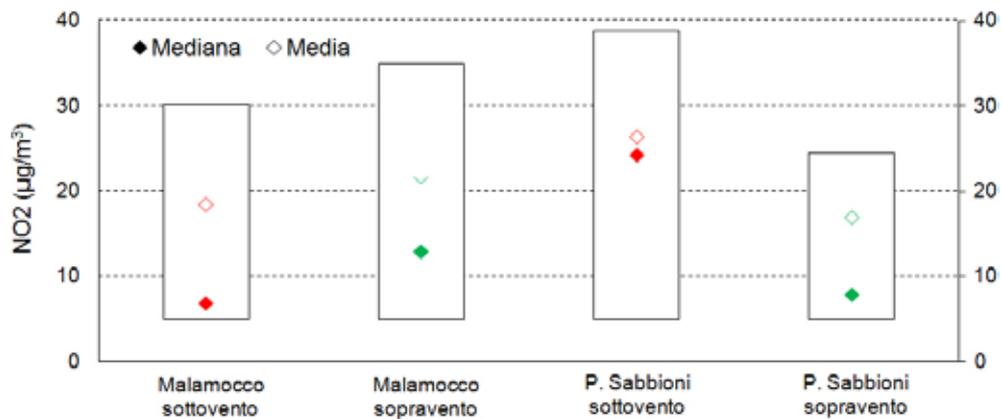
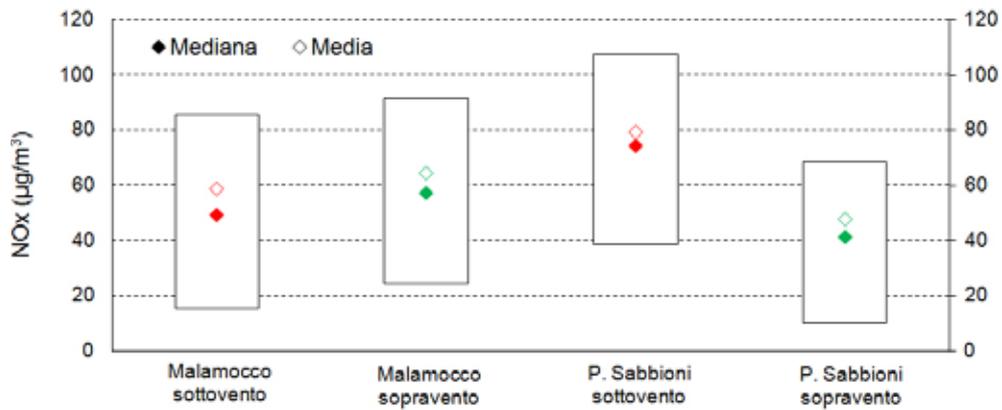
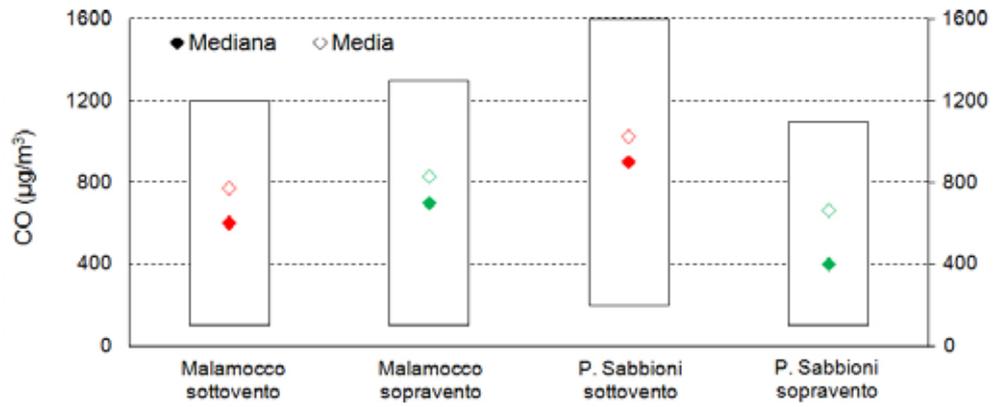
Per indagare più approfonditamente un eventuale contributo dei cantieri del MOSE, le concentrazioni dei gas misurate nelle sole ore lavorative (8-20) sono state raggruppate per settore di provenienza del vento. L’analisi è stata effettuata solo per le ore lavorative



24. Concentrazioni medie di CO, NO_x e NO₂ ottenute per i periodi lavorativi e non lavorativi a Punta Sabbioni e Malamocco. Le barre di errore rappresentano la deviazione standard, dal 2006 al 2015.



25. “Giorno tipo” festivo e lavorativo per i diversi composti gassosi monitorati. La barra degli errori indica la deviazione standard delle misure.



26. Concentrazioni medie e mediana di CO, NOx e NO₂ calcolate separatamente per settori di sottovento e sopravento rispetto alla posizione dei cantieri a Malamocco e Punta Sabbioni. Il box rappresenta l'intervallo interquartile (fra 25% e 75%). Sono considerate solo le ore lavorative.

(8-20). I risultati sono riportati in figura 26 e mostrano che a Malamocco le differenze fra i diversi settori del vento non sono apprezzabili (considerando l'intervallo interquartile fra 25% e 75%).

A Punta Sabbioni le differenze sono maggiori, anche se dai grafici si osserva che i due box si sovrappongono; non è pertanto da escludere che vi siano stati dei contributi provenienti dalle attività di cantiere, anche se in questo sito la direzione dei cantieri è in linea con quella dell'area industriale di Porto Marghera.

Deposizioni atmosferiche

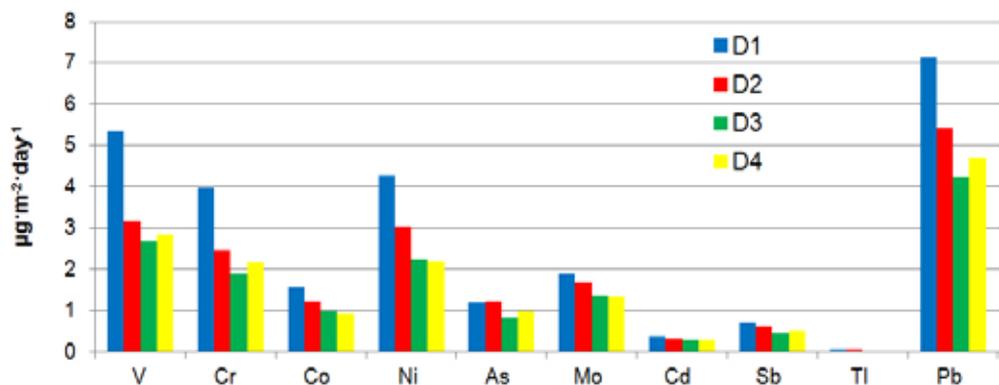
Le figure 27 e 28 riportano le concentrazioni medie delle deposizioni raccolte presso Punta Sabbioni nel periodo dal gennaio 2005 a maggio 2006. I valori di deposizione, sia per gli inquinanti inorganici che per gli organici, risultano più elevati per il deposimetro posizionato all'interno del cantiere (D1). Le differenze con gli altri deposimetri in posizioni diverse esterne al cantiere (D2, D3, D4) sono statisticamente significative.

I valori medi delle deposizioni atmosferiche raccolte all'esterno del sito di costruzione del MOSE risultano confrontabili senza evidenziare una anticorrelazione con l'aumentare della distanza dal cantiere. Da ciò si deduce che l'impatto dovuto alle attività di cantiere risulta confinato in una zona strettamente all'interno dell'area interessata dalle lavorazioni stesse.

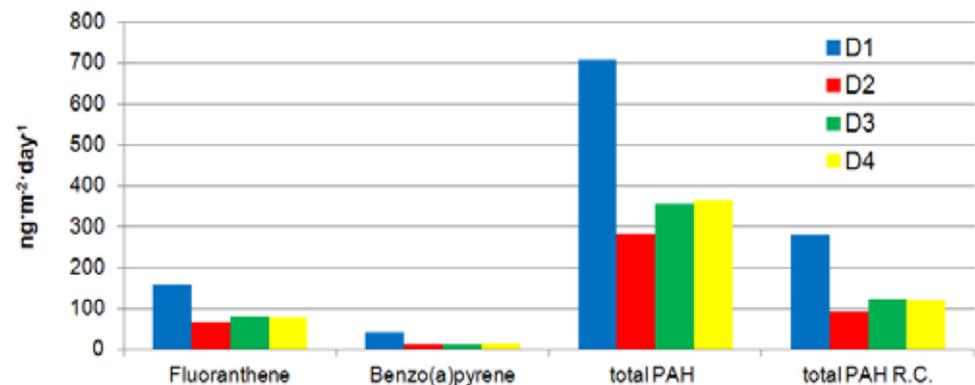
Poiché le deposizioni atmosferiche sono influenzate dalla precipitazione (intensità, tipologia e durata) i flussi di deposizione atmosferica nel deposimetro D4 (considerato come fondo) sono stati confrontati con tre diversi livelli di precipitazione: meno di 40 mm di acqua, fra 40 mm e 80 mm e maggiori di 80 mm.

Come si osserva dalle figure 29 e 30 si hanno maggiori flussi di deposizione in condizioni di elevate regime di precipitazione per i microinquinanti inorganici.

27. Deposizioni atmosferiche medie per i microinquinanti inorganici per i deposimetri D1, D2, D3 e D4 dal gennaio 2005 al maggio 2006.



28. Deposizioni atmosferiche medie per i microinquinanti organici per i deposimetri D1, D2, D3 e D4 dal gennaio 2005 al maggio 2006.

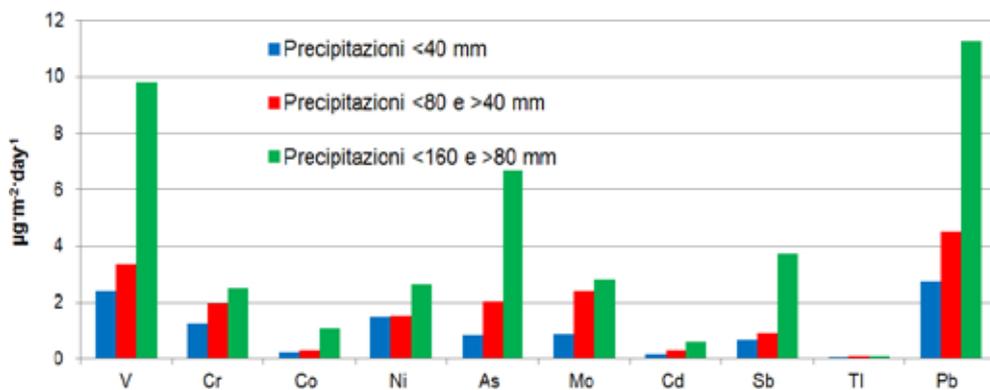


Per i microinquinanti organici si osservano in generale maggiori flussi di deposizione in condizione di precipitazione di media intensità e quindi in generale la correlazione fra flussi di deposizione e precipitazione risulta inferiore rispetto ai microinquinanti inorganici. Occorre considerare anche che gli IPA presentano un andamento stagionale e che i periodi di minore concentrazione (estivo e primaverile) sono anche periodi di minore precipitazione.

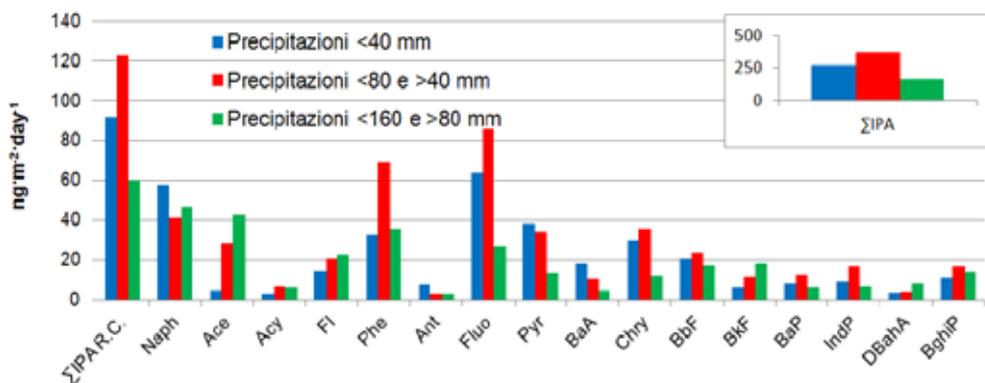
Per le deposizioni ottenute in D4 (in quanto si tratta del deposimetro per il quale è disponibile un numero sufficiente di dati) si è svolta un'analisi statistica PCA (analisi delle componenti principali), considerando come variabili le precipitazioni, i flussi di deposizione dei composti inorganici (As, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Pb, Sb, V) e organici: Fluorantene, ΣPAH (IPA totali) e ΣPAH R.C (IPA a rischio cancerogeno). Sono stati omessi i composti le cui concentrazioni sono risultate prossime ai rispettivi limiti di rilevazione. Questa analisi statistica permette di evidenziare eventuali relazioni esistenti tra le variabili e tra i campioni. Le figure 31 e 32 riportano i risultati ottenuti.

Nella figura 31 (score plot della prima componente rispetto alla seconda) vengono evidenziati due gruppi distinti di campioni: l'uno, cerchiato in rosso, che comprende tutti i flussi ottenuti in estate ed autunno e l'altro, cerchiato in blu, i flussi ottenuti nel periodo invernale. Questi due gruppi si distinguono in base all'importanza di alcune variabili che hanno valori diversi per i due gruppi.

L'esame del loading plot (figura 32) permette poi di stabilire che la differenza fra campioni estate-autunno ed inverno è dovuta principalmente a differenze nei flussi dei composti organici. Questa distinzione è in accordo con quanto rilevato in precedenza: i composti organici presentano un andamento stagionale indipendente dalla precipitazione che è più correlata con i flussi dei composti inorganici. Infatti nella figura 33 i campioni del periodo gennaio e ottobre 2009 (Jan-09 e Oct-09) sono separati dagli altri e questo è dovuto principalmente alle precipitazioni correlate con i flussi di As, Cd, Pb, Sb e V.

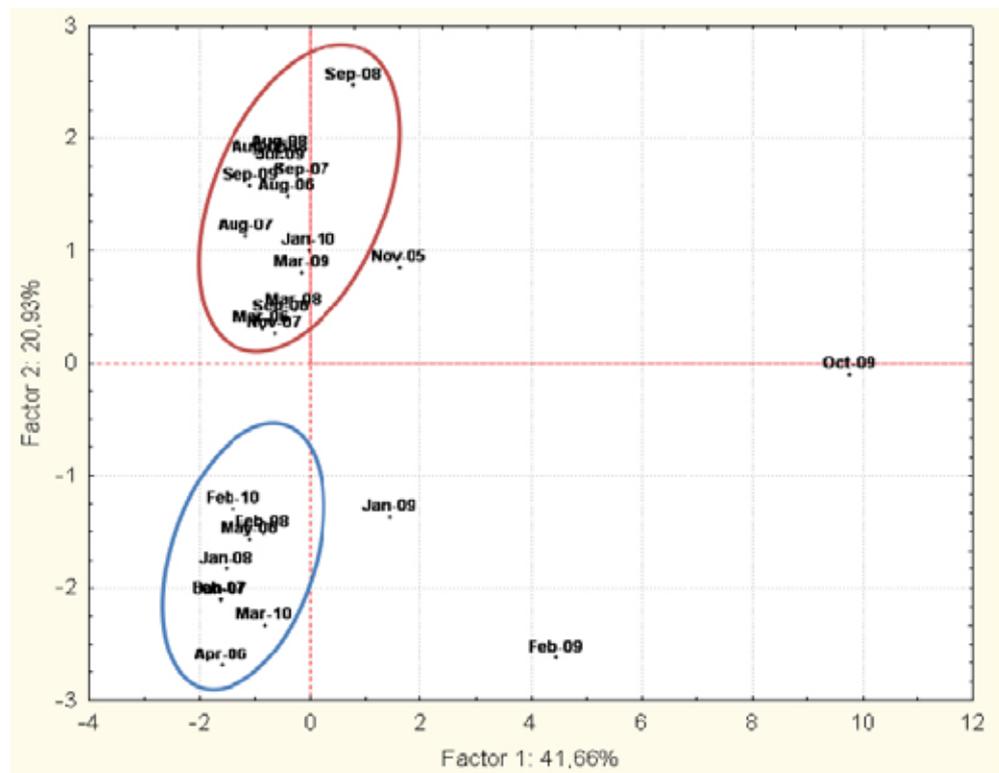


29. Flussi medi di deposizione atmosferica di microinquinanti inorganici nel deposimetro D4, in funzione della precipitazione.

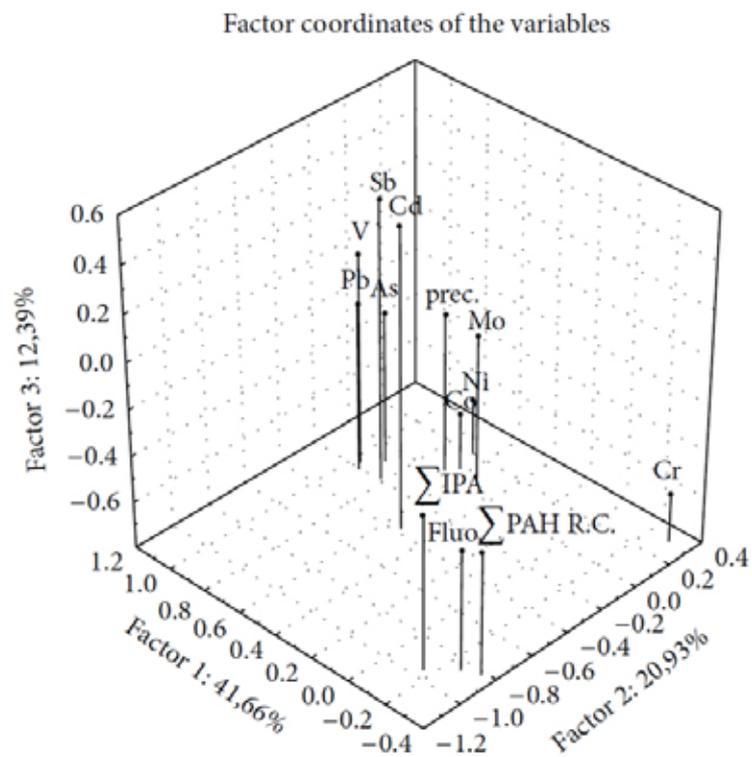


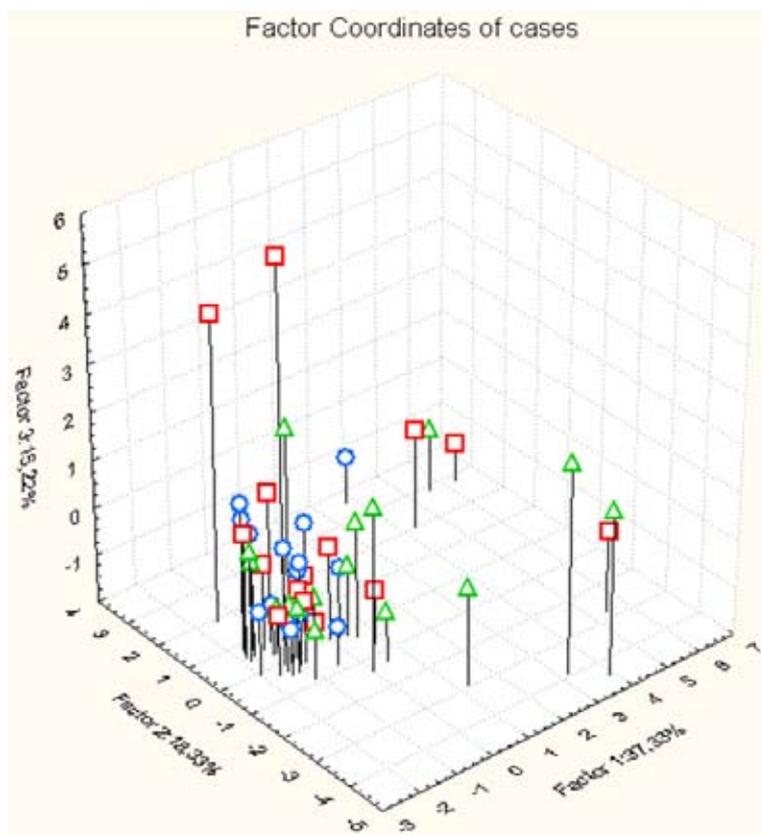
30. Flussi medi di deposizione atmosferica di microinquinanti organici nel deposimetro D4, in funzione della precipitazione. Le deposizioni totali di IPA sono riportate separatamente per la diversa scala.

31. Score plot delle due componenti principali ottenute con l'analisi PCA nei flussi di deposizione ottenuti con il deposimetro D4 (Morabito *et al.*, 2014).



32. Loading plot tridimensionale delle tre prime componenti ottenute con l'analisi PCA (Morabito *et al.*, 2014).





33. Score plot tridimensionale delle prime tre componenti principali ottenute tramite PCA dei flussi di deposizione campionati in D4 (cerchi blu) D5 (quadrati rossi) e D6 (triangoli verdi) da settembre 2006 a marzo 2009 (Morabito *et al.*, 2014).

Per valutare la distribuzione spaziale delle deposizioni atmosferiche sono stati analizzati, tramite la PCA, i flussi di deposizione ottenuti nei periodi di monitoraggio, cioè fra settembre 2006 e marzo 2009, simultaneamente nelle tre postazioni in prossimità dei cantieri, uno per bocca di porto.

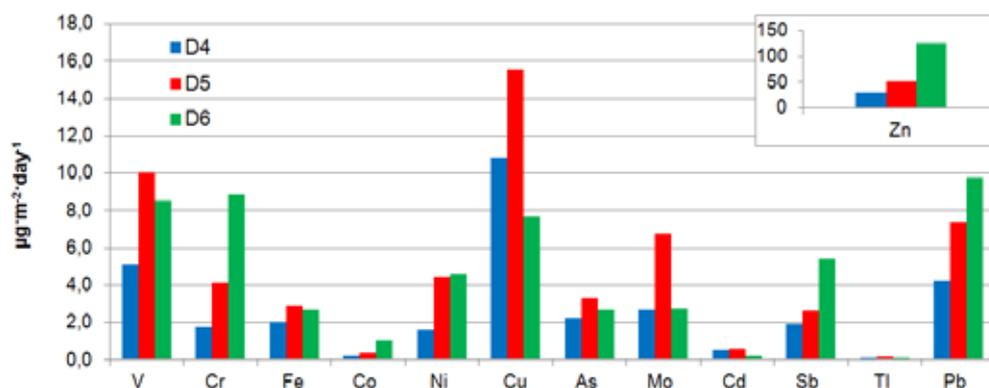
La Tabella 4 riporta i fattori delle variabili, basati sulla correlazione, delle prime tre componenti principali e in figura 33 lo score plot 3D delle prime tre componenti. Gli asterischi (Tabella 4) indicano come sono associate fra di loro le variabili. Ovvero nella prima componente principale incidono maggiormente V, Ni, As, Mo, Cd, Sb, Pb e precipitazione; nella seconda Cr e Co, e nella terza IPA e IPARC.

I campioni dei flussi a Punta Sabbioni (cerchi blu) sono tutti raggruppati. Per gli altri due siti (quadrati rossi a Malamocco e triangoli verdi a Chioggia) ci sono molti campioni separati dagli altri a causa del Fattore 1 (in particolare V, Ni, As, e Cd) e Fattore 3 (composti organici).

Variabile	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 3
V	0,951 ★	0,021	0,009
Cr	0,528	-0,685 ★	0,249
Co	0,416	-0,799 ★	0,29
Ni	0,847 ★	-0,357	0,112
As	0,741 ★	0,341	-0,157
Mo	0,619 ★	0,028	-0,218
Cd	0,694 ★	0,584	-0,166
Sb	0,547 ★	0,4	-0,14
Pb	0,583 ★	0,214	0,066
ΣPAH	0,11	0,444	0,84 ★
ΣPAH R.C.	-0,023	0,286	0,915 ★
prec	0,584 ★	-0,146	-0,039

Tabella 4. Coordinate dei fattori delle variabili delle prime tre componenti dei flussi in D4, D5 e D6 nel periodo settembre 2006-marzo 2009.

34. Flussi di deposizione medi per i deposimetri D4, D5, D6 da settembre 2006 a marzo 2009. Il Fe è espresso come $\text{mg m}^{-3} \text{d}^{-1}$. Le concentrazioni di Zinco sono riportate separatamente.



La figura 34 riporta la distribuzione spaziale delle deposizioni (D4 collocato presso Punta Sabbioni, D5 Malamocco e D6 Chioggia).

La analisi della distribuzione spaziale dei flussi di deposizione (figure 33 e 34) mette in risalto che nell'area vicino a Lido (Laguna Nord) i flussi sono inferiori rispetto alle altre aree lagunari e sono a carattere omogeneo (i cerchi di colore blu sono tutti raggruppati); negli altri siti, posizionati vicino a Malamocco e Chioggia, invece, i flussi di deposizione risultano più variabili (distribuzione dei rispettivi simboli più sparpagliata). È probabile che vicino a Chioggia si osservino interferenze dovute ad altre sorgenti, quali la vicina città di Chioggia e l'area del Po. Nel sito di Malamocco si sono osservati maggiori flussi di deposizione di microinquinanti organici, probabilmente dovuti ai combustibili dei numerosi mezzi marittimi che circolano in quell'area. Infine per tutti gli inquinanti monitorati non si osservano andamenti, crescenti o decrescenti, durante il periodo di monitoraggio.

Elaborazioni modellistiche

I risultati dei calcoli modellistici sono costituiti da valori orari di concentrazione di PM_{10} , NO_x e NO_2 nelle aree di bocche di porto. Essi possono essere presentati in termini di mappe spaziali dei valori di lungo termine (media annuale, n-simo massimo della serie annuale), di medio termine (medie stagionali), di breve termine (medie giornaliere o valori orari) delle concentrazioni dei diversi inquinanti trattati. Inoltre possono essere analizzate le serie temporali dei valori orari o giornalieri, secondo l'inquinante, in punti del dominio che corrispondono a siti sensibili o coincidenti con le stazioni di misura. L'andamento delle ricadute degli inquinanti in funzione della variazione delle condizioni meteorologiche indica come le concentrazioni maggiori siano associate a condizioni meteorologiche stabili (l'atmosfera può essere classificata come stabile quando i moti verticali sono rallentati e l'atmosfera è fortemente stratificata) con vento debole. Si tratta in genere di condizioni notturne, ma la presenza del mare, con inerzia termica tale da creare condizioni molto più stabili di quelle sulla terraferma, induce nel modello meteorologico CALMET (preprocessore del modello di dispersione CALPUFF) l'instaurarsi, in alcuni casi, di condizioni molto stabili anche durante il giorno. È proprio in queste condizioni che il modello simula le ricadute maggiori, con particolare riferimento ai casi in cui si verificano contemporaneamente condizioni di calma di vento.

In tutte le annualità in cui si è applicata la modellistica, cioè dal 2011 al 2014, per tutte e tre le bocche di porto le concentrazioni medie annue stimate sia per il PM_{10} che per l' NO_2 scendono rapidamente al di sotto di valori inferiori a $5 \mu\text{g m}^{-3}$ non appena ci si allontani dalle aree di cantiere, e risultano inferiori a $1 \mu\text{g m}^{-3}$ entro qualche centinaio di metri (3 o 4 chilometri nei casi di maggiore ricaduta). Sommando i valori stimati dal modello, che costituiscono il contributo delle attività di cantiere, al livello di concentrazione di fondo, per il quale si è preso il valore, piuttosto cautelativo, misurato dalla sta-

zione ARPAV di Sacca Fisola, non si segnala alcun rischio di superamento del limite di $40 \mu\text{g m}^{-3}$ (valore limite fissato dal D.Lgs. 155/2010 per la protezione della popolazione sia per il PM_{10} che per l' NO_2), eccetto che per le zone di lavorazione interne ai cantieri. Le figure 35-37 riportano un esempio di mappe di concentrazione al suolo rispettivamente per PM_{10} , NO_x e l' NO_2 , e il per l'anno 2014 ottenute alle tre bocche di porto. Le aree colorate in rosso rappresentano, per le mappe di NO_2 e PM_{10} , livelli di concentrazione compresi fra i valori di fondo e $1 \mu\text{g m}^{-3}$. Come valore di fondo per il PM_{10} è stata considerata la media annuale misurata dalla centralina ARPAV di Sacca Fisola che per il 2014 risulta pari a $28 \mu\text{g m}^{-3}$. Per quanto riguarda l' NO_2 come valore di fondo, ottenuta sempre dalla centralina di Sacca Fisola, si è considerata per il 2014 una concentrazione di $29 \mu\text{g m}^{-3}$. Per la figura 37, relativa alla mappa della concentrazione di NO_x , invece, il colore rosso è associato a livelli di concentrazione compresi fra $1 \mu\text{g m}^{-3}$ e il valore limite per la protezione della vegetazione ($30 \mu\text{g m}^{-3}$).

Per tutte e tre le mappe le zone a colore più scuro rappresentano livelli di concentrazione superiori ai rispettivi valori limite.

Per quanto riguarda il PM_{10} la figura 35 indica che solo in corrispondenza di un'attività cantieristica più intensa, ma limitata nel tempo, l'estensione dell'area di impatto potenziale, cioè dell'area in cui il modello stima un incremento della media annuale rispetto ai valori di fondo superiore ad $1 \mu\text{g m}^{-3}$, interesserebbe alcuni siti residenziali. In particolare alla bocca di porto di Lido le aree sono sia direttamente a ridosso del cantiere nel comune di Cavallino-Treporti sia sull'isola di Sant'Erasmus, mentre alla bocca di porto di Malamocco viene interessato, marginalmente, l'abitato di San Pietro in Volta.

Anche per gli NO_x , il contributo delle attività cantieristiche stimato dal modello non comporta alcun rischio di superamento del limite di $30 \mu\text{g m}^{-3}$ per la protezione della vegetazione. Manca in questo caso però un sito di misura significativo che possa essere utilizzato come valore di fondo con il quale verificare se il contributo del cantiere più il fondo porti a situazioni critiche. Ad esempio, stazione di Sacca Fisola riporta un valore medio annuo per il 2014 di $52 \mu\text{g m}^{-3}$ superiore al valore limite per la protezione della vegetazione di $30 \mu\text{g m}^{-3}$. Tale stazione tuttavia non rispetta le caratteristiche previste dalla normativa per le stazioni di fondo e quindi tale valore è puramente indicativo di un superamento generalizzato di questo valore limite per l'area lagunare indipendentemente dalla presenza dei cantieri.

Per quanto riguarda l' NO_2 occorre distinguere fra valore limite annuale e valore limite orario. Relativamente al valore limite annuale, per le bocche di porto di Malamocco e Chioggia si sottolinea che le concentrazioni medie annue stimate scendono rapidamente al di sotto di valori inferiori a $1 \mu\text{g m}^{-3}$ non appena ci si allontani dai confini esterni delle aree di cantiere.

A Lido si riscontra una zona di impatto dei cantieri tra 5 e $10 \mu\text{g m}^{-3}$ per una porzione dell'Isola di Sant'Erasmus. Pur considerando un livello di concentrazione di background piuttosto cautelativo come quello misurato dalla stazione ARPAV di Sacca Fisola, non si segnala alcun rischio di superamento del limite di $40 \mu\text{g m}^{-3}$ per la protezione della popolazione.

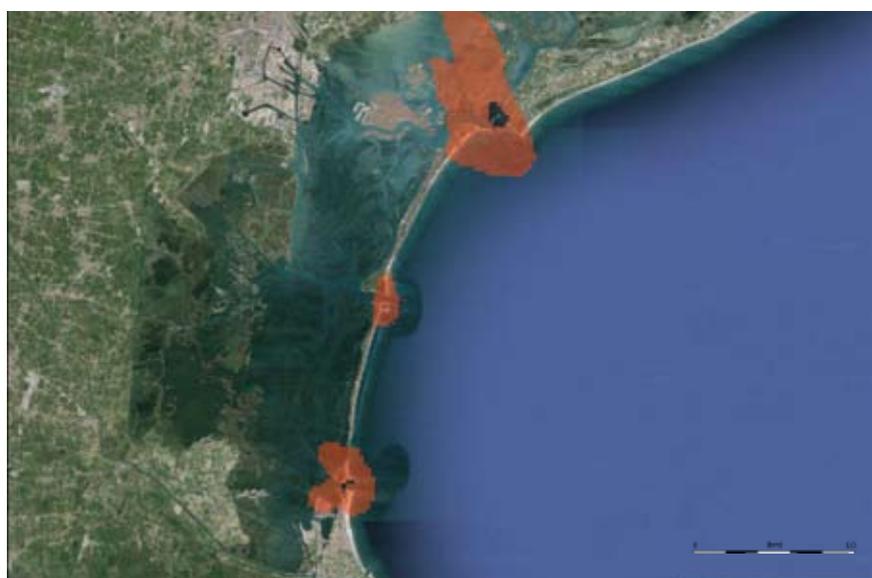
La figura 38 riporta, dall'alto verso il basso, rispettivamente la concentrazione di NO_2 al 99.8° percentile alla bocca di Lido, Malamocco e Chioggia.

In riferimento al limite orario dell' NO_2 per la protezione della salute, che richiede che non si verifichino in un anno più di 18 superamenti del valore di $200 \mu\text{g m}^{-3}$, tenendo conto che al contributo del modello si sommano i contributi relativi a tutte le altre sorgenti emissive presenti nel dominio. I risultati dello studio modellistico indicano che il rischio di superamento di tale limite di breve durata è generalmente confinato alle aree

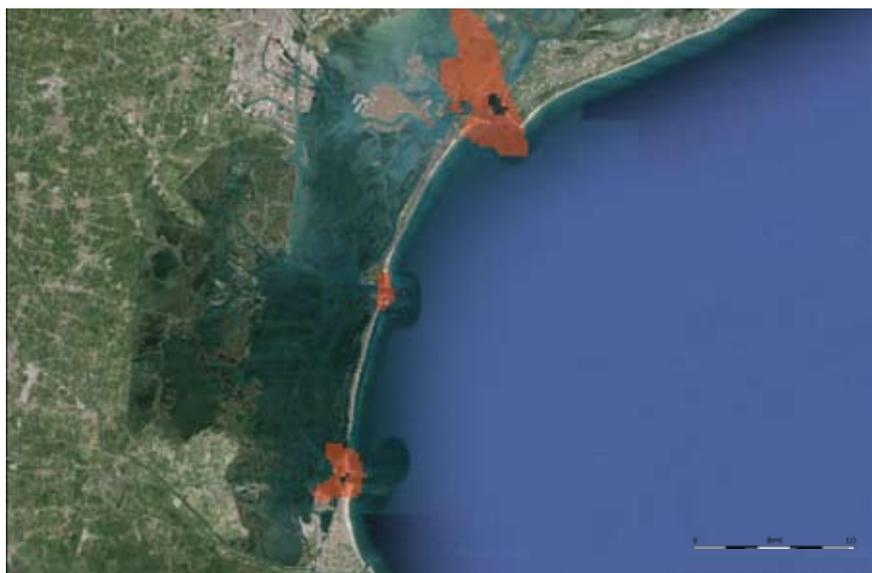
35. Concentrazione media annuale di PM_{10} -anno 2014. Immagine aerea da Google Earth.

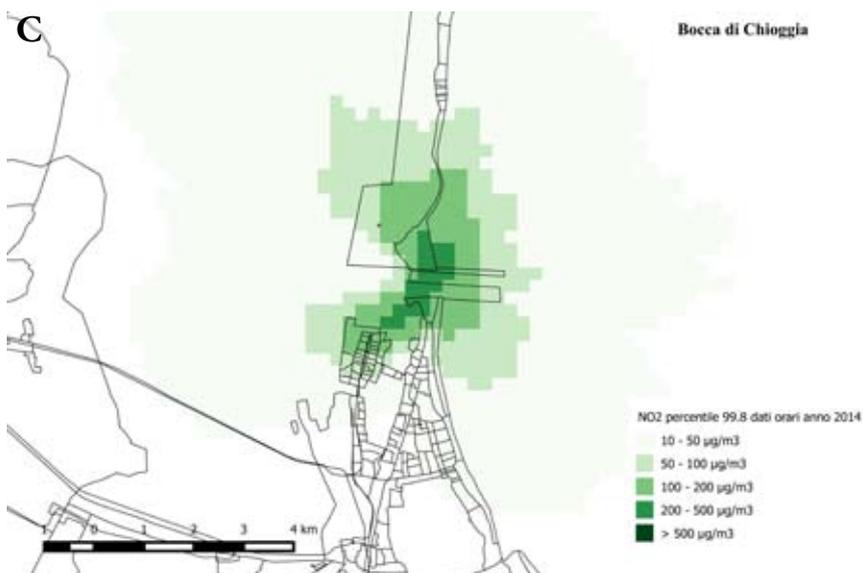
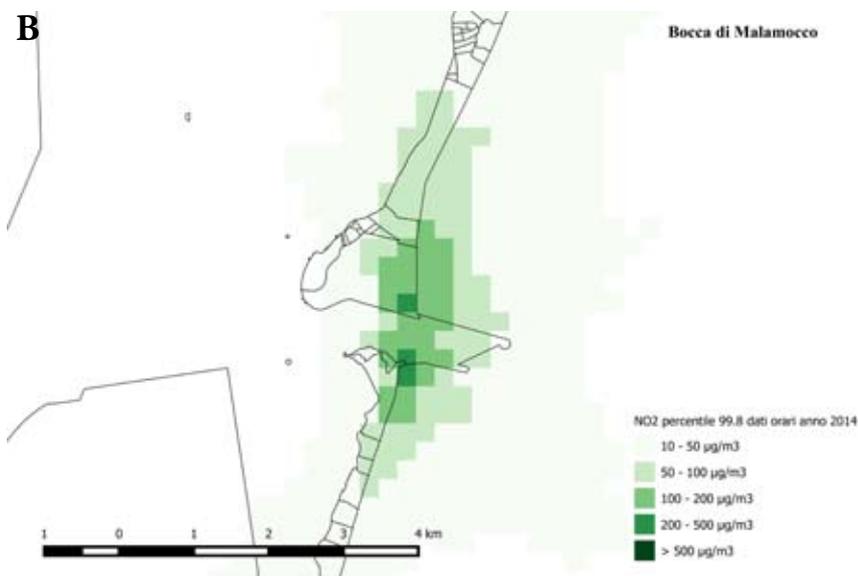
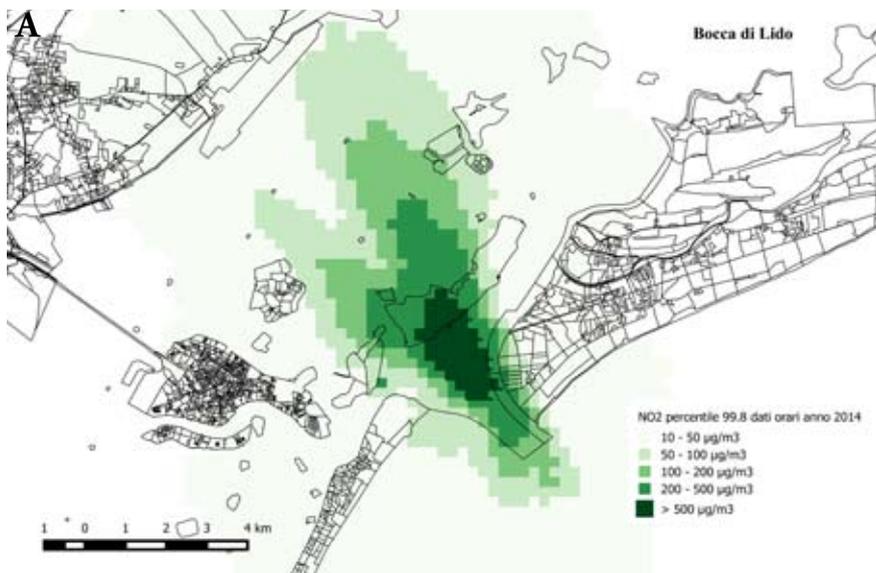


36. Concentrazione media annuale di NO_x -anno 2014. Immagine aerea da Google Earth.



37. Concentrazione media annuale di NO_2 -anno 2014. Immagine aerea da Google Earth.





38. Percentile 99.8° delle concentrazioni di NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$), bocca di Lido (A), bocca di Malamocco (B) e bocca di Chioggia (C).

a ridosso dei cantieri, con le eccezioni di alcuni siti residenziali nella parte sud-ovest dell'isola di Sant'Erasmus, alla bocca di porto di Lido, e una piccola parte dell'abitato di San Pietro in Volta alla bocca di Malamocco.

Considerazioni conclusive

Le attività svolte nell'ambito del Piano di monitoraggio dei cantieri del MOSE possono essere raggruppate in base alla scala temporale delle singole misure effettuate.

Alla scala temporale più ampia si situano le deposizioni atmosferiche, con durata di campionamento pari a circa un mese. I flussi di deposizione, sia a secco che a umido, rappresentavano, all'epoca della stesura del Piano di monitoraggio, uno dei parametri più tradizionali e utilizzati nella valutazione dell'impatto ambientale di cantieri o insediamenti industriali.

Per inciso, la valutazione dei flussi di deposizione era l'unica attività prevista all'interno dell'iniziale documento relativo allo Studio di Impatto Ambientale (SIA) del Progetto di Massima degli Interventi alle Bocche Lagunari per la Regolazione dei Flussi di Marea.

La raccolta delle deposizioni atmosferiche può, tuttavia, fornire soltanto alcuni elementi qualitativi e parziali sull'eventuale impatto atmosferico di una sorgente. Ciò principalmente perché un periodo di campionamento così ampio non permette, a meno di rilevanti ricadute atmosferiche, di apprezzare lo specifico contributo della sorgente rispetto al fondo, e in secondo luogo, per la relazione fra deposizioni atmosferiche e precipitazioni (quantità, caratteristiche ed intensità), come evidenziato anche dai risultati ottenuti durante il monitoraggio.

Posizionando i deposimetri a distanze diverse dal cantiere, uno nell'area interna del cantiere stesso, è stato possibile escludere ricadute di inquinanti, dovuti ai cantieri del MOSE, così significative da superare l'ampia variabilità dei dati ottenuti con questa tecnica. I risultati, quindi, hanno, in qualche modo, fornito un limite superiore ad eventuali impatti ambientali.

Considerando una scala temporale inferiore si evidenziano le misure di durata giornaliera: concentrazione di IPA, composizione elementale del PM_{10} e quantità di PM_{10} . Questa scala temporale viene normalmente utilizzata per misure della qualità dell'aria, come previsto dalla legislazione vigente identificando valori obiettivo per la media giornaliera di PM_{10} , per il contenuto di Ni, As, Pb e Cd nel PM_{10} e di BaP come media annuale ottenuta da misure giornaliere. Si tratta di una scala temporale che, correlata ai parametri meteorologici (principalmente direzione ed intensità del vento), permette, soprattutto in periodi di vento con direzioni costanti e ben definite, di potere identificare eventuali contributi provenienti dalla sorgente indagata. Inoltre, potendo confrontare giorni di cantiere aperto con giorni di cantiere chiuso è stato possibile mettere ulteriormente in evidenza eventuali scostamenti nei valori di concentrazione degli inquinanti misurati.

Come si può osservare dai risultati ottenuti, riportati nelle specifiche sezioni, sia per la composizione elementale del PM_{10} che per la concentrazione di IPA i risultati ottenuti non hanno messo in evidenza contributi specifici dovuti alle attività del MOSE. Inoltre, a questa scala temporale è stato possibile correlare le misure giornaliere di PM_{10} in laguna con quelle effettuate da ARPA Veneto ed Emilia Romagna ed evidenziare periodi temporali nei quali la dispersione atmosferica delle polveri nell'intero bacino padano era critica.

Naturalmente anche in questo caso, la diversa base statistica di confronto fra giorni lavorativi e non (più numerosi i primi rispetto ai secondi), la presenza di periodi caratterizzati da vento variabile ed eventuali rilasci di intensità tale da non essere evidenziati alle 24 ore, possono avere in qualche modo minimizzato un impatto ambientale. Per-

tanto sono state effettuate misure anche alla scala temporale oraria (composti gassosi e PM_{10}). In questo caso le correlazioni fra concentrazione misurata e direzione del vento vengono ad essere più dettagliate permettendo di discriminare fra contributi dovuti alla sorgente monitorata da quelli provenienti da altre sorgenti (ad esempio zona industriale di Porto Marghera, Pianura Padana). Questa analisi più dettagliata ha permesso inoltre di evidenziare il “giorno tipo” per Malamocco e Punta Sabbioni con differenze dovute ai diversi regimi di brezza. Dai risultati ottenuti non si sono osservati contributi provenienti dai cantieri.

Sono state svolte anche misure alla scala temporale di alcuni minuti per il PM_{10} sia con centralina fissa che mobile, in modo da evidenziare andamenti anomali tali da essere compatibili con casi di trasporto di polveri, anche di breve durata, dalle aree di cantiere (sollevamento eolico di terriccio, movimentazione di mezzi pesanti). Anche in questo caso non si sono verificati eventi significativi di trasporto di polveri. Inoltre questa scala temporale così breve ha permesso di verificare la corretta applicazione delle procedure di mitigazione adottate, principalmente la bagnatura dei piazzali e dei cumuli di terra.

Queste misure temporali ad alta frequenza sono state impiegate per stimare i contributi alle abitazioni circostanti delle emissioni di veicoli pesanti, dovuti ai numerosi trasporti di materiale sulla viabilità ordinaria. Tali contributi sono risultati di scarsa entità.

Infine, pur con tutta la complessità evidenziata, le misure puntuali possono essere scarsamente rappresentative o non in grado di offrire una visione della distribuzione spaziale degli inquinanti. Infatti frequentemente, per motivi logistici, i sistemi di prelievo e di campionamento vengono posizionati non necessariamente nei punti di massima ricaduta che comunque dipendono dalle condizioni atmosferiche e sono quindi variabili. Risulta pertanto fondamentale potere disporre di simulazioni numeriche che forniscono mappe di ricaduta al suolo degli inquinanti in diverse condizioni atmosferiche per poter identificare eventuali criticità ed avvalorare le misure sperimentali svolte.

Da questo punto di vista le simulazioni numeriche effettuate, oltre che confermare quanto ottenuto con le misure sperimentali puntuali, hanno anche permesso di evidenziare come il contributo dovuto alle attività cantieristiche è rimasto limitato, prevalentemente, alle aree di cantiere stesse.

Ringraziamenti

Il monitoraggio, relativo alla matrice aria, delle eventuali emissioni provenienti dai cantieri installati presso le bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia, ha visto la collaborazione di diverse istituzioni ed enti di ricerca: CORILA, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC-CNR) del CNR di Bologna e Lecce, Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali (IDPA-CNR) del CNR di Venezia e l'Università Ca' Foscari (Ve).

Numerose persone hanno preso parte alle varie attività svolte nell'ambito del monitoraggio (dai campionamenti, alle analisi di laboratorio ed elaborazione dati). In particolare quanti hanno più stabilmente collaborato (oltre ai già citati autori) sono:

Dott.ssa Elena Barbaro (IDPA-CNR, Venezia)

Dott.ssa Elena Gregoris (IDPA-CNR, Venezia)

Dott. Marco Vecchiato (DAIS, Ca' Foscari, Venezia)

Dott.ssa Roberta Zangrando (IDPA-CNR, Venezia)

Bibliografia

- Air Quality in Europe 2013 Report. EAA Report N 9/2013, ISSN 1725-9177.
- APHEKOM (2011) Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe. Summary report of the Aphekom project 2008-2011.
- ARPAV (2014) Relazione Regionale Qualità dell'Aria: Anno di riferimento 2013.
- Buccolieri A., Buccolieri G., Cardellicchio N., Dell'Atti A., Elena Tiziana Florio E. T. (2005) PM₁₀ and heavy metals in particulate matter of the province of Lecce (Apulia, southern Italy). *Annali di Chimica*, 95(1-2), 15-25.
- Capodaglio G., Toscano G., Cescon P., Scarponi G. (1994) Copper complexation in the surface sea water of Terra Nova Bay (Antarctica). *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 55(1-4), 129-148.
- Cesari D., Genga A., Ielpo P., Siciliano M., Mascolo G., Grasso F. M., Contini D. (2014) Source apportionment of PM_{2.5} in the harbour-industrial area of Brindisi (Italy): Identification and estimation of the contribution of in-port ship emissions. *Science of Total Environment*, 497-498, 392-400.
- Contini D., Gambaro A., Belosi F., De Pieri S., Cairns W., Donateo A., Zanotto E., Citron M. (2011) The direct influence of ship traffic on atmospheric PM_{2.5}, PM₁₀ and PAH in Venice. *Journal of Environmental Management*, 92, 9, 2119-29.
- Contini D., Belosi F., Gambaro A., Cesari D., Stortini M. A., Bove M. C. (2012) Comparison of PM₁₀ concentrations and metal content in three different sites of the Venice Lagoon: An analysis of possible aerosol sources. *Journal of Environmental Sciences*, 24(11), 1954-1965.
- Decreto Ministeriale 25/11/1994.
- Decreto Ministeriale n. 60, 02/04/2002.
- Decreto Legislativo n. 152, 03/08/2007.
- EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2009) International navigation, national navigation, national fishing and military (shipping)-sec.1.A.3.d Navigation (update March 2011).
- EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2009) Non-road mobile sources and machinery (land-based emissions)-sec. 1.A.4 Other Mobile (update June2010).
- European Communities (2001) Ambient air pollution by As, Cd and Ni compounds. Position Paper. Prepared by the Working Group On As, Cd and Ni compounds. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Gaga E. O., Ari A., Döğeroğlu T., Çakırca E. E., Machin N. (2012) Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in an industrialized city, Kocaeli, Turkey: study of seasonal variations, influence of meteorological parameters and health risk estimation. *Journal of environmental monitoring*, 14: 2219-29.
- Gambaro A., Manodori L., Moret I., Capodaglio G., Cescon P. (2004) Determination of polychlorobiphenyls and polycyclic in the atmospheric aerosol of the Venice Lagoon, *Analytical and Bioanalytical chemistry*, 378: 1806-14.
- Gambaro A., Radaelli M., Piazza R., Stortini M. A., Contini D., Belosi F., Zangrando R., Cescon P. (2009) Organic micropollutants in wet and dry depositions in the Venice Lagoon. *Chemosphere*, 76, 1017-1022.
- Gregoris E., Argiriadis E., Vecchiato M., Zambon S., De Pieri S., Donateo A., Contini

D., Piazza R., Barbante C., Gambaro A. (2014) Gas-particle distributions, sources and health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and polychlorinated naphthalenes (PCNs) in Venice aerosols, *Science of The Total Environment*, 476-7, 393-405.

IARC: International Agency for Research on Cancer (2009) IARC Monogr, on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Complete list of agents evaluated and their classification.

Khalili N. R., Scheff P. A., Holsen T. M. (1995) PAH Source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions. *Atmospheric Environment* 29, 533-542.

Lu S. L., Longyi S., Minghong W., Zheng J., Xiahoui C. (2007) Chemical elements and their source apportionment of PM₁₀ in Beijing urban atmosphere. *Environmental Monitoring and Assessment*, 133(1-3), 79-85.

Magistrato alle Acque di Venezia (ora Provveditorato Interregionale alle OO. PP. del Veneto-Trentino Alto Adige-Friuli Venezia Giulia) (2009) Il monitoraggio SAMANET delle deposizioni atmosferiche nella Laguna di Venezia anno 2007.

Magistrato alle Acque di Venezia (ora Provveditorato Interregionale alle OO. PP. del Veneto-Trentino Alto Adige-Friuli Venezia Giulia)-CORILA (anni 2005-2013) Studi B.6.72 B/1-B/8. Attività di rilevamento per il monitoraggio degli effetti prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari. Macroattività: Aria. Rapporti Finali. Prodotto dal Concessionario, Consorzio Venezia Nuova.

Masiol M., Rampazzo G., Ceccato D., Squizzato S., Pavoni B. (2010) Characterization of PM₁₀ sources in a coastal area near Venice (Italy): An application of factor-cluster analysis. *Chemosphere*, 80(7), 771-778.

Masclat P., Mouvier G., Nikolaou K. (1986) Relative decay index and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons, *Atmospheric Environment*, 20 (3), 439-446.

Pope C. A., Dockery D. W. (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 709-742.

Provveditorato Interregionale alle OO. PP. del Veneto-Trentino Alto Adige-Friuli Venezia Giulia (ex Magistrato alle Acque di Venezia)-CORILA (anni 2014-2015) Studi B.6.72 B/9-B/10. Attività di rilevamento per il monitoraggio degli effetti prodotti dalla costruzione delle opere alle bocche lagunari. Macroattività: Aria. Rapporti Finali. Prodotto dal Concessionario, Consorzio Venezia Nuova.

Querol X., Alastuei A., Ruiz C. R., Artinano B., Hansson H. C., Harrison R. M. (2004) Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities. *Atmospheric Environment*, 38, 6547-6555.

Rampazzo G., Masiol M., Visin F., Pavoni B. (2008) Gaseous and PM₁₀-bound pollutants monitored in three sites with differing environmental conditions in the Venice area (Italy). *Water Air and Soil Pollution*, 195(1-4), 161-176.

Rossini P., Guerzoni S., Molinaroli E., Rampazzo G., De Lazzari A. (2005a) Atmospheric bulk deposition to the lagoon of Venice part I. Fluxes of metals, nutrients and organic contaminations. *Environmental International* 31, 959-974.

Rossini P., Matteucci G., Guerzoni S. (2005b) Atmospheric fall-out of POPs (PCDD-Fs, PCBs, HCB, PAHs) around the industrial district of Porto Marghera, Italy. *Science of the Total Environment*, 349, 180-200.

Santi E., Belosi F., Santachiara G., Prodi F., Berico M. (2010) Real-time aerosol photometer and optical particle counter comparison, *Il Nuovo Cimento*, 125 B.

Scire J. S., Strimaitis D. G., Yamartino R. J. (1990) Model formulation and user's gui-

- de for the CALMET meteorological model. Prepared for the California Air Resources Board by Sigma Research Corporation, Concord, MA.
- Slezakova K., Pires J. C. M., Castro D., Alvim-Ferraz M. C. M., Delereu-Matos C., Morais S., Pereira M. C. (2013) PAH air pollution at a Portuguese urban area: carcinogenic risks and sources identification. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 3932-45.
- Stortini A. M., Freda A., Cesari D., Cairns W., Contini D., Barbante C., Prodi F., Cescon P., Gambaro A. (2009) An evaluation of the PM_{2.5} trace elemental composition in the Venice Lagoon area and an analysis of the possible sources. *Atmospheric Environment*, 43(40), 6296-6304.
- Studio di Impatto Ambientale (SIA) del Progetto di Massima degli Interventi alle Bocche Lagunari per la Regolazione dei Flussi di Marea. (Sezione D, Quadro di Riferimento Ambientale, Vol. 2, 1997. N. Elaborato 95.T706-REL-T067.4 Consorzio Venezia Nuova).
- Toscano G., Moret I., Gambaro A., Barbante C., Capodaglio G. (2011) Distribution and seasonal variability of trace elements in atmospheric particulate in the Venice Lagoon. *Chemosphere*, 85(9), 1518-1524.
- Viana M., Amato F., Alastuey A., Monfort E. (2009) Chemical tracers of particulate emissions from commercial shipping. *Environmental Science & Technology*, 43, 7472-7477.
- Watson J. G., Zhu T., Chow J. C., Engelbrecht J., Fujita E. M., Wilson W. E. (2002) Receptor modeling application framework for particle source apportionment. *Chemosphere*, 49(9), 1093-1136.
- Wedepohl K. H. (1995) The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 1217-1232.

Summary

The construction activities of the mobile gates at the Venice Lagoon entrances might impact over several environmental matrixes; among them there are the atmospheric emissions due to off-road and maritime vehicles, heavy duty trucks, stones movement, ecc. Therefore the monitoring plan is made up of samplings of several pollutants.

PM₁₀ was analyzed on an hourly frequency at Punta Sabbioni by means of a light-scattering type sampler, while PM₁₀ filters for elemental analysis were collected at the Punta Sabbioni, Malamocco and Chioggia inlets using low volume sequential aerosol samplers (Skypost PM-TCR Tecora). PAHs have been monitored by means of a High Volume sampler (Tisch Environment) using a monitoring strategy based on two sampling campaigns, usually carried out each year at Malamocco (September and January/February), and at Punta Sabbioni (November and February).

Measurements of gaseous pollutant concentrations (CO, NO₂, NO_x) were carried out on an hourly basis using tick film sensors (ETL2000, Unitech srl, Italy) at Punta Sabbioni and Malamocco, for 1 or 2 weeks each month. Furthermore, in order to put in evidence a possible contribution from the construction works of the MOSE, the data have been analysed separating the period of construction activity (between 8 am to 8 pm during working days) and in the period of inactivity (between 9 pm and 7 am during working days and all the day during holydays).

Atmospheric deposition fluxes of organic and inorganic compounds have been measured by means of bulk depositometers positioned at the three lagoon entrances and in a site far distant from the courtyard (elementary school S. Pertini, Punta Sabbioni). The last one is considered not influenced from the construction activities and therefore it gives the deposition reference flux. Two yearly sampling campaigns (June-October and December-March), each made of three samples (one month length) have been performed. The monitoring strategy is fulfilled by deploying numerical models (CALPUFF and CALMET) to compute the spatial distributions of the pollutants concentration levels according to different atmospheric dispersion conditions.

The data elaboration is based on the comparison of each pollutant averaged concentration with its specific thresholds (in some cases legal ones, in other cases obtained through statistical elaboration of data obtained in absence of working activities) and on the correlation with the meteorological parameters (a meteorological mast has been positioned at Punta Sabbioni, while at Malamocco the MAV meteorological stations is used). The comparison of the real time monitored data with the meteorological conditions is very important in case of critical episodes, because it allows the discerning of them as if they are due to the MOSE work activities or as if they are a consequence of a regional bad air quality condition.

Results of PM₁₀ hourly concentrations show no statistically differences between working and no-working days. Therefore emission from working activities were not so important to give rise higher dust level concentrations (from 2005 to April 2014). An interesting feature of the PM₁₀ monitoring is the correlation on a regional scale of the concentration levels. Results show a good correlation between the PM₁₀ concentration recorded at Punta Sabbioni up to Rovigo, while for Reggio Emilia station the correlation coefficient is lower. That means a coupling of the local meteorology between the Venice Lagoon and Veneto Region stronger respect to Emilia Romagna Region. Most of the recorded PM₁₀ concentration daily averaged limit exceedings at Punta Sabbioni, took place also at other Veneto cities allowing to establish that was not the consequence of the MOSE work activity but, rather, a general pollution event on a regional scale. The comparison of the average concentrations of the different metals in the PM₁₀ between cases in which the measurement sites are downwind and upwind of the MOSE construction yards

have also been performed. However, the differences associated to the two wind direction sectors were not statistically significant so that a contribution of construction activities to metals concentrations was not evidenced.

As far as the PAH difference in contaminants concentrations between the two sites is not evident, even if it is possible to notice that the concentrations found near the Lido inlet are basically lower than at the Malamocco inlet, especially in the last two years of sampling.

The daily patterns of the gas concentrations at Punta Sabbioni are different with respect to those observed at Malamocco. At Malamocco, peaks in concentrations for all gas are visible in the morning between 8 am and 12 am. At both sites the trends observed in weekdays and holidays are similar. Concentrations during holidays are slightly lower with respect to weekdays at Malamocco site but are comparable for the two periods at Punta Sabbioni site. Average gaseous pollutant concentrations increase in nocturnal hours at both sites showing a correlation with the evolution of the atmospheric boundary-layer that could indicate a trapping of the pollutants in this mixed layer. An evidence of a direct effect of the MOSE construction activities in diurnal hours was not observed.

With respect to the atmospheric deposition, for all pollutants here reported, both inorganic and organic, we cannot observe any long-term trend and neither an increase nor a decrease over the years has been put in evidence in the dataset.

Results from experimental data obtained with field measurements are corroborated by concentration maps from dispersion model simulations, which show concentration levels comparable with the background outside the courtyards.