

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE  
DOTTORATO DI RICERCA IN  
TECNOLOGIE CHIMICHE ED ENERGETICHE



# ANALISI E SVILUPPO DI MODELLI PER LA VALUTAZIONE DELLA DISPERSIONE DI ODORI IN CONTESTI ANTROPIZZATI

**Dott. Nicola Pettarin**



## COMMISSIONE

---

Prof. Selena Sironi	REVIEWER
Dr. Pierluigi Barbieri	REVIEWER
Prof. Sergio Chibbaro	REFEREE
Prof. Paolo Gualtieri	REFEREE
Prof. Alfredo Soldati	SUPERVISOR
Prof. Alessandro Trovarelli	SUPERVISOR
Prof. Marina Campolo	CO-SUPERVISOR

---

Prof. Alfredo Soldati	DIRECTOR OF PH.D. PROGRAM
-----------------------	---------------------------



*To my family*

---

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>7</b>
<b>OBIETTIVI ED ORGANIZZAZIONE DELLA TESI .....</b>	<b>12</b>
<b>1 MISURA DELL'ODORE E UTILIZZO DI MODELLI NUMERICI PER LA VALUTAZIONE E LA MITIGAZIONE D'IMPATTO .....</b>	<b>15</b>
1.1 OLFATTOMETRIA DINAMICA (UNI EN 13725:2004).....	15
1.2 VALUTAZIONE DI IMPATTO E SELEZIONE DI INTERVENTI DI MITIGAZIONE..	20
1.2.1 <i>Descrizione del sito di studio .....</i>	<i>21</i>
1.2.2 <i>Campagna olfattometrica .....</i>	<i>23</i>
1.2.3 <i>Soiluppo del modello di dispersione .....</i>	<i>25</i>
<b>2 VALUTAZIONE DI IMPATTO ODORIGENO IN AREA URBANA .....</b>	<b>37</b>
2.1 MOTIVAZIONE .....	37
2.2 DESCRIZIONE DEL SITO DI STUDIO.....	41
2.3 MODELLO DI DISPERSIONE IN AMBIENTE URBANO (QUIC) .....	43
2.3.1 <i>Dati meteorologici .....</i>	<i>45</i>
2.3.2 <i>Dati emissivi .....</i>	<i>47</i>
2.4 RISULTATI .....	48
2.4.1 <i>Caratterizzazione del campo di vento.....</i>	<i>48</i>
2.4.2 <i>Dispersione dell'odore .....</i>	<i>50</i>
2.4.3 <i>Discussione .....</i>	<i>62</i>
<b>3 RICERCA DI SORGENTI DI ODORE IN AREA URBANA.....</b>	<b>65</b>
3.1 MOTIVAZIONE .....	65
3.2 ALGORITMO DI RICERCA.....	68
3.2.1 <i>Modello di trasporto .....</i>	<i>68</i>
3.2.2 <i>Probabilità di localizzazione della sorgente .....</i>	<i>70</i>
3.3 RISULTATI .....	74
3.3.1 <i>Dominio semplice .....</i>	<i>74</i>
3.3.2 <i>Dominio con edificio isolato .....</i>	<i>80</i>
3.3.3 <i>Dominio con schiera di edifici .....</i>	<i>83</i>
3.3.4 <i>Statistiche per la valutazione delle prestazioni dell' algoritmo di ricerca</i>	<i>85</i>
<b>4 CONCLUSIONI .....</b>	<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>93</b>
<b>APPENDICE.....</b>	<b>99</b>

---

## LISTA DELLE FIGURE

<b>Figura 1-1:</b> Schema d'impianto trattamento acque reflue a servizio dell'azienda alimentare.....	22
<b>Figura 1-2:</b> Concentrazione di odore delle sorgenti significative per la modellazione della dispersione dell'odore. ....	24
<b>Figura 1-3:</b> Flusso di odore delle sorgenti significative per la modellazione dell' dispersione dell'odore. ....	24
<b>Figura 1-4:</b> Orografia del territorio per l'area di studio.....	26
<b>Figura 1-5:</b> Distribuzione dell'uso del suolo definita per l'area di studio. ....	27
<b>Figura 1-6:</b> Mappa della zona di studio considerata per l'implementazione del modello di dispersione. Il cerchio rosso indica la posizione dell'impianto aziendale, il cerchio blu la posizione del depuratore comunale, i punti in rosso la posizione dei recettori sensibili considerati per la valutazione d'impatto odorigeno. ....	28
<b>Figura 1-7:</b> Rosa dei venti per l' anno 2007- riferita alla stazione meteorologica considerata: la coordinata radiale (lunghezza del settore circolare) rappresenta la frequenza, il colore dei cunei indica l'intensità del vento. .	29
<b>Figura 1-8:</b> Rosa dei venti per l' anno 2007 nelle diverse stagioni: la coordinata radiale (lunghezza del settore circolare) rappresenta la frequenza, il colore dei cunei indica l'intensità del vento. ....	30
<b>Figura 1-9:</b> Distribuzione di frequenza delle classi di velocità del vento .....	31
<b>Figura 1-10:</b> Distribuzione di frequenza delle classi di velocità del vento nelle diverse stagioni.....	32
<b>Figura 1-11:</b> Scenario attuale: isocontorni di concentrazione di odore valutati a 1.5 m di altezza. I valori rappresentano il 98° percentile dei valori orari di concentrazione calcolati su periodo annuo.....	34
<b>Figura 1-12:</b> Scenario di mitigazione: isocontorni di concentrazione di odore valutati ad un altezza di 1.5 m. I valori rappresentano il 98° percentile dei valori orari di concentrazione calcolati su periodo annuo. ....	35
<b>Figura 2-1:</b> Vista e aerea della città di Verona (a), dominio computazionale corrispondente ad Area 1 (b) e Area 2 (c). I punti rossi e blu indicano la posizione della sorgente e di punti di controllo a distanza di 50 m dalla sorgente in direzione sottovento rispetto al vento prevalente. ....	43

---

<b>Figura 2-2:</b> Variabilità del vento per gli scenari meteorologici considerati (Evento 1 e 2) .....	46
<b>Figura 2-3:</b> Confronto tra intensità e direzione del vento in alcuni punti di riferimento del dominio: stazione anemometrica, posizione delle sorgenti e posizione dei punti di controllo.....	49
<b>Figura 2-4:</b> Impatto odorigeno nell'Area 1: primo scenario meteorologico (Evento 1).....	51
<b>Figura 2-5:</b> Impatto odorigeno nell'Area 1: secondo scenario meteorologico (Evento 2).....	52
<b>Figura 2-6:</b> Impatto odorigeno nell'Area 2: primo scenario meteorologico (Evento 1).....	53
<b>Figura 2-7:</b> Impatto odorigeno nell'Area 2: secondo scenario meteorologico (Evento 2).....	53
<b>Figura 2-8:</b> Serie temporali di concentrazione di odore calcolate nei punti P1 e S1.....	54
<b>Figura 2-9:</b> Criteri per la valutazione d'impatto odorigeno: 90° percentile del valore di concentrazione di odore calcolato (parte alta) e percentuale di superamento del valore di concentrazione di riferimento ( $C=5 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ ) (parte bassa). Risultati relativi al primo scenario meteorologico (Evento 1). .....	56
<b>Figura 2-10:</b> Criteri per la valutazione d'impatto odorigeno: 90° percentile del valore di concentrazione di odore calcolato (parte alta) e percentuale di superamento del valore di concentrazione di riferimento ( $C=5 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ ) (parte bassa). Risultati relativi al secondo scenario meteorologico (Evento 2).....	57
<b>Figura 2-11:</b> Rosa dell'odore per Area 1 e primo scenario meteorologico (Evento 1).....	58
<b>Figura 2-12:</b> Rosa dell'odore per Area 1 e secondo scenario meteorologico (Evento 2).....	60
<b>Figura 2-13:</b> Rosa dell'odore per Area 2 e primo scenario meteorologico (Evento 1).....	61
<b>Figura 2-14:</b> Rosa dell'odore per Area 2 e secondo scenario meteorologico (Evento 2).....	62
<b>Figura 3-1:</b> Campo di concentrazione dell'odore (sinistra) e mappa che descrive la distribuzione locale della probabilità di trovare la sorgente nelle varie	

---

posizioni. Gli isocontorni di concentrazione hanno valore variabili nell'intervallo 0 (blu) e 100 ou <sub>E</sub> /m <sup>3</sup> (rosso). Gli isocontorni della mappa di probabilità sono dinamicamente ri-assegnati per coprire l'intervallo di variazione min-max della probabilità di localizzazione della sorgente. Le linee bianca e nera rappresentano lo sviluppo della traiettoria del sensore. I cerchi identificano istanti corrispondenti alla rilevazione di odore. ....	76
<b>Figura 3-2:</b> (a) Frequenza e numero di campionamenti di odore rilevati dal sensore durante il tempo di ricerca; (b) Variazione dell'entropia della mappa di probabilità di localizzazione della sorgente; (c) Variazione della distanza tra sensore e sorgente.....	78
<b>Figura 3-3:</b> Quantificazione delle informazioni ricevute dal sensore nel tempo: (a) frequenza e numero di campionamenti di odore rilevati dal sensore durante il tempo di ricerca. (b) variazione nel tempo della frazione di dominio in cui la probabilità di localizzare la sorgente supera un dato valore percentile. Le tre curve rappresentano rispettivamente le frazioni di dominio corrispondenti al 50° (blu), al 70° (verde) e al 90° (rosso) percentile .....	79
<b>Figura 3-4:</b> Evoluzione nel tempo della mappa dei percentili: le zone rossa, gialla e azzurra delimitano le frazioni di area del dominio in cui la probabilità di localizzare la sorgente è superiore a 0.9, 0.7 e 0.5. Gli istanti rappresentati corrispondono a 50, 150 e 170 unità temporali. ....	80
<b>Figura 3-5:</b> Campo di concentrazione di odore nel dominio urbano con edificio isolato. I valori di concentrazione di odore variano nell'intervallo (0-100) ou <sub>E</sub> /m <sup>3</sup> (colori dal blu al rosso). ....	81
<b>Figura 3-6:</b> Campo di concentrazione dell'odore (sinistra) e mappa che descrive la distribuzione locale della probabilità di trovare la sorgente nelle varie posizioni all'interno del dominio urbano con singolo edificio. Gli isocontorni di concentrazione hanno valore variabile nell'intervallo 0 (blu) e 100 ou <sub>E</sub> /m <sup>3</sup> (rosso). Gli isocontorni della mappa di probabilità sono dinamicamente ri-assegnati per coprire l'intervallo di variazione min-max della probabilità di localizzazione della sorgente. Le linee bianca e nera rappresentano lo sviluppo della traiettoria del sensore. I cerchi identificano istanti corrispondenti alla rilevazione di odore. ....	82

- 
- Figura 3-7:** Campo di concentrazione di odore nel dominio urbano 2 con schiera di edifici. I valori di concentrazione di odore variano nell'intervallo (0-100)  $ou_E/m^3$  (colori dal blu al rosso). ..... 83
- Figura 3-8:** Campo di concentrazione dell'odore (sinistra) e mappa che descrive la distribuzione locale della probabilità di trovare la sorgente nelle varie posizioni all'interno di dominio urbano con schiera di edifici. Gli isocontorni di concentrazione hanno valore variabile nell'intervallo 0 (blu) e 100  $ou_E/m^3$  (rosso). Gli isocontorni della mappa di probabilità sono dinamicamente ri-assegnati per coprire l'intervallo di variazione min-max della probabilità di localizzazione della sorgente. Le linee bianca e nera rappresentano lo sviluppo della traiettoria del sensore. I cerchi identificano istanti corrispondenti alla rilevazione di odore..... 84
- Figura 3-9:** Relazione tra tempo medio per la localizzazione della sorgente e distanza iniziale tra sensore e sorgente. I simboli blu, rossi e verdi identificano il dominio di riferimento utilizzato per la simulazione (dominio semplice, edificio singolo e schiera di edifici). Le linee rappresentano la tendenza dei dati (fit lineare)..... 86
- Figura 3-10:** Variabilità del tempo necessario per la localizzazione della sorgente al variare della distanza iniziale tra sensore e sorgente per ricerche effettuate in domini di crescente complessità. I boxplot di sinistra, centrale di destra rappresentano la statistica calcolata per dominio senza edifici, con singolo edificio e con schiera di edifici. .... 87



## Introduzione

Gli odori costituiscono uno dei più rilevanti aspetti negativi di impatto ambientale per alcune tipologie di impianti industriali (impianti di trattamento acque, impianti di smaltimento dei rifiuti) ma possono rappresentare un serio problema anche per realtà produttive non industriali (attività di allevamento intensivo, attività di ristorazione); sebbene in generale non siano stati dimostrati effetti diretti delle molestie olfattive sulla salute, esse sono causa di indubbio e persistente fastidio per la popolazione residente nelle vicinanze di alcune installazioni, diventando elemento di conflitto sia nel caso di impianti/attività esistenti, che nella scelta del sito di localizzazione di nuovi impianti/attività.

L'accettazione da parte della popolazione dell'inserimento nella realtà locale di un impianto industriale, di un impianto di trattamento reflui, di un allevamento o di una attività di ristorazione potenzialmente impattanti è, infatti, quasi sempre condizionata, oltre che dagli impatti ambientali legati alle emissioni inquinanti anche, in maniera sempre crescente, dall'impatto olfattivo molesto spesso associato a queste installazioni.

L'interesse verso questo problema si è accentuato soprattutto negli ultimi anni, grazie alla maggiore attenzione rivolta alla tutela dell'ambiente e alla salute umana, ma anche a causa dell'ubicazione degli impianti/attività in zone sempre più urbanizzate.

La definizione di limiti normativi alle emissioni tali da minimizzare la probabilità di impatto odorigeno costituisce un problema di non facile risoluzione. Esistono infatti una serie di difficoltà connesse alla soggettività della percezione olfattiva ed alle modalità di misurazione degli odori nell'ambiente. In un contesto di questo tipo, un ruolo determinante nella valutazione dell'entità del disturbo derivante dai cattivi odori è svolto dall'opinione pubblica.

Il requisito preliminare per la messa a punto di una normativa organica in materia di odore richiede l'acquisizione di conoscenze sui fenomeni che determinano l'insorgenza degli odori nei diversi comparti. Questa conoscenza è essenziale per identificare le modalità operative che consentono di evitare o limitare al minimo il manifestarsi del fenomeno. Vanno poi valutati i fattori che

---

determinano la diffusione degli odori nell'ambiente. Infine è necessario disporre di un quadro completo ed aggiornato sulle tecniche di abbattimento disponibili per contenere/abbattere l'odore e sviluppare una valutazione critica sugli obiettivi realisticamente perseguibili in tema di controllo delle emissioni odorigene.

I composti chimici responsabili della generazione di odore sono specie volatili come composti solforati, azotati, acidi organici e aldeidi (Olafsdottir and Gardarsson, 2013, Tsai et al., 2008). Una volta emesse da una sorgente, il trasporto, la dispersione e la degradazione di queste sostanze nell'ambiente è controllato dalla complessa interazione tra intensità dell'emissione (Campolo et al., 2005), condizioni meteorologiche e topografia del luogo. Gli odori risultano percepibili quando la concentrazione locale ed istantanea di queste specie supera i valori, estremamente bassi, corrispondenti alla soglia di rilevazione dell'odore. Questo può accadere sia in prossimità della sorgente che a distanze elevate.

Per mantenere una elevata qualità dell'aria ambiente, è dunque necessario (i) poter quantificare la concentrazione dell'odore, (ii) identificare in modo univoco la sorgente e (iii) sviluppare ed implementare tecnologie idonee per contenere il livello di odore emesso in corrispondenza della sorgente. A distanza dalla sorgente, il legame tra emissione e percezione di odore diventa più complesso e diventa estremamente difficile mitigare l'impatto.

La percezione dell'odore è sincrona con la respirazione e involontaria, ma la reazione ad un determinato stimolo olfattivo è in qualche misura soggettiva: dipende dall'intensità e dalla sgradevolezza dell'odore, dalla durata e dalla frequenza dell'esposizione ma anche dalla sensazione di piacevolezza/spiacevolezza della sensazione evocata dall'odore (Blanes-Vidal et al., 2012). La molestia olfattiva può essere prodotta sia dall'esposizione acuta a pochi eventi di alta intensità di odore che ad una esposizione cronica a ripetuti eventi di bassa intensità di odore (Griffiths, 2014).

Qualunque sia la modalità di esposizione, gli odori che generano una reazione negativa inducono cambiamenti nel comportamento delle persone che possono avere effetti macroscopici a livello sociale.

Gli episodi in cui odori sgradevoli causano occasionalmente fastidio sono prontamente segnalati alle Autorità: quando la sorgente responsabile dell'emissione dell'odore può essere identificata in modo univoco dall'analisi

delle segnalazioni di fastidio rilevate dai residenti (Nicolas et al., 2011), dall'uso di sensori chimici (Sohn et al., 2009; Seo et al., 2011) o attraverso altre tecniche sensoriali (Brattoli et al., 2011, Capelli et al., 2011), è possibile identificare azioni correttive da intraprendere per contenere/ridurre l'impatto dell'odore.

Se consideriamo l'insieme delle attività di previsione, pianificazione e controllo legate al problema della gestione degli impatti olfattivi, le Autorità si trovano sempre più spesso nella necessità di verificare “a posteriori” se una data emissione sia o meno responsabile di impatto olfattivo in una determinata zona limitrofa.

La valutazione “a posteriori” può esser condotta attraverso metodiche sensostrumentali basate sull'utilizzo di nasi-elettronici. Questi strumenti sono in grado di caratterizzare l'impronta olfattiva di un composto odorigeno complesso attraverso la risposta (variazione di resistenza elettrica) rilevata da sensori specifici (es. ossido-metallici) in seguito all'esposizione a specifiche miscele odorigene.

La caratterizzazione dell'impronta olfattiva di ogni miscela prescinde dalla precisa caratterizzazione della composizione chimica della miscela stessa e può essere memorizzata in modo preciso nel set di parametri che descrivono la risposta dei sensori.

L'impiego dei nasi non è immediato per la valutazione “a posteriori” di impatto olfattivo: è necessaria una fase di screening, in cui si identificano i sensori più adatti per la caratterizzazione della specifica emissione, e una fase di addestramento, in cui si rileva e memorizza l'impronta olfattiva; sulla base di questi dati, il naso elettronico riuscirà a discriminare in tempo reale la tipologia di odore a cui risulta esposto, purchè questa sia confrontabile con la risposta dei sensori corrispondenti alle impronte olfattive già registrate.

Questa metodica, non presupponendo la presenza del naso umano, tenta di oggettivare la sensazione olfattiva basandosi solamente su risposte oggettive relative ad una miscela complessa e specifica per ogni campagna di misura.

Un ulteriore compito delle Autorità è quello di poter valutare “a priori”, per esempio in fase di autorizzazione, se una data emissione potrà produrre impatto olfattivo.

In questi casi, non è possibile acquisire misure e la soluzione più semplice può essere quella di basarsi su linee guida e “best practices” (vedi per esempio IPPC H4 di settore per la progettazione e gestione di rifiuti o per le attività di

---

allevamento intensivo, oppure DEFRA, 2005 per la progettazione e la gestione di sistemi di ventilazione di cucine industriali): la conformità del progetto d'impianto (produttivo o di trattamento) e della gestione del processo alle regole stabilite attraverso studi di settore è considerata come garanzia per la minimizzazione dell'impatto. Purtroppo non sempre questo approccio si dimostra adeguato e la disponibilità di strumenti più accurati potrebbe essere estremamente utile per valutare, prevenire e mitigare l'impatto dell'odore.

Un approccio decisamente efficace per la quantificazione "a priori" e "a posteriori" dell'impatto odorigeno può essere quello di valutare/prevedere per via numerica la dispersione dell'odore.

In questo caso, è necessario disporre da un lato di strumenti adeguati per potere caratterizzare la sorgente emissiva quantificando il flusso di odore che può essere immesso in ambiente e dall'altro di modelli numerici adatti per ricostruire/prevedere, quanto più accuratamente possibile, il processo di trasporto/dispersione/degradazione delle specie odorigene dalla sorgente emissiva alle zone di potenziale impatto.

La modalità operativa utilizzata per ottenere una misura obiettiva e ripetibile dell'intensità di odore sia in corrispondenza di un punto emissivo (una sorgente) che di un recettore è ormai codificata dalla norma UNI-EN 13725:2004 che indica nell'olfattometria dinamica la tecnica analitica di riferimento.

Per ricostruire/prevedere il processo di trasporto/dispersione/degradazione delle specie odorigene dalla sorgente emissiva alle zone di potenziale impatto si possono invece utilizzare una serie di modelli numerici.

Modelli numerici sono utilizzati in modo quasi routinario per prevedere la dispersione degli odori e valutare l'impatto in aree industriali (vedi Nicell, 2009, Sironi et al., 2010). L'approccio più diffuso è quello di modellare l'odore come una specie passiva, equivalente alla miscela di sostanze odorigene emesse dalla sorgente, misurandone la concentrazione in termini di unità di odore, un multiplo della soglia di rilevabilità della miscela considerata. La maggior parte dei modelli utilizzati rappresenta una versione adattata di modelli già utilizzati per studi di inquinamento dell'aria: sono stati utilizzati modelli stazionari a pennacchio Gaussiano (Latos et al., 2011), modelli a pennacchio fluttuante (Mussio et al., 2001; Dourado et al., 2014) e modelli stocastici Lagrangiani (Franzese, 2003).

La maggiore criticità nell'utilizzo di questi modelli per prevedere la dispersione degli odori è legata alla diversa risoluzione spaziale e temporale a cui è necessario ottenere la previsione. La scala temporale di pochi secondi (corrispondenti al tempo di un respiro) richiesta per valutare l'impatto dell'odore è molto più piccola della scala oraria tipicamente utilizzata per valutare la dispersione di specie chimiche inquinanti.

Se si mantiene la risoluzione oraria per modellare la dispersione dell'odore, i picchi di concentrazione di odore rilevabili alla scala temporale di interesse per la valutazione dell'impatto odorigeno devono essere stimati utilizzando un rapporto tra il valore di picco e il valore medio ("peak to mean ratio") che da alcuni autori viene assunto costante (Sironi et al., 2010) e da altri è calcolato in funzione della velocità del vento, della stabilità atmosferica, della geometria e della distanza dalla sorgente (Piringer et al., 2012; Schauburger et al., 2012).

L'alternativa è utilizzare come risoluzione temporale per la previsione ottenibile dai modelli di dispersione la scala temporale più piccola alla quale possono essere direttamente simulati i picchi di concentrazione di odore che possono produrre fastidio: Drew et al. (2007) hanno dimostrato che utilizzando modelli di dispersione a risoluzione temporale maggiore è possibile catturare con maggior precisione i picchi di concentrazione di odore prodotti in corrispondenza di una scarica. I picchi di odore sono spesso associati a condizioni di vento debole in cui le variazioni di breve periodo e su scala spaziale ridotta possono essere molto importanti: la direzione del vento può essere molto variabile (Huiling-cui et al., 2011), l'intensità della turbolenza può essere dello stesso ordine dell'intensità del vento e il termine di produzione associato all'attrito di parete può essere dominante nel bilancio dell'equazione dell'energia cinetica turbolenta (Manor, 2014) rendendo il trasporto turbolento delle specie più sensibile alle condizioni al contorno (orografia complesso e/o presenza di edifici) e altamente anisotropo (Pitton et al., 2012).

Modelli Euleriani-Euleriani basati sulle equazioni di Navier Stokes mediate secondo Reynolds (RANS) e simulazioni di larga scala (Large Eddy Simulation, LES) hanno permesso di simulare in modo accurato la dispersione di specie chimiche inquinanti in domini tridimensionali complessi (Hanna et al., 2006). Modelli dello stesso tipo possono essere utilizzati per valutare la dispersione dell'odore in domini complessi come porzioni di un ambiente urbano.

---

Un terzo problema che le Autorità pubbliche spesso si trovano ad affrontare è quello di dover localizzare la posizione di una sorgente di odore all'interno di un dominio complesso. Situazioni di molestia olfattiva segnalate da cittadini presenti in momenti e posizioni diverse all'interno di una zona in cui non è possibile identificare univocamente una sorgente devono essere analizzate in dettaglio per poter ricostruire la relazione di causa-effetto tra emissione (non nota per intensità e posizione) e l'odore percepito.

In questi casi può essere d'aiuto la caratterizzazione chimica dell'odore: identificando le specie chimiche che contribuiscono a generare l'odore è possibile identificare il processo che le genera e quindi restringere il campo per l'identificazione della sorgente emissiva tra una serie di potenziali sorgenti. Il problema diventa un po' più complesso nel caso in cui non sia possibile identificare a priori un sottoinsieme di possibili localizzazioni della sorgente. In questo caso, la ricerca per la localizzazione della sorgente deve procedere sulla base di informazioni intermittenti e sparse acquisite per esempio utilizzando un sensore chimico mobile in grado di rilevare la presenza dell'odore. Questo tipo di ricerca è utilizzato per la localizzazione di esplosivi, di sorgenti di emissione di sostanze tossiche o per la localizzazione di perdite da condotte sottomarine. Anche in questo caso la modellistica può essere d'aiuto per lo sviluppo di algoritmi di ricerca intelligenti in grado di minimizzare il tempo necessario per la localizzazione dell'obiettivo.

## **Obiettivi ed organizzazione della tesi**

Gli obiettivi di questa tesi sono (i) selezionare e testare alcuni modelli numerici esistenti utilizzati o utilizzabili come strumenti di supporto per la pubblica amministrazione nelle attività di valutazione, previsione e controllo del livello di inquinamento olfattivo valutandone potenzialità e limiti; (ii) sviluppare nuovi strumenti utili per risolvere il più complesso problema della localizzazione di sorgenti di odore sulla base di misure sparse e discontinue rilevabili da un sensore mobile.

La tesi è organizzata come segue.

Nel primo Capitolo vengono descritte le tecniche sensoriali per la misura della concentrazione dell'odore (Olfattometria). Queste tecniche sono essenziali per la

caratterizzazione oggettiva della sorgente emissiva, dato necessario per l'implementazione di qualsiasi modello predittivo della dispersione dell'odore. Viene anche presentato un esempio di applicazione di un modello Lagrangiano a puff utilizzato per identificare l'impatto olfattivo atteso da una sorgente e per valutare l'efficacia di interventi per la mitigazione dell'impatto.

Nel secondo Capitolo viene presentato ed utilizzato un modello di dispersione Euleriano Lagrangiano utilizzabile per la valutazione d'impatto odorigeno in ambienti urbani complessi. Il modello descrive la dispersione dell'odore su scale spaziale e temporale ridotte per la valutazione dell'impatto nel breve termine. Vengono inoltre sviluppati criteri per la valutazione dell'impatto identificando indicatori utili per distinguere tra esposizione acuta e cronica all'inquinamento da odore.

Nel terzo Capitolo viene affrontato il problema della localizzazione della sorgente, sviluppando un algoritmo di ricerca capace di localizzare la sorgente di odore sulla base di informazioni sparse e intermittenti relative alla presenza di odore rilevato da un sensore mobile e testandone le prestazioni.

Nel quarto Capitolo vengono riassunte le conclusioni, vengono indicate alcune linee di sviluppo e discusse alcune problematiche ancora aperte.



# 1 Misura dell'odore e utilizzo di modelli numerici per la valutazione e la mitigazione d'impatto

## 1.1 Olfattometria dinamica (UNI EN 13725:2004)

L'olfattometria è una tecnica sensoriale che permette di misurare la concentrazione dell'odore sulla base di una procedura standardizzata che garantisce oggettività, accuratezza e ripetibilità della misura.

La percezione dell'odore è attivata dalla presenza della specie odorigena in concentrazione superiore ad un valore minimo, la soglia di rilevabilità, caratteristica di ogni specie osmogena. Alla concentrazione di odore alla soglia di rilevabilità è associata l'unità di misura della concentrazione dell'odore, definita come unità odorimetrica ( $ou_E/m^3$ ).

All'aumentare della concentrazione di odore ( $C$ ), aumenta l'intensità dell'odore ( $I$ ) percepito ma la relazione è non lineare e può essere definita tramite la legge di potenza di Stevens:

$$I = K_s(C - C_0)^n \quad (1.1)$$

dove:

- $K_s$ , costante di Stevens (caratteristica della sostanza);
- $C_0$ , concentrazione di odore alla soglia di rilevabilità;
- $n$ , parametro che varia da circa 0.2 a 0.8, a seconda del composto odorigeno. Ad esempio, per una miscela odorigena con  $n$  pari a 0.2, una riduzione della concentrazione di odore pari a 10 volte, comporterà una diminuzione dell'intensità percepita di un fattore pari a 1.6, mentre, per  $n=0.8$  la stessa diluizione causerà una diminuzione dell'intensità percepita pari a 6.8.

---

Per quantificare in modo obiettivo il livello di concentrazione dell'odore di un campione d'aria, è necessario realizzare l'analisi in modo sequenziale: si parte da sotto-campioni nei quali la concentrazione della specie osmogena sia stata ridotta, per diluizione con un numero noto di volumi di aria neutra, al di sotto della soglia di rilevabilità fino ad ottenere un odore estremamente diluito; la diluizione dei sotto-campioni viene progressivamente ridotta, fino ad identificare il numero di diluizioni che rende, per la prima volta, l'odore percepibile. Questo numero di diluizioni che porta l'odore del campione alla concentrazione di rilevabilità viene utilizzato per misurare la concentrazione di odore del campione di partenza.

L'idea di sfruttare il livello di diluizione alla soglia di rilevabilità per misurare la concentrazione dell'odore è implementata nella tecnica dell'olfattometria: si utilizza uno strumento di diluizione (olfattometro) per presentare il campione di sostanza odorigena opportunamente diluito secondo valori decrescenti di diluizione ad un gruppo (panel) di valutatori.

Il numero di diluizioni del campione in corrispondenza del quale l'odore risulta percepibile al 50% dei valutatori viene considerato come misura della concentrazione di odore del campione, espresso in unità di odore europee,  $ou_E/m^3$ .

La procedura per la selezione del panel di valutatori, la numerosità del gruppo di valutatori coinvolti nei test olfattometrici, la ripetizione del numero di prove sullo stesso campione e l'elaborazione statistica dei dati grezzi ottenuti durante una sessione di misura olfattometrica permettono di garantire la rappresentatività statistica della misura sensoriale ottenuta e la sua ripetibilità.

L'olfattometria permette quindi di misurare la concentrazione dell'odore, ma può permettere anche di valutare l'intensità e il tono edonico, parametri altrettanto importanti per la valutazione del disturbo olfattivo. Queste caratteristiche dell'odore sono tuttavia più qualitative e quindi meno idonee ad essere oggettivate.

La misura della concentrazione degli odori con olfattometria dinamica è codificata dalla norma EN:13725. Nella norma vengono introdotti alcuni concetti fondamentali per le analisi (quali le dimensioni dell'odore, le caratteristiche dell'olfattometro, il concetto di diluizione, la soglia di rilevabilità) e vengono codificate le modalità di campionamento, le

caratteristiche dei materiali da utilizzare per realizzare l'olfattometro e di cui devono essere fatti i sacchetti per il prelievo dei campioni d'aria da analizzare. Sono anche trattati i concetti fondamentali di ripetibilità (misura della qualità delle misurazioni in laboratorio), riproducibilità (misura della qualità dei risultati ponendo a paragone le misure eseguite in diversi laboratori) e accuratezza (che tiene conto degli errori sistematici del metodo e del laboratorio e degli errori casuali).

Nella sezione della norma dedicata al campionamento, si specifica la strategia con cui eseguire i campionamenti che prevede di:

1. identificare i processi rilevanti di produzione di odori;
2. accertare i potenziali rischi di tossicità e la tossicità per gli esaminatori;
3. identificare il posizionamento delle fonti di odore;
4. identificare le probabili fluttuazioni dell'odore nel tempo (il tempo di raccolta del campione dipende infatti dalle fluttuazioni temporali delle emissioni di odore);
5. identificare il posizionamento dei punti di campionamento;
6. identificare le condizioni che possono alterare l'odore (variazioni atmosferiche incontrollate e variazioni controllate).

Vengono descritti 2 diversi tipi di campionamento eseguibili: il campionamento dinamico, per olfattometria diretta, e il campionamento statico, per olfattometria posticipata.

Nel campionamento dinamico il campione viene direttamente trasferito all'olfattometro senza essere immagazzinato in un contenitore. Tale metodo è applicabile esclusivamente in caso di emissioni con un livello costante di concentrazione per tutto il campionamento.

Nel campionamento statico il campione viene raccolto in un sacchetto e analizzato entro 30 ore; tale campionamento viene usato per fonti con concentrazioni odorigene variabili nel tempo, come lagune, serbatoi, aie di compostaggio e discariche.

Il vantaggio del campionamento dinamico sta nella minimizzazione dei rischi di variazione di composizione del campione gassoso per reazione chimica o per adsorbimento. D'altra parte risulta molto difficile implementare in loco una camera di misura ventilata per isolare il gruppo di esaminatori dall'odore esterno. Con il campionamento statico, assolutamente necessario se si hanno

---

fonti di odori variabili nel tempo, si migliora dunque l'accuratezza delle misure ponendo gli esperti nelle migliori condizioni ambientali. Se si utilizza un campionamento statico occorre fare attenzione che il campione non venga esposto alla luce, soprattutto solare (per minimizzare le reazioni fotochimiche) e deve essere tenuto a temperatura inferiore ai 25°C e sopra la temperatura di rugiada per impedirne la condensazione.

La strumentazione utilizzata per il campionamento consiste in una sonda campionatrice (da inserire nei condotti), un tubo di distribuzione, un filtro per il particolato collocato a monte del sistema di raccolta del campione.

Per la misura di concentrazione di odore nei condotti, quando temperatura e umidità dell'emissione non presentano valori elevati, il prelievo è effettuato mediante l'utilizzo di una pompa a vuoto funzionante secondo il metodo del polmone: il sacchetto di campionamento (di Nalophan™, della capacità di 8 litri) collocato all'interno di un contenitore rigido si riempie grazie alla depressione generata nel contenitore dalla pompa a vuoto che rimuove l'aria dal contenitore.

Un tubo in Teflon collegato al sacchetto in Nalophan™ viene introdotto all'interno dei camini, dalla bocchetta di campionamento normalmente usata per le analisi chimiche oppure dal punto di emissione stesso. I prelievi puntuali sono realizzati ad opportuna distanza da curve e raccordi dei condotti, al fine di prelevare i campioni in una situazione di flusso omogeneo e sviluppato.

Per il prelievo di campioni dai camini con alti valori di temperatura (> 50°C) e/o umidità relativa (emissione prossima alla saturazione), è invece necessario utilizzare un'apparecchiatura di pre-diluizione per riempire il sacchetto di Nalophan™. Tale scelta è giustificata da quanto riportato nella norma UNI EN 13725:2004 per i procedimenti di campionamento (par. 7.3.2): *“la pre-diluizione del flusso di gas odorigeni deve essere applicata quando vi è il rischio di condensa del campione, quando conservato in condizioni ambiente. La pre-diluizione può essere applicata se il campione è molto caldo e dev'essere raffreddato prima dell'immissione nel contenitore di campioni”*. Il pre-diluitore diluisce l'aria campionata con azoto utilizzando un rapporto di 1:3 o 1:12.5, a seconda delle scelte dell'operatore.

Per la misura della concentrazione e della portata di odore liberata da superfici estese non emissive (non dotate di flusso proprio), come le vasche o i cumuli, è impiegata una tecnica di campionamento che prevede l'impiego di una cappa dinamica di tipo “wind tunnel” o galleria del vento a bassa velocità. Il sistema

“wind tunnel” a bassa velocità è costituito da una bombola di Aria Zero (aria neutra), da un flussimetro e da una cappa dinamica tipo “wind tunnel”.

Il flusso d'aria da immettere nella cappa dinamica viene regolato tramite l'impiego del flussimetro. L'odore estratto in questo modo dalla superficie non emissiva viene messo in relazione con l'entità del flusso d'aria utilizzato per promuoverne l'estrazione.

Per la misura della concentrazione e del flusso di odore di superfici estese emissive (dotate di flusso proprio, come i biofiltri), si utilizza una cappa statica di forma piramidale, con base di dimensioni pari a 1 m x 1 m, con pareti in alluminio e camino di diametro 15 cm. La captazione dell'aria odorigena dalla cappa avviene mediante l'utilizzo di una pompa a vuoto introducendo per il prelievo un tubo in Teflon collegato al sacchetto in Nalophan™ all'interno del camino della cappa stessa.

Nella sezione della norma dedicata alla misura con olfattometro, viene descritta la modalità di presentazione dei campioni al gruppo di valutatori. L'olfattometro effettua la diluizione del campione odoroso con aria neutra e inodore, e poi lo invia alle postazioni di misura degli esaminatori che partecipano all'analisi. Essi sono chiamati, a turno, ad annusare il campione e a confrontarlo con un riferimento di sola aria neutra, per dare una risposta in termini di “sento” o “non sento” l'odore (come differenza rispetto all'aria neutra di riferimento). Entrambi i flussi, aria con odore e aria neutra, sono erogati attraverso apposite “porte di annusamento”. Inizialmente, lo strumento viene impostato a un livello di diluizione piuttosto spinto del campione originale, tale che nessun esaminatore percepisca differenze con l'aria neutra. Il fattore di diluizione viene quindi progressivamente ridotto di un fattore di scala (FS) e ogni nuova concentrazione dell'odorante viene presentata al gruppo di prova, fino all'identificazione del valore di diluizione per il quale tutti gli esaminatori avvertono l'odore. La concentrazione di odore del campione è data dalla diluizione che corrisponde alla soglia olfattiva di percezione del gruppo di prova, definita come la concentrazione minima di odorante che è percepita con probabilità pari a 0.5.

Le risposte del gruppo di prova vengono acquisite ed elaborate statisticamente dal software che generalmente supporta l'olfattometro. La concentrazione di odore (in unità odorimetriche al metro cubo) è numericamente uguale al fattore di diluizione alla soglia di percezione del gruppo di prova: una concentrazione

---

pari a  $100 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ , indica che il campione originale è stato diluito di un fattore 100 per raggiungere la soglia di percezione del gruppo di prova.

La selezione degli esaminatori viene fatta sulla base della loro sensibilità olfattiva rispetto ad una sostanza di riferimento (n-butanolo in azoto). Se il test olfattometrico realizzato utilizzando il gas di riferimento dà risultati (media e varianza della soglia di rilevabilità del n-butanolo, misurata in almeno 10 stime di soglia individuale da effettuarsi in 3 sessioni in giorni diversi) all'interno di una predeterminata soglia, gli esaminatori vengono considerati come membri rappresentativi della sensibilità olfattiva "media" della popolazione.

## **1.2 Valutazione di impatto e selezione di interventi di mitigazione**

In questo paragrafo viene descritta un'applicazione di modellistica della dispersione dell'odore per la valutazione dell'impatto odorigeno nell'area circostante un impianto di trattamento acque reflue industriali a servizio di un'azienda operante nel settore alimentare. L'impianto è sufficientemente vicino ad un depuratore comunale da rendere difficile distinguere quale dei due siti debba essere considerato responsabile della generazione di molestia olfattiva nel territorio circostante.

Questo studio ha permesso, attraverso la realizzazione di un'indagine olfattometrica per la caratterizzazione dei flussi di odore emessi dall'impianto, di implementare un modello di dispersione per valutare l'impatto odorigeno atteso a fronte del normale funzionamento dell'impianto. Il modello è stato anche utilizzato per valutare l'effetto che una serie di interventi di mitigazione potrebbe avere per l'ulteriore contenimento dell'emissione di odore.

La determinazione dell'estensione della zona intorno all'azienda entro la quale l'impianto di trattamento acque aziendale potrebbe produrre un impatto, permette di identificare a priori la responsabilità aziendale rispetto all'eventuale produzione di molestia olfattiva al di fuori di questi confini.

## 1.2.1 Descrizione del sito di studio

L'oggetto dello studio è il sistema di trattamento delle acque reflue a servizio di una azienda operante nel settore alimentare (produzione di latte e derivati). L'impianto è collocato in prossimità di un depuratore comunale in una zona a prevalente utilizzo agricolo, a bassa densità abitativa.

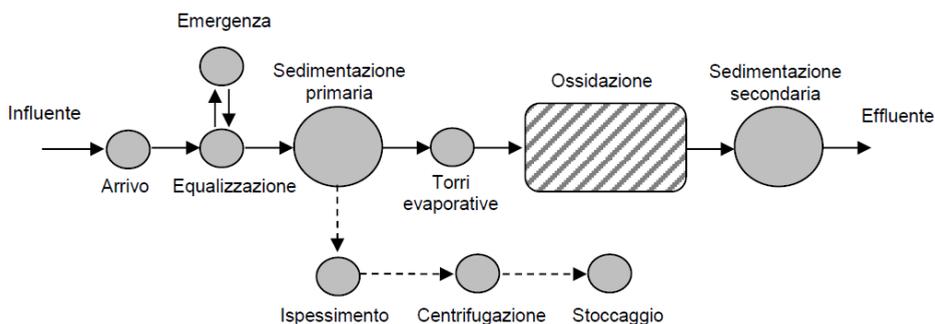
L'impianto non ha attualmente contenziosi in corso con gli abitanti, ma la vicinanza con il depuratore comunale potrebbe determinare una controversa attribuzione di responsabilità in caso di produzione di molestia olfattiva nella zona adiacente.

L'interesse dell'azienda è quindi quello di caratterizzare il proprio impatto olfattivo, per distinguerlo dall'impatto prodotto dall'impianto di trattamento comunale, limitrofo.

Lo studio discusso in questa tesi è stato organizzato in modo da:

1. identificare e caratterizzare i principali punti emissivi dell'impianto;
2. valutare l'efficacia dei presidi ambientali già installati per il contenimento delle emissioni odorigene;
3. valutare, attraverso l'utilizzo di un modello di dispersione, l'impatto delle sorgenti emissive dell'impianto;
4. valutare l'efficacia di soluzioni tecnologiche disponibili per la mitigazione d'impatto.

Il sistema di trattamento delle acque smaltisce le acque utilizzate per il lavaggio delle apparecchiature di processo, ricche in residui organici e prodotti detergenti, e consiste in una serie di trattamenti biologici, come schematizzato in Figura 1-1.



**Figura 1-1:** Schema d'impianto trattamento acque reflue a servizio dell'azienda alimentare.

L'impianto è costituito da una sezione di equalizzazione, collegata ad una vasca di emergenza, collocata in corrispondenza del punto di arrivo dell'influyente; entrambe le vasche sono dotate di copertura per la captazione degli effluenti gassosi che vengono convogliati verso uno scrubber; a valle della vasca di equalizzazione è posto un sistema di sedimentazione primaria che permette di ridurre la concentrazione dei solidi sospesi, chiarificando il refluo. I fanghi in uscita dal sedimentatore sono trattati in una linea di ispezzimento seguita da centrifugazione e i solidi separati vengono stoccati in appositi cassoni coperti e aspirati, posti all'interno di un locale chiuso e dotato di aspirazione che invia gli effluenti gassosi allo scrubber per il loro trattamento. A valle del sedimentatore primario, il refluo chiarificato viene raffreddato in due torri evaporative prima di essere alimentato a due vasche di ossidazione, coperte con un tetto di cemento armato. Il trattamento avviene in condizioni anossiche e successivamente aerobiche. Il refluo in uscita dallo stadio di ossidazione passa in un sedimentatore secondario in modo da separare l'acqua in uscita dai fanghi residui, prima del relativo scarico nelle acque superficiali.

L'impianto è stato realizzato prevedendo una serie di accorgimenti per il contenimento delle emissioni: vengono captati gli effluenti gassosi in corrispondenza dei pozzetti di ingresso alla stazione di sollevamento; le vasche di trattamento (vasca di equalizzazione, vasca di emergenza, vasca di sedimentazione primaria) sono coperte; i cassoni per lo stoccaggio dei fanghi sono coperti e aspirati; il locale in cui è installata la centrifuga è coperto e aspirato. Tutti gli aereiiformi captati vengono inviati, attraverso apposite linee di aspirazione, ad uno scrubber orizzontale a 3 stadi di lavaggio (acido, basico ed ossidante) per il loro trattamento e successivamente immessi in atmosfera.

## 1.2.2 Campagna olfattometrica

La compagna olfattometrica è stata realizzata in corrispondenza dei punti di campionamento riportati in Tabella 1.1.

**Tabella 1-1:** Punti emissivi monitorati

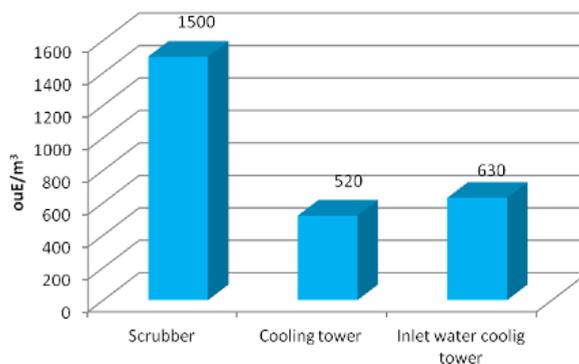
ID	Punto emissivo
A	Valle scrubber
B	Monte scrubber
C	Torri evaporative
1	Vasca arrivo reflui
2	Cassone vaglio
3	Pozzetto ispezione ispessitori
4	Vasca ossidazione - Zona aerobica
5	Vasca ossidazione - Zona anossica
6	Acqua ingresso torri evaporative
7	Acqua uscita torri evaporative/ingresso vasca ossidazione
8	Acqua uscita vasca ossidazione
9	Acqua uscita impianto

La Deliberazione della Giunta Regionale della Lombardia DGR 15/02/2012 - n. IX/3018, "Determinazioni generali in merito alla caratterizzazione delle emissioni gassose in atmosfera derivanti da attività a forte impatto odorigeno", e più precisamente l'Allegato 1 "Requisiti degli studi di impatto olfattivo mediante simulazione di dispersione" al punto 3.1 ("Criteri per l'individuazione delle sorgenti da considerare nello scenario emissivo" indica che: "Nello scenario emissivo da impiegare nelle simulazioni per la stima dell'impatto olfattivo devono essere considerate tutte le emissioni dell'impianto oggetto dello studio (convogliate, diffuse o fuggitive) per le quali la portata di odore sia maggiore di 500 ou<sub>E</sub>/s, ad eccezione delle sorgenti per le quali, quale che sia la portata volumetrica emessa, la concentrazione di odore massima sia inferiore a 80 ou<sub>E</sub>/m<sup>3</sup>".

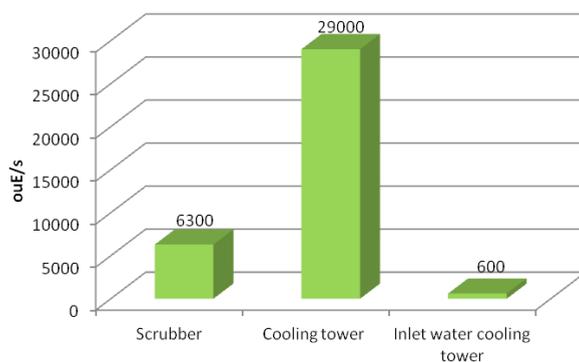
Sulla base di queste Linee Guida, le uniche emissioni da considerare per la modellazione numerica del caso di interesse sono risultate quelle riportate in Tabella 1-2.

**Tabella 1-2:** Caratteristiche delle sorgenti emmissive

Emissione	Altezza	V	Temp	Portata vol.	Conc. odore	Portata odore
	m	m/s	°C	Nm <sup>3</sup> /h	ou <sub>E</sub> /m <sup>3</sup>	ou <sub>E</sub> /s
Scrubber	12	10.0	24	15 000	1 500	6 300
Torri evaporative	15	16.8	27	200 000	520	29 000
Acqua ingress alle torri evaporative	1.5	Dipendente dalla velocità del vento	ambiente	Dipendente dalla velocità del vento	630	600



**Figura 1-2:** Concentrazione di odore delle sorgenti significative per la modellazione della dispersione dell'odore.



**Figura 1-3:** Flusso di odore delle sorgenti significative per la modellazione della dispersione dell'odore.

La concentrazione di odore risulta maggiore in corrispondenza dell'emissione dello scrubber piuttosto che alle torri evaporative ma, poichè la portata volumetrica delle torri è pari a 200.000 Nm<sup>3</sup>/h e quella dello scrubber è 15.000 Nm<sup>3</sup>/h, il flusso di odore maggiore è quello emesso delle torri.

Date l'altezza dell'emissione dalle torri evaporative (15 m) e dallo scrubber (12 m), la velocità in uscita e la temperatura dell'effluente, la zona di impatto potrebbe estendersi ad una certa distanza dalla sorgente. L'odore prodotto da sorgenti passive (prive di flusso proprio), come l'acqua in entrata alle torri evaporative, impatterà invece solamente nelle aree più prossime alla sorgente, con una portata di odore proporzionale dall'intensità del vento locale.

### 1.2.3 Sviluppo del modello di dispersione

Il modello di dispersione selezionato per lo studio è un modello lagrangiano a puff sviluppato dall'Environmental Protection Agency (EPA) (Calpuff).

Il modello risolve le equazioni di conservazione della massa delle specie chimiche da simulare (l'odore nel nostro caso) approssimando l'emissione continua come una serie di rilasci discreti (puff).

Il trasporto, la dispersione e la degradazione di ogni pacchetto di odore è determinato sulla base del campo di moto e di dispersione del vento ricostruito da un pre-processore meteorologico (CALMET) sulla base di dati esterni. Il risultato del modello sono campi di concentrazione orari calcolati per il dominio tridimensionale di interesse, sulla base dei quali possono essere valutate le ricadute.

Poichè l'obiettivo dello studio è quello di valutare la ricaduta locale dell'odore in un intorno dell'impianto, lo sviluppo del modello di dispersione si è basato sulle seguenti caratteristiche:

- *Scala spaziale*: l'estensione dell'area d'interesse è limitata a qualche chilometro nell'intorno dell'impianto. La griglia scelta per il calcolo del campo di moto e delle ricadute è 2 x 2 km, con un passo di griglia di 100 metri, centrata sull'impianto oggetto di studio.
- *Scala temporale*: la simulazione è stata condotta con risoluzione oraria; per valutare il contributo stagionale dei venti sulle dinamiche di

---

dispersione, il periodo temporale simulato è pari a un anno. L'anno di riferimento scelto come rappresentativo delle condizioni meteorologiche tipiche locali è il 2007, secondo quanto indicato dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente.

Il modello di dispersione CALPUFF permette di tenere conto degli effetti indotti dall'orografia del territorio sulla dispersione. L'informazione sull'orografia viene introdotta tramite una matrice di quote altimetriche del terreno e di uso del suolo relative al dominio spaziale di interesse.

Queste informazioni sono rappresentate in Figura 1-4 e 1-5.

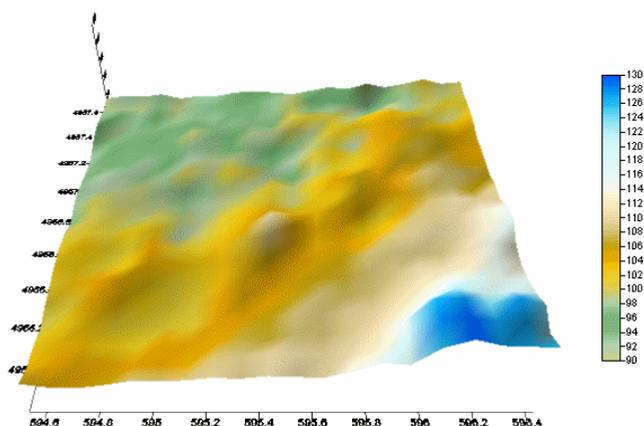
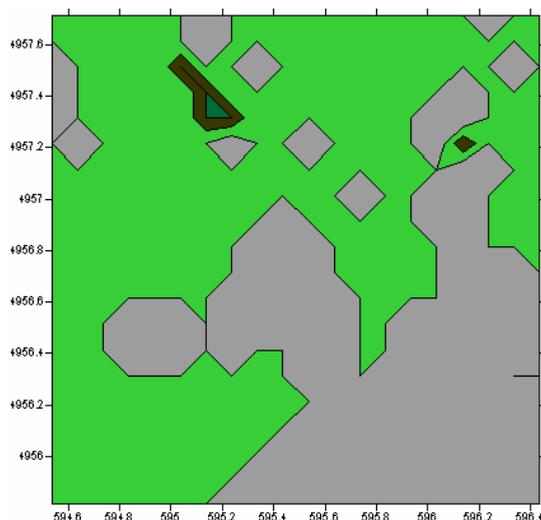


Figura 1-4: Orografia del territorio per l'area di studio

La variazione della quota altimetrica è compresa tra 50 e 130 m, con la zona più rilevata in corrispondenza dell'angolo in basso a destra del dominio di calcolo. La zona è parzialmente ricoperta da terreno boschivo, mentre il resto è terreno ad uso agricolo (vedi Figura 1-5). La classificazione del territorio sulla base dell'uso del suolo indica una zona di territorio agricolo (agricultural land, in verde chiaro), la presenza di terreno boschivo (forest land, in verde scuro) e in grigio.



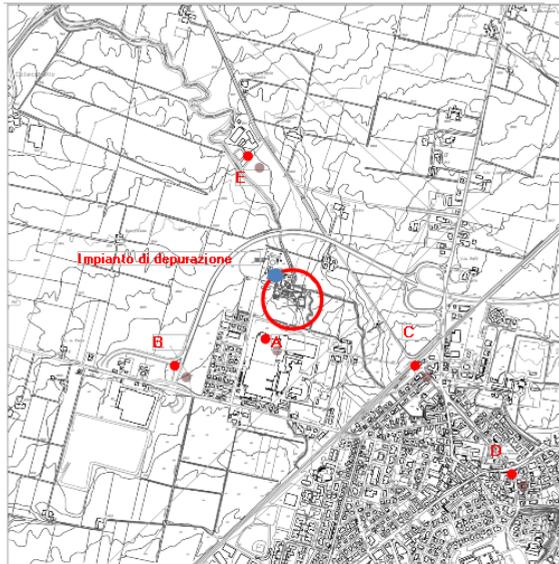
**Figura 1-5:** Distribuzione dell'uso del suolo definita per l'area di studio.

La posizione dell'impianto rispetto agli insediamenti abitati più vicini, localizzati a circa 500 metri dal confine dello stabilimento in direzione Est, è evidenziata in Figura 1-6 utilizzando una mappa estratta dalla Carta Tecnica Regionale (CTR) in formato DWG (scala 1:5000). Nella stessa Figura è indicata anche la posizione dell'impianto di depurazione comunale.

All'interno della griglia di calcolo sono stati individuati 5 recettori, rilevanti per il calcolo della ricaduta dell'odore. Tali recettori rappresentano i centri abitati o le case isolate più prossime all'impianto. Per la scelta dei recettori, si è tenuto conto della direzione prevalente dei venti, che, sulla base dei dati anemometrici, risulta essere orientata lungo la direzione Ovest - Est.

I recettori identificati in Figura 1-6 rappresentano rispettivamente:

- Recettore A: ingresso allo stabilimento
- Recettore B: punto su una strada secondaria
- Recettore C: primi abitati della cittadina limitrofa, in corrispondenza della stazione ferroviaria
- Recettore D: centro della cittadina limitrofa
- Recettore E: recettore localizzato in prossimità di un'abitazione a nord dello stabilimento

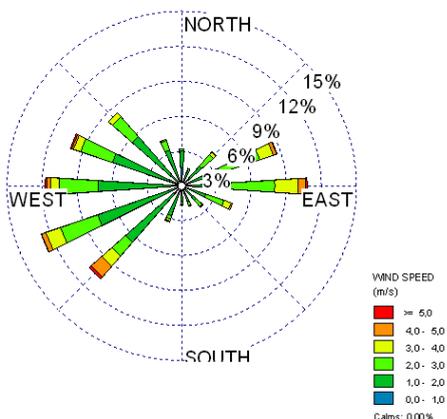


**Figura 1-6:** Mappa della zona di studio considerata per l'implementazione del modello di dispersione. Il cerchio rosso indica la posizione dell'impianto aziendale, il cerchio blu la posizione del depuratore comunale, i punti in rosso la posizione dei recettori sensibili considerati per la valutazione d'impatto odorigeno.

Per l'area in esame sono stati acquisiti dati meteorologici di superficie (stazione meteo al suolo) e rilevamenti in quota ottenuti tramite pallone sonda. Le serie temporali meteorologiche al suolo sono state ottenute da una centralina di proprietà dell'ARPA distante circa 10 km dalla zona di studio. I parametri rilevati con risoluzione oraria sono l'intensità (m/s) e direzione del vento (gradi Nord), la temperatura dell'aria (K), la pressione barometrica (hPa), l'umidità relativa (%) e la radiazione globale (kJ/m<sup>2</sup>).

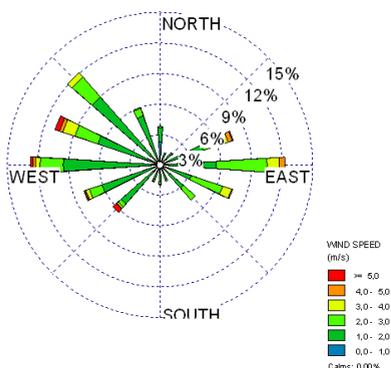
I profili verticali sono stati acquisiti in corrispondenza di una stazione meteorologica distante 100 km dall'impianto. La bassa rappresentatività di questi dati è stata indicata al pre-processore meteorologico definendo un peso per la valutazione del dato che è inversamente proporzionale alla distanza della stazione dal dominio. I dati associati al profilo verticale sono l'intensità (m/s) e la direzione del vento (gradi Nord); la temperatura dell'aria (K); la pressione barometrica (hPa).

I dati anemometrici sono stati analizzati per descrivere lo scenario climatico e dispersivo dell'area in esame. Il Figura 1-7 è riportata la rosa dei venti relativa all'anno 2007, valutata in corrispondenza della stazione meteorologica.

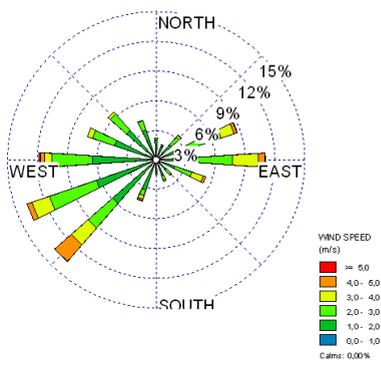


**Figura 1-7:** Rosa dei venti per l' anno 2007- riferita alla stazione meteorologica considerata: la coordinata radiale (lunghezza del settore circolare) rappresenta la frequenza, il colore dei cunei indica l'intensità del vento. L'analisi della rosa dei venti indica che la direzione prevalente del vento è dal quadrante Ovest, con frequenza maggiore dalla direzione O e OSO.

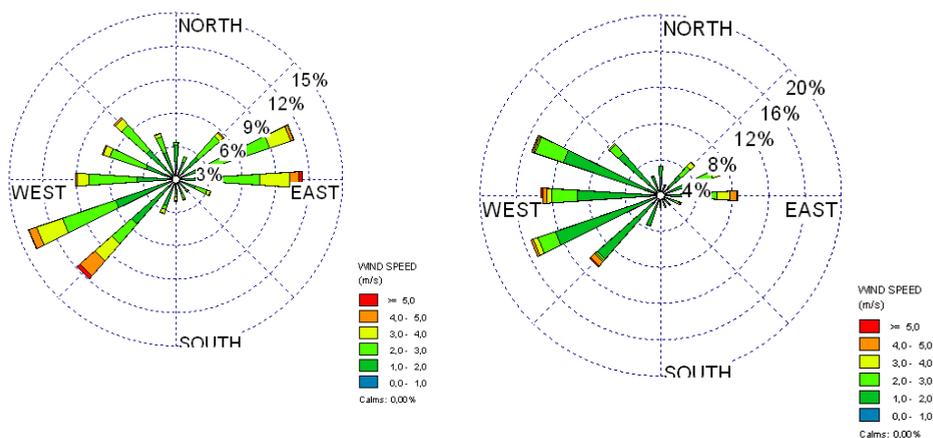
L'analisi stagionale della direzione dei venti non rivela grossi scostamenti nelle diverse stagioni, con netta prevalenza dei venti provenienti dal quadrante Ovest (vedi Figura 1-8)



a. Estate



b. Primavera



c. Autunno

d. Inverno

**Figura 1-8:** Rosa dei venti per l'anno 2007 nelle diverse stagioni: la coordinata radiale (lunghezza del settore circolare) rappresenta la frequenza, il colore dei cunei indica l'intensità del vento.

La distribuzione dell'intensità dei venti, riportata in Figura 1-9, indica intensità prevalente nelle classi di velocità compresa tra 1.0-2.0 m/s (registrate nel 55.4% del tempo), molto raramente (0.7% dei rilevamenti) è stata registrata una velocità superiore a 5 m/s, e gli episodi di vento di intensità inferiore a 1 m/s rappresentano il 4.1% dei valori sull'anno.

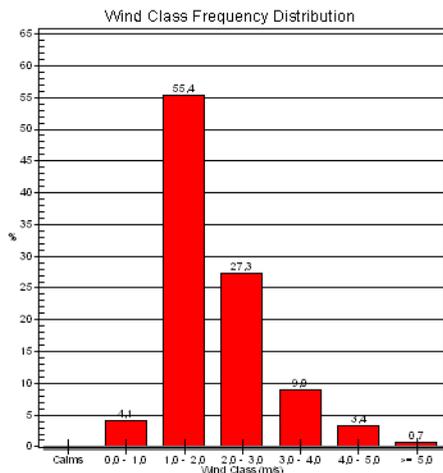
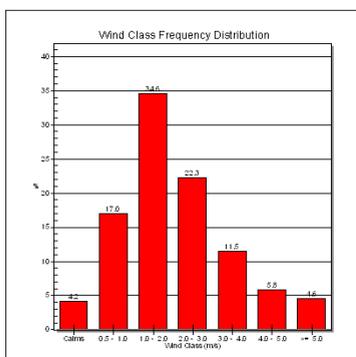
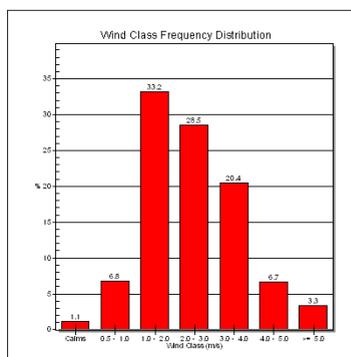


Figura 1-9: Distribuzione di frequenza delle classi di velocità del vento

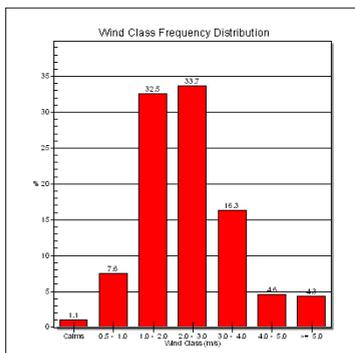
L'analisi stagionale della distribuzione della frequenza dell'intensità del vento (Figura 1-10) indica un valore stabile della frequenza per quanto riguarda le classi di vento con valori tra 1 e 2 m/s. Gli scostamenti stagionali più significativi riguardano la frequenza di venti di elevata intensità (prevalenti in estate) e la frequenza delle calme di vento (maggiore in primavera).



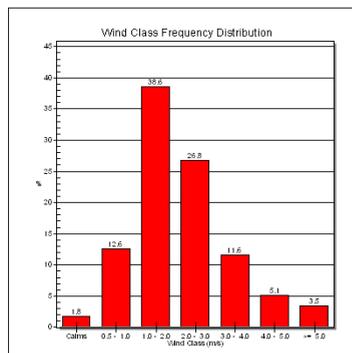
a. Primavera



b. Estate



c. Autunno



d. Inverno

**Figura 1-10:** Distribuzione di frequenza delle classi di velocità del vento nelle diverse stagioni.

In questo studio sono stati considerati due differenti scenari per la valutazione d'impatto:

- *Scenario attuale:* le simulazioni sono state condotte considerando le emissioni dell'impianto allo stato attuale, in riferimento ad un periodo di tempo corrispondente ad un anno completo (2007) ed utilizzando come input i dati raccolti durante l'indagine olfattometrica sul campo.
- *Scenario di mitigazione:* per valutare l'effetto di interventi per la mitigazione dell'impatto odorigeno, lo scenario emissivo è stato modificato considerando:
  - la rimozione delle torri evaporative
  - la copertura del canale dell'acqua in ingresso alle torri ed il convogliamento degli effluenti odorigeni nell'attuale torre di lavaggio ad umido .

L'unica sorgente odorigena modellata in questo caso corrisponde allo scrubber.

Il periodo di simulazione è sempre il periodo annuale.

L'utilizzo di Calpuff per la valutazione della dispersione dell'odore richiede un opportuno trattamento del risultato (valore orario di concentrazione di odore calcolata) per renderlo rappresentativo dell'impatto odorigeno associato al superamento della soglia olfattiva all'interno di intervalli temporali su scala

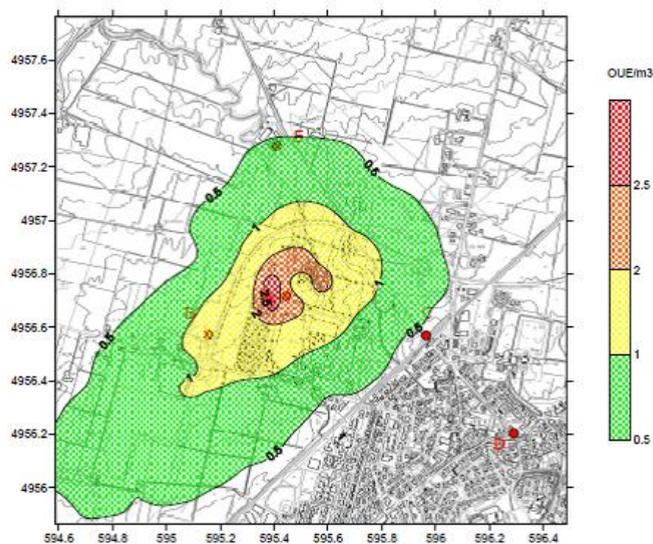
molto più ridotta (2-3 secondi, pari al tempo del respiro). Per stimare la concentrazione di picco dell'odore percepibile sulla piccola scala, filtrata dalla risoluzione temporale del modello di dispersione, si può utilizzare un fattore di proporzionalità tra il valore di picco e il valore medio ("peak to mean ratio") che alcuni autori (Sironi et al., 2010) assumono essere costante mentre altri (Piringer et al., 2012; Schauburger et al., 2012) valorizzano in funzione della velocità del vento, della stabilità atmosferica, della distanza e della geometria della sorgente emissiva.

I criteri attualmente utilizzati in vari Paesi per identificare il valore soglia di concentrazione che permette di discriminare tra accettabilità e inaccettabilità dell'impatto dell'odore sono molto diversi tra loro. Nicell (2009) riporta criteri basati su valori di concentrazione ambiente variabili tra 0.5 e 50 unità odorimetriche, calcolati con riferimento a tempi di media variabili da 1 secondo a 1 ora e associati a frequenze di accettabilità variabile tra il 98% e il 100%.

In Australia il criterio per la valutazione dell'accettabilità/impatto dell'odore (basato su una media fatta su periodo di 3 minuti e una frequenza di non superamento pari al 99.9%) è fissato sulla base della densità della popolazione nella zona di studio (vedi EPA 373/07). La variabilità dei criteri utilizzabili per la valutazione dell'impatto indica che non c'è ancora accordo su quale concentrazione di odore e quale tempo di media permettano di quantificare in modo efficace e sicuro l'impatto a distanza dalla sorgente.

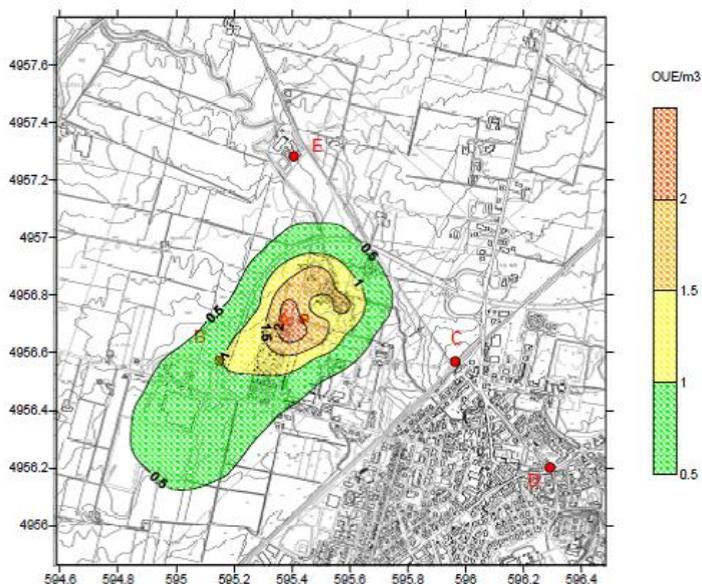
Sommer-Quabach et al. (2014) hanno proposto una classificazione dei criteri per la valutazione d'impatto che ne distingue due gruppi: i criteri basati su valori di soglia di concentrazione bassa e una frequenza di non superamento elevata, rilevanti per valutare l'esposizione cronica ad impatto odorigeno, e quelli basati su alti valori della concentrazione di soglia e una bassa frequenza di non superamento, rilevanti per valutare l'esposizione acuta alla molestia olfattiva. Attualmente, il criterio raccomandato in Europa per la valutazione d'impatto appartiene al primo gruppo (orientati alla valutazione di esposizione cronica) e si basa sulla previsione della concentrazione oraria per un periodo annuale e sulla valutazione dell'impatto basata sul valore del 98° percentile della distribuzione dei dati orari (vedi Environment Agency, 2011). La scelta del 98° percentile è supportata dall'elevata correlazione dimostrata tra questo valore di concentrazione e il fastidio percepito in occasione di campagne di monitoraggio sul campo (vedi Pullen and Vawda, 2007).

Per valutare l'impatto dell'odore abbiamo quindi utilizzato il criterio basato sul 98° percentile. La mappa di ricaduta relativa al 98° percentile della concentrazione di odore calcolata a partire dai valori orari disponibili dalla simulazione annuale per lo scenario attuale d'impianto è riportata in Figura 1-11. La concentrazione di odore è espressa in  $ou_E/m^3$ . L'area verde delimita la zona in cui l'impatto di odore è trascurabile (concentrazione di odore di picco inferiore alla soglia di rilevabilità per il 98% del tempo).



**Figura 1-11:** Scenario attuale: isocontorni di concentrazione di odore valutati a 1.5 m di altezza. I valori rappresentano il 98° percentile dei valori orari di concentrazione calcolati su periodo annuo.

La stessa mappa calcolata per lo scenario corrispondente alla realizzazione degli interventi di mitigazione è riportata in Figura 1-12.



**Figura 1-12:** Scenario di mitigazione: isocontorni di concentrazione di odore valutati ad un'altezza di 1.5 m. I valori rappresentano il 98° percentile dei valori orari di concentrazione calcolati su periodo annuo.

**Tabella 1-3:** 98° percentile della concentrazione di odore calcolata in corrispondenza dei recettori sensibili

Recettori	A	B	C	D	E
Scenario attuale	2.26	1.25	0.46	0.14	0.53
Scenario di mitigazione	1.87	0.93	0.15	0.14	0.04

Dal confronto delle mappe si vede che l'adozione degli interventi tecnici di mitigazione (copertura delle torri evaporative e della canaletta che porta l'acqua alle torri) potrebbe permettere un miglioramento dell'impatto olfattivo dell'impianto di trattamento delle acque reflue nel territorio circostante che non risulta, al momento, particolarmente significativo. In nessuno dei casi l'impatto odorigeno va infatti ad interessare i centri abitati siti nelle vicinanze dell'impianto. I valori del 98° percentile di concentrazione valutati in corrispondenza dei recettori sensibili identificati in Figura 1-12 confermano che gli interventi di mitigazione sarebbero al più apprezzabili in corrispondenza del sensore A, situato in corrispondenza dell'ingresso dello stabilimento.

Per quanto riguarda la motivazione iniziale dello studio (valutare l'importanza dell'impianto attuale nella generazione d'impatto odorigeno in una zona in cui

---

insiste anche un impianto di depurazione comunale), le simulazioni dimostrano che i flussi di odore emessi dal sistema di trattamento acque a servizio dell'azienda alimentare non sono tali da determinare un impatto odorigeno significativo al di fuori dell'area dell'impianto. In caso di eventuali contenziosi relativi alla produzione di molestia olfattiva al di fuori del perimetro dell'azienda, la responsabilità dell'impatto andrebbe ricercata in ulteriori flussi di odore, diversi da quelli emessi dall'impianto nelle condizioni di normale funzionamento caratterizzate attraverso l'indagine olfattometrica, probabilmente attribuibili all'impianto comunale adiacente.

## 2 Valutazione di impatto odorigeno in area urbana

### 2.1 Motivazione

Valutare l'impatto odorigeno nelle aree urbane è molto più difficile che valutare l'impatto in aree industriali: l'ambiente urbano, caratterizzato dall'elevata densità di edifici e dall'elevato numero di potenziali fonti emmissive, è decisamente più complesso. Inoltre, gli effetti del trasporto, della dispersione e della trasformazione delle specie osmogene sono più complicati da modellare visto che l'interazione tra strato limite atmosferico e gli edifici produce un campo di vento caratterizzato da variazioni spaziali e temporali significative anche sulla piccola scala.

In ambiente urbano, gli odori sgradevoli sono nella maggior parte dei casi associati a ristoranti, fast food ed attività commerciali che prevedono la cottura di cibi. La molestia olfattiva può essere prodotta per periodi brevi (da pochi secondi a pochi minuti), in modo occasionale o con una certa ripetitività.

Il potenziale impatto olfattivo derivante da queste attività commerciali dovrebbe essere considerato nella fase di pianificazione urbanistica e nella fase di autorizzazione all'esercizio di nuove installazioni per affrontare, in modo pro-attivo, il problema del controllo della qualità dell'aria.

Nell'ottica di una valutazione preventiva della potenziale molestia olfattiva associata a questo tipo di attività sono stati sviluppati alcuni approcci semi-empirici. L'approccio adottato dal London Borough of Richmond upon Thames ([http://www.richmond.gov.uk/planning\\_guidance\\_for\\_food\\_and\\_drink\\_establishments.pdf](http://www.richmond.gov.uk/planning_guidance_for_food_and_drink_establishments.pdf)) per la valutazione preventiva d'impatto olfattivo suggerisce di valutare la criticità del rischio sulla base di quattro indicatori: l'intensità della dispersione in corrispondenza della sorgente di emissione; la vicinanza di eventuali recettori; le dimensioni dell'impianto di cottura; la tipologia di cottura e di grassi utilizzati.

---

Per ogni tipo di attività di cottura di cibo, il rischio di produzione di odori molesti può essere quantificato assegnando un "punteggio di criticità" che indica la necessità di predisporre dispositivi idonei per il controllo delle emissioni odorogene (vedi [http://www.richmond.gov.uk/planning\\_guidance\\_for\\_food\\_and\\_drink\\_establishments.pdf](http://www.richmond.gov.uk/planning_guidance_for_food_and_drink_establishments.pdf)).

Questa metodologia ha il merito di essere piuttosto semplice e di tenere in considerazione, almeno in maniera qualitativa, tutte le variabili che possono avere un effetto oggettivo sulla dispersione degli odori. Ciò nonostante, per individuare e attuare strategie efficaci per la prevenzione, la valutazione e la mitigazione dell'impatto, è molto utile poter disporre di strumenti più accurati. La maggior parte degli odori sono generati da miscele di specie chimiche piuttosto che da singoli composti: valutare la sensazione olfattiva finale prodotta a partire dalla concentrazione di singole specie presenti in una miscela non è facile e diventa estremamente complesso in presenza di effetti di mascheramento, interazione e sinergia tra specie diverse (Centola et al., 2004). Questo motivo, insieme con la necessità di acquisire dati di concentrazione precisi anche per valori molto bassi e con un'alta risoluzione temporale per le diverse specie chimiche presenti (non necessariamente note a priori) rende del tutto impraticabile l'utilizzo di sensori chimici per la valutazione di impatto odorogeno. Un approccio più pratico ed efficace può derivare di nuovo dall'utilizzo di modelli di dispersione numerica.

I modelli numerici di dispersione degli odori sono stati utilizzati con successo per predire e per valutare l'impatto odorogeno in aree industriali (vedi Nicell 2009, Sironi et al., 2010) in cui l'effetto locale della presenza di pochi edifici può essere eventualmente ricostruito in modo più che soddisfacente utilizzando modelli di "building downwash". L'odore viene modellato come una sostanza chimica passiva, equivalente alla miscela di sostanze chimiche presenti, la cui concentrazione è quantificata, attraverso l'olfattometria, come un multiplo della soglia di rilevamento. Per valutare la dispersione di odore in domini urbani complessi, bisogna però ricorrere a modelli in grado di lavorare su scala spaziale e temporale più fine.

La scala di temporale corretta per valutare l'impatto dell'odore è pari ad alcuni secondi. Utilizzando modelli di dispersione che funzionino a questa scala temporale permette di calcolare direttamente i valori di picco che possono provocare fastidio alla popolazione (Drew et al., 2007). I valori di picco della

concentrazione di odore sono spesso associati a condizioni meteorologiche relativamente deboli (venti leggeri): in queste condizioni, l'intensità dei moti turbolenti può essere dello stesso ordine della velocità del vento, la direzione può essere estremamente variabile (Huiling-cui et al., 2011), ed il trasporto delle specie odorigene risulta essere molto più sensibile all'effetto locale della topografia (terreno complesso e presenza di edifici).

Modelli di tipo Euleriano-euleriano basati sulle equazioni di Navier Stokes mediate (RANS - Reynolds Averaged Navier Stokes) e modelli LES (Large Eddy Simulation) si sono dimostrati molto accurati per la simulazione della dispersione di specie chimiche (inquinanti) in domini complessi tridimensionali (Hanna et al., 2006). Gailis et al. (2007) hanno simulato la dispersione di un tracciante all'interno di un dominio contenente una schiera di ostacoli utilizzando un modello stocastico lagrangiano, dimostrando che le fluttuazioni di velocità interne al pennacchio possono avere un effetto molto più importante della sua oscillazione trasversale per la dispersione del tracciante. Michioka et al. (2013) hanno utilizzato un modello di simulazione Large Eddy (LES) di microscala ad alta risoluzione temporale (10 s) accoppiato con un modello Large Eddy di mesoscala per valutare la variazione di concentrazione nel breve termine di un pennacchio di gas tracciante all'interno di una geometria urbana. L'accoppiamento tra i due modelli LES di diversa scala ha permesso di valutare l'importanza relativa della variabilità meteorologica (mesoscala) e degli effetti topografici (microscala) sulla dispersione del tracciante, dimostrando l'importanza della variabilità del campo di moto a scala locale sulla dispersione del tracciante.

Lo stesso tipo di modelli può essere utilizzato per simulare la dispersione degli odori in ambiente urbano. Maizi et al. (2010) hanno utilizzato un modello Euleriano-Euleriano RNG (Re-Normalisation Group, model  $k-\epsilon$ ) per valutare l'impatto di un pennacchio di odore in condizioni di emissione e campo di vento stazionari e in presenza di un limitato numero di edifici; Dourado et al. (2012 e 2014) hanno utilizzato un modello LES e un modello a pennacchio fluttuante.

Nonostante il moltiplicarsi delle applicazioni dimostrative basate su modelli a scala locale ad elevata risoluzione temporale, non esistono ancora esempi di modelli di dispersione degli odori sufficientemente validati per essere utilizzati con confidenza per la valutazione di impatto odorigeno (Pullen and Vawda,

---

2007), né applicazioni dello stesso tipo sviluppate per lo studio della dispersione in domini urbani complessi.

Gli alti costi computazionali richiesti per caratterizzare con elevata risoluzione spaziale e temporale il campo di moto e il campo di concentrazione in un dominio complesso sono uno dei principali motivi che impediscono la diffusione di questi modelli.

La simulazione altamente risolta nel tempo e nello spazio è sostenibile con riferimento a specifici scenari emissivi piuttosto che per lunghi periodi di simulazione (es. mesi o anni).

Per ridurre i tempi di calcolo ed il costo computazionale delle simulazioni è possibile utilizzare modelli di tipo Euleriano-lagrangiano di tipo “fast response”, come quelli descritti da Gowardhan et al. (2011) per lo studio della dispersione di sostanze tossiche in ambiente urbano.

In questo lavoro di tesi abbiamo testato l'utilizzo di uno di questi modelli “fast response” (QUIC, Quic Urban & Industrial Complex model) sviluppato dai laboratori di Los Alamos. Si tratta di un modello Euleriano-lagrangiano sviluppato in modo specifico per descrivere la dispersione in ambiente urbano di sostanze chimiche tossiche. In questa tesi il modello viene utilizzato per valutare l'impatto di emissioni di odori.

L'ipotesi alla base dell'applicabilità di questo modello per valutare la dispersione dell'odore è quella che il campo di vento e la turbolenza che controllano la dispersione siano influenzati più dalla geometria del dominio urbano che dalla variabilità del vento e dalla turbolenza atmosferica.

In queste condizioni è possibile utilizzare dati locali di velocità del vento acquisiti con frequenza temporale molto alta (un minuto) per ricostruire il campo di moto (e l'intensità della turbolenza) intorno agli edifici; questo campo di moto verrà utilizzato per simulare il trasporto di odore e valutare l'impatto olfattivo finale.

Questo tipo di modelli potrebbe diventare un potente strumento di supporto per gli enti autorizzativi e di controllo nella loro attività di pianificazione e gestione degli impatti. Ad oggi, gli strumenti di cui un ente autorizzativo può disporre per il controllo dell'impatto olfattivo durante l'iter autorizzativo di nuove attività di ristorazione sono essenzialmente due: l'ente può (i) identificare zone specifiche della città come idonee/non idonee per le nuove attività; (ii) fissare dei limiti di emissione ad hoc da applicare in determinate zone urbane.

Lo scopo finale dello studio descritto in questo Capitolo è quello di sviluppare/testare uno strumento modellistico e decisionale che potrebbe essere adottato dagli enti pubblici per verificare se una nuova (o esistente) installazione può potenzialmente produrre (o produce) emissioni odorigene al di sopra della tollerabilità, permettendo eventualmente di fissare limiti di emissione specifici per ogni attività commerciale già in fase di autorizzazione (o, a posteriori, per la mitigazione ed il controllo dell'impatto accertato dell'odore).

Il primo obiettivo di questo lavoro è quindi dimostrare che il modello Euleriano-Lagrangiano proposto può essere utilizzato per valutare in modo comparativo l'impatto olfattivo generato da una data sorgente emissiva se questa viene collocata in posizioni diverse all'interno di un dominio urbano; il secondo obiettivo è quello di dimostrare che il modello può essere utilizzato per verificare se l'impatto olfattivo può essere mitigato grazie all'installazione di presidi ambientali a trattamento degli effluenti odorigeni.

Il modello sarà utilizzato per confrontare gli effetti di un'emissione trattata/non trattata associata alle attività di cottura di cibi di un fast food la cui apertura potrebbe essere autorizzata in due diverse zone urbane nel centro storico della città di Verona.

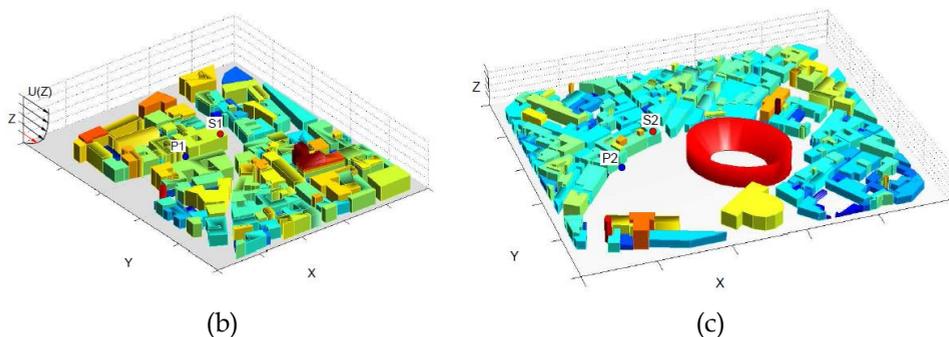
## **2.2 Descrizione del sito di studio**

In Figura 2-1 (a) è riportata una veduta aerea della zona della città di Verona che è stata utilizzata come ambiente urbano di riferimento per sviluppare lo studio. Sulla mappa sono identificate due zone (Area 1 e Area2) che sono state selezionate come siti per la possibile installazione dell'attività di fast food. La struttura urbana delle due zone è caratterizzata da una diversa distribuzione degli edifici che potrebbe avere un effetto importante per la valutazione dell'impatto olfattivo: la prima zona (larga  $230 \times 290$  m) è caratterizzata da edifici allineati lungo la direttrice stradale (street canyons); la seconda area (larga  $495 \times 250$  m) si affaccia sulla piazza dell'Arena. Le Figure 2-1 (b) e (c) mostrano il modello computazionale corrispondente alle due aree. L'estensione verticale del dominio è pari a 50 m. La posizione delle sorgenti emissive di

odore è identificata dai punti rossi S1 e S2. L'altezza del punto emissivo (il camino del fast food) è stata fissata 1 metro al di sopra dell'altezza del tetto dell'edificio in cui è collocata l'attività. Nel sistema di coordinate locali con origine fissata in corrispondenza dell'angolo in basso a sinistra di ogni area, la posizione delle sorgenti è data dalle triplete  $(x, y, z) = (138.5, 176.5, 18.5)$  per l'Area 1 e  $(161.5, 238.5, 17.5)$  per l'Area 2. I punti identificati in blu indicano recettori di controllo, P1 e P2, posti a 50 m di distanza nelle direzione sottovento (rispetto al vento prevalente). L'altezza dal suolo dei punti di controllo è pari a 1.5 m.



(a)



**Figura 2-1:** Vista e aerea della città di Verona (a), dominio computazionale corrispondente ad Area 1 (b) e Area 2 (c). I punti rossi e blu indicano la posizione della sorgente e di punti di controllo a distanza di 50 m dalla sorgente in direzione sottovento rispetto al vento prevalente.

### 2.3 Modello di dispersione in ambiente urbano (QUIC)

Il modello QUIC, implementato in ambiente Matlab, risolve le equazioni di Navier Stokes mediate secondo Reynolds (RANS) per un fluido incomprimibile in un dominio tridimensionale complesso.

Il dominio computazionale, corrispondente ad un'area urbana contenente un certo numero di edifici, viene descritto utilizzando una griglia strutturata: per ogni volume computazionale, si utilizza un codice 0/1 per distinguere tra la presenza di un edificio (0) o di uno spazio accessibile al flusso di aria (1). La generazione della griglia di calcolo tridimensionale può essere realizzata in modo semi-automatico utilizzando il pre-processore geometrico incorporato nel codice QUIC a partire da shapefile file in formato ESRI (Environmental Systems Research Institute) che descrivono la geometria e gli attributi di oggetti georeferenziati (gli edifici della città).

Le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte in modo esplicito nel tempo utilizzando una griglia "staggered" utilizzando un metodo di proiezione. Lo schema di discretizzazione è accurato al secondo ordine nello spazio e nel tempo (vedi Gowardhan et al., 2011 per ulteriori dettagli sul metodo numerico). Il modello di turbolenza è un modello a zero equazioni (algebrico) basato sulla teoria della lunghezza di mescolamento di

---

Prandtl. Le condizioni al contorno applicate alla frontiera del dominio computazionale sono (i) condizione di scorrimento libero (gradiente nullo per la componente di velocità parallela alla superficie in direzione normale alla superficie) in corrispondenza della superficie superiore e delle superfici laterali e (ii) profilo di velocità imposto, derivato dalle misure acquisite da una centralina anemometrica urbana, in corrispondenza della sezione del dominio da cui proviene il vento (vedi Figura 2-1 (b)), (iii) condizione di flusso libero in uscita (gradiente di velocità nullo per la componente di velocità normale alla superficie in direzione normale alla superficie) in corrispondenza della sezione del dominio verso cui soffia il vento.

Il profilo di velocità verticale utilizzato per specificare la condizione al contorno nella sezione di monte del dominio è aggiornato con la stessa frequenza di acquisizione del dato in corrispondenza della centralina meteo. Lo standard internazionale raccomandato dal WMO (World Meteorological Organization) per l'acquisizione dei dati di vento corrisponde ad una frequenza pari a 10 minuti. Le centraline meteo di ultima generazione permettono di acquisire dati anche con maggior frequenza (un minuto) anche se non tutte le municipalità dispongono di tali strumentazioni avanzate. In questo lavoro si è deciso di utilizzare il dato di vento alla massima risoluzione disponibile per permettere di ricostruire la variabilità a breve termine del campo di moto che determina la dispersione dell'odore.

Il modello di dispersione dell'odore è basato su un approccio Lagrangiano a particelle, dove migliaia di "particelle" sono rilasciate dal punto di emissione e tracciate nel loro moto casuale governato dagli effetti convettivi e diffusivi (Zwack et al., 2011). Le particelle rappresentano volumi infinitesimi di odore (specie traccianti con la stessa densità dell'aria) ad ognuno dei quali è associata una frazione dell'emissione di odore.

Le simulazioni realizzate descrivono l'impatto di una emissione continua all'interno di un campo di moto tempo dipendente. Durante la simulazione, il campo di vento locale viene aggiornato in modo discontinuo con frequenza pari a quella del dato anemometrico disponibile (ogni minuto) mentre l'effetto delle fluttuazioni sul trasporto delle "particelle" di odore è ricalcolato ad ogni passo temporale del tracciamento (0.1 secondi) sulla base dell'intensità locale della turbolenza.

Il tracciamento Lagrangiano si basa su una statistica di un milione di particelle rilasciate durante il periodo di tempo simulato (15 minuti). Il campo di concentrazione euleriano di odore viene ricostruito a posteriori contando in numero di particelle che hanno attraversato un determinato volume computazionale nel periodo di media temporale scelto (30 secondi per le simulazioni realizzate).

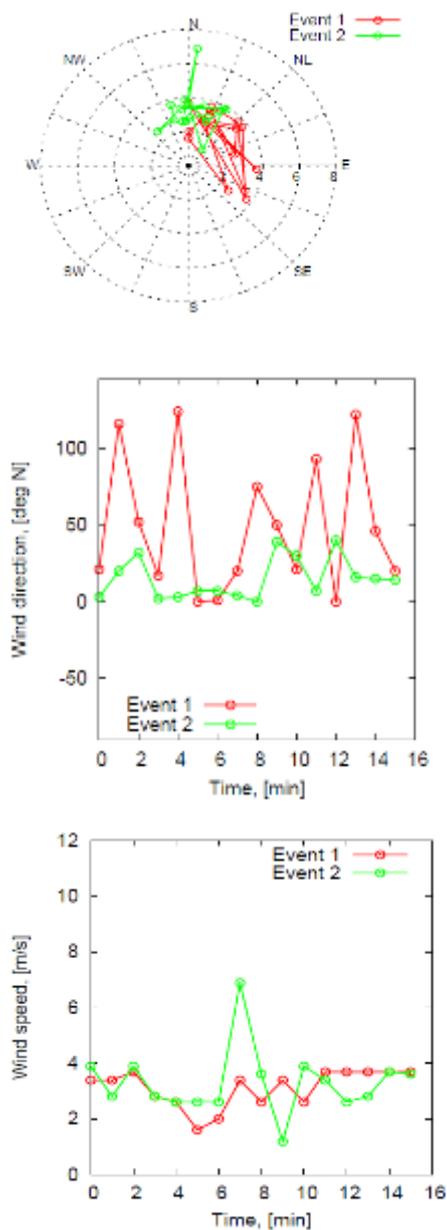
### 2.3.1 Dati meteorologici

I dati meteorologici utilizzati in questo studio sono stati rilevati in corrispondenza della stazione urbana di Verona Golosine (latitudine 45°28'51 ", longitudine 10°52'35 ", 61 m s.l.m) e si riferiscono al mese di Febbraio 2012. Le registrazioni (risoluzione temporale pari a 1 minuto per i parametri di velocità e direzione del vento) sono stati messi a disposizione da MeteoVerona.

L'alta risoluzione temporale dei dati meteorologici permette di condurre valutazioni molto accurate in aree urbane specifiche ed entro orizzonti temporali limitati mentre non si adatta bene a studi di impatto a lungo termine. L'analisi statistica dei dati di vento in corrispondenza della stazione anemometrica suggerisce che la direzione del vento prevalente è da Nord (N), Nord-Est (N-E) mentre la velocità media del vento è di circa 0.89 m/s (a 10 m di altezza dal suolo).

Per la modellizzazione della dispersione degli odori nel breve termine sono stati selezionati ed estratti due periodi di durata pari a 15 minuti. I due periodi sono stati selezionati per dimostrare quanto diverso può risultare l'impatto prodotto nel breve termine da una sorgente odorigena quando un vento temporale interagisce con una topografia urbana complessa.

In Figura 2-2 è riportata la variabilità del vento per i due eventi considerati.



**Figura 2-2:** Variabilità del vento per gli scenari meteorologici considerati (Evento 1 e 2)

Il diagramma polare (Figura 2-2 (a)) mostra la variabilità del vento in termini di intensità e direzione rilevati in minuti successivi: in Figura 2-2 (b) e (c) sono riportate le serie temporali di velocità e direzione del vento.

Il primo evento selezionato corrisponde ad una intensità pari a  $3.12 \pm 0.67$  m/s (valor medio più deviazione standard) con vento che soffia dalla direzione  $48 \pm 44^\circ$  gradi N; il secondo evento è caratterizzato da intensità del vento pari a  $3.3 \pm 1.2$  m/s e vento che soffia dalla direzione  $2 \pm 20^\circ$  N. Anche se l'intensità del vento è simile, la variabilità dell'intensità del vento è maggiore per l'evento 2 mentre le direzioni del vento differiscono sia per valor medio che per variabilità. I due eventi identificano quindi due scenari meteorologici simili e tuttavia sostanzialmente diversi che dovrebbero essere simulati per una corretta quantificazione dell'impatto olfattivo. Considerando la dimensione del dominio computazionale e l'intensità media del vento, ogni periodo da 15 minuti risulta abbastanza lungo per tracciare la dispersione dell'emissione odorigena fino all'estremità del dominio.

### **2.3.2 Dati emissivi**

Per caratterizzare l'intensità dell'emissione attesa dal fast-food, si è misurata l'emissione in un ristorante in cui si utilizzano le stesse topologie di cottura (frittura ad immersione e stufatura). I campioni di odore sono stati prelevati dal camino del ristorante durante le operazioni di frittura. Il tempo di funzionamento della cucina durante il pranzo (o la cena) è risultato pari a 109 minuti. Il diametro del camino del ristorante è pari a 1 m. Il valor medio della velocità del flusso e della portata sono risultati pari a 4.12 m/s e 350 Nm<sup>3</sup>/min. La temperatura media del flusso rilevata all'ingresso e all'uscita dal camino è risultata pari a 44°C e 31°C.

La variabilità dell'emissione odorigena è stata valutata durante il campionamento secondo quanto prescritto dalla norma EN ISO 16911:2013. Sono stati prelevati 3 campioni conformemente alle procedure descritte dalla norma EN 13725:2004 utilizzando una pompa a vuoto per aspirare l'aria dal camino e immagazzinarla in sacchetti di Nalophan (volume di 8 L); il campionamento ha richiesto un tempo pari a 1.5 minuti per campione, con 10 minuti di sosta tra un campione e l'altro per valutare la variabilità dell'emissione nel tempo; i campioni di aria odorigena sono stati trasferiti in laboratorio per la valutazione sensoriale da parte dei panel. Campioni di odore e aria neutra mescolati secondo un fattore di diluizione decrescente sono stati somministrati ai panel

---

per identificare in numero di diluizioni alla soglia di rilevabilità per la miscela di specie presenti nel campione.

Il campionamento è stato realizzato in due diverse condizioni, corrispondenti a dispositivo per il trattamento dei fumi (filtro a carboni attivi) acceso o spento.

I risultati dell'analisi olfattometrica per entrambe le tipologie di campione sono riassunti in Tabella 2-1. Durante il campionamento non sono stati rilevati scostamenti significativi dei parametri di processo (temperatura, velocità dei fumi). I valori di emissione odorigena utilizzati come dato di ingresso per il modello di dispersione corrispondono al valor medio misurato sui tre campioni.

**Tabella 2-1:** Dati dell'indagine olfattometrica

<b>Campione</b>	<b>T [°C]</b>	<b>RH [%]</b>	<b>Q [Nm<sup>3</sup>/s]</b>	<b>C [ou<sub>F</sub>/m<sup>3</sup>]</b>
U1	31.3	24.1	5.4	5 000
U2	29.5	22.4	6.2	3 800
U3	32.2	28.7	5.9	5 000
Media	31.0	25.0	5.8	4 600
T1	30.8	24.6	6.0	1 300
T2	30.3	22.7	4.3	1 300
T3	30.9	23.5	4.5	2 000
Media	30.7	23.6	4.9	1 533

## **2.4 Risultati**

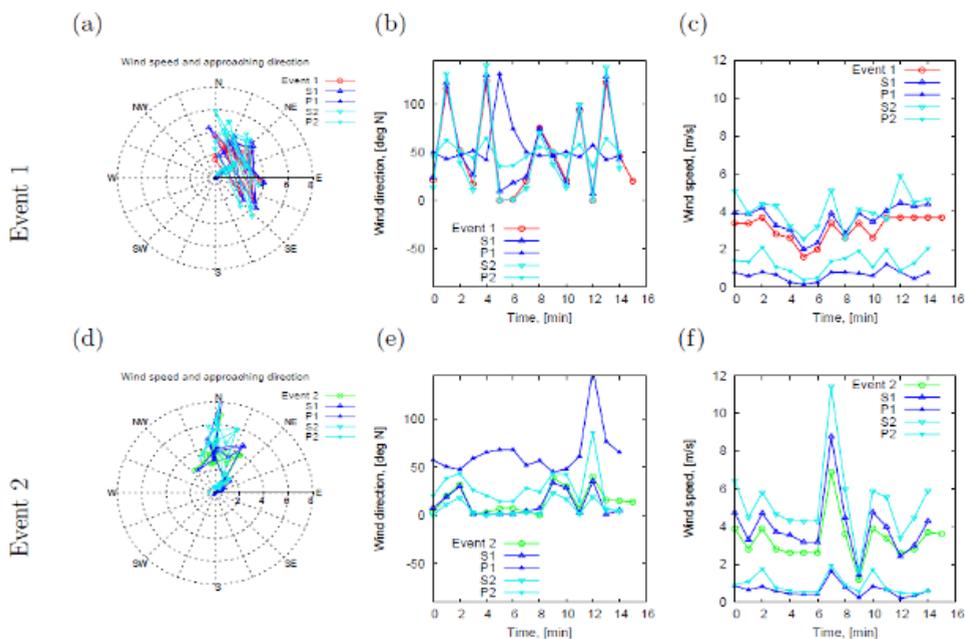
### **2.4.1 Caratterizzazione del campo di vento**

Il modello permette di aggiornare con frequenza pari ad un minuto (dettata dalla risoluzione del dato utilizzato come condizione al contorno) il campo di vento calcolato all'interno del dominio tridimensionale.

In Figura 2-3 è mostrato il confronto tra velocità e direzione del vento misurati in corrispondenza della stazione anemometrica (ad altezza 10 m, linea rossa, con cerchi) e utilizzati come condizione al contorno, e quelli calcolati in corrispondenza di altri punti del dominio come le sorgenti S1 e S2 (1 m al di

sopra del tetto, linea con triangoli vuoti) e i punti di controllo P1 e P2 (linee con triangoli pieni).

L'effetto della topografia urbana è quello di produrre delle differenze nella direzione e velocità del vento in punti specifici del dominio.



**Figura 2-3:** Confronto tra intensità e direzione del vento in alcuni punti di riferimento del dominio: stazione anemometrica, posizione delle sorgenti e posizione dei punti di controllo.

L'evoluzione dell'intensità e della direzione del vento calcolate in corrispondenza della posizione della sorgente emissiva (il camino 1 m al di sopra gli edifici) è simile ai valori registrati in corrispondenza della stazione meteorologica: l'intensità del vento è leggermente maggiore in corrispondenza della sorgente essendo questa in posizione più elevata del sensore anemometrico.

L'evoluzione dell'intensità e della direzione del vento cambiano in modo significativo in corrispondenza dei punti di controllo P1 e P2. L'effetto principale della topografia urbana è quello di ridurre la variabilità della direzione del vento registrata in corrispondenza del punto di controllo. L'intensità del vento calcolata in P1 e P2 è tipicamente inferiore a quella della stazione anemometrica (l'altezza dei punti di monitoraggio è di soli 1.5 m dal

---

suolo); la direzione del vento può risultare molto diversa. Per l'Evento 1, la direzione del vento calcolata in P1 e P2 rimane praticamente pari a 50°N qualunque sia la direzione del vento registrata in corrispondenza della stazione anemometrica. Per l'Evento 2, la direzione del vento in P2 è simile a quella registrata dalla stazione anemometrica mentre rimane sempre pari a 50°N in P1. Questa differenza è legata all'effetto della topografia urbana che tende a ridurre la variabilità della direzione del vento allineandola localmente a quella che è la direzione delle direttrici stradali.

## 2.4.2 Dispersione dell'odore

In Figura 2-4 sono riportati gli isocontorni di concentrazione di odore calcolati nell'Area 1 nel primo scenario meteorologico. La posizione della sorgente è identificata dal punto nero. Gli isocontorni rappresentano valori di concentrazione nel piano orizzontale a distanza 1.5 m del suolo (altezza di riferimento di un naso umano). La Figura mostra delle istantanee (una ogni 240 secondi). La scala di colori utilizzata per rappresentare gli isocontorni è limitata all'intervallo  $[2\div 12 \text{ ou}_E/\text{m}^3]$ . Per stabilire una corrispondenza tra concentrazione di odore e intensità percepita abbiamo considerato la seguente scala di riferimento (Sommer-Quabach et al., 2014):

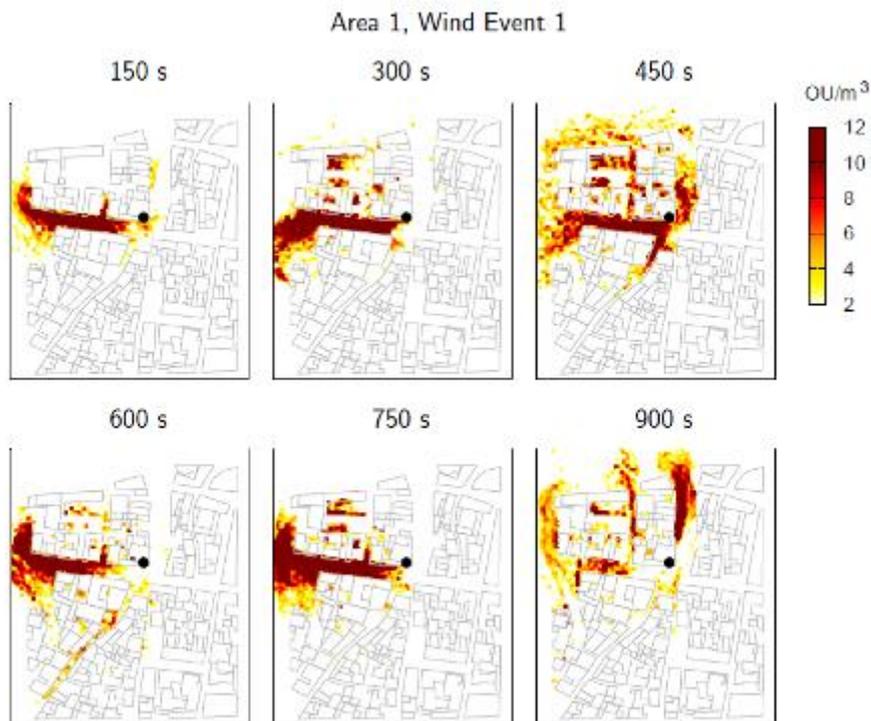
- non percepibile ( $C < 2 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ );
- accettabile ( $2 < C < 5 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ );
- fastidioso ( $5 < C < 15 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ );
- estremamente fastidioso ( $C > 15 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ ).

Il valore inferiore e superiore della scala rappresentano una concentrazione di odore a cui l'odore è chiaramente rilevabile e un valore a cui l'odore percepito è abbastanza forte da generare fastidio.

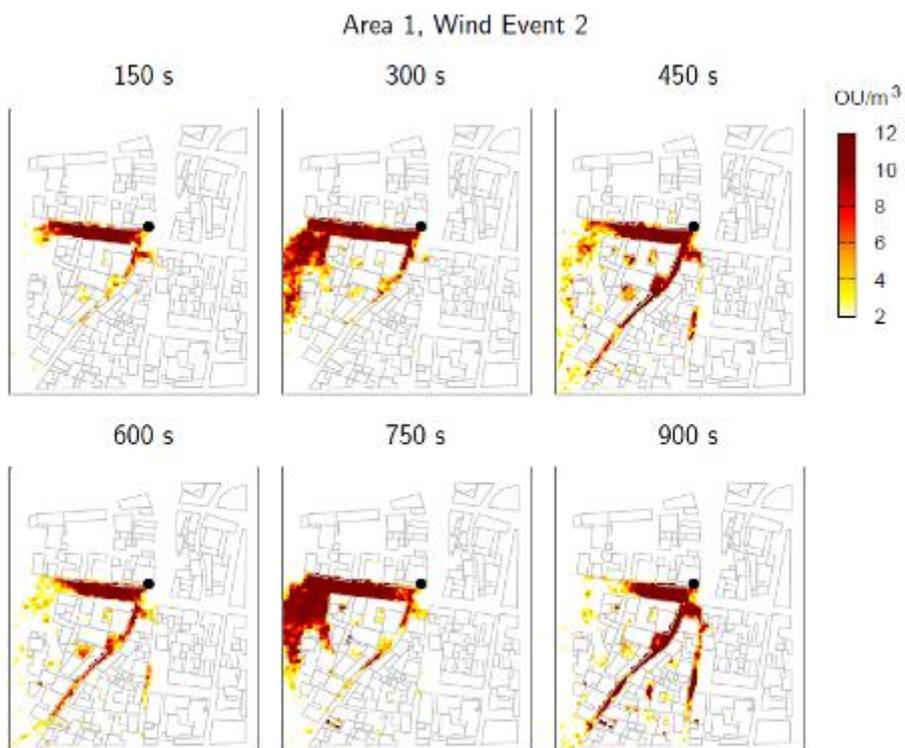
Gli isocontorni calcolati durante lo scenario meteorologico 1 nell'Area 1 (Figura 2-4) mostrano che il pennacchio di odore si allunga in direzioni diverse a seconda della direzione dominante del vento. L'effetto della topografia urbana è quello di produrre una traiettoria preferenziale per la dispersione dell'odore che si allunga nella direzione della strada principale. Per effetto della variazione della direzione del vento agli istanti successivi, alcuni puff di odore possono

raggiungere aree non direttamente esposte alla sorgente, producendo un impatto diffuso dell'odore anche a distanze elevate.

Durante lo scenario meteorologico 2 (Figura 2-5), gli isocontorni mostrano che i puffi di odore si muovono lungo le tre direttrici principali (allineate con le direzioni del vento) con una concentrazione massima di odore che risulta determinata dall'intensità del vento.



**Figura 2-4:** Impatto odorigeno nell'Area 1: primo scenario meteorologico (Evento 1).



**Figura 2-5:** Impatto odorigeno nell'Area 1: secondo scenario meteorologico (Evento 2).

La dispersione dell'odore prodotta nell'Area 2 (area aperta che si affaccia sulla piazza dell'Arena) durante lo scenario meteorologico 1 (Figura 2-6) indica che i puff di odore rimangono confinati nella direzione prevalente del vento (da N-E verso S-W) nonostante la variabilità della direzione del vento; alcuni puff possono penetrare in profondità nella struttura urbana in direzione N-W quando la direzione da cui soffia il vento è da S-E. Durante il secondo scenario meteorologico (Figura 2-7) il pennacchio dell'odore oscilla avanti e indietro nello spazio aperto di fronte all'Arena.

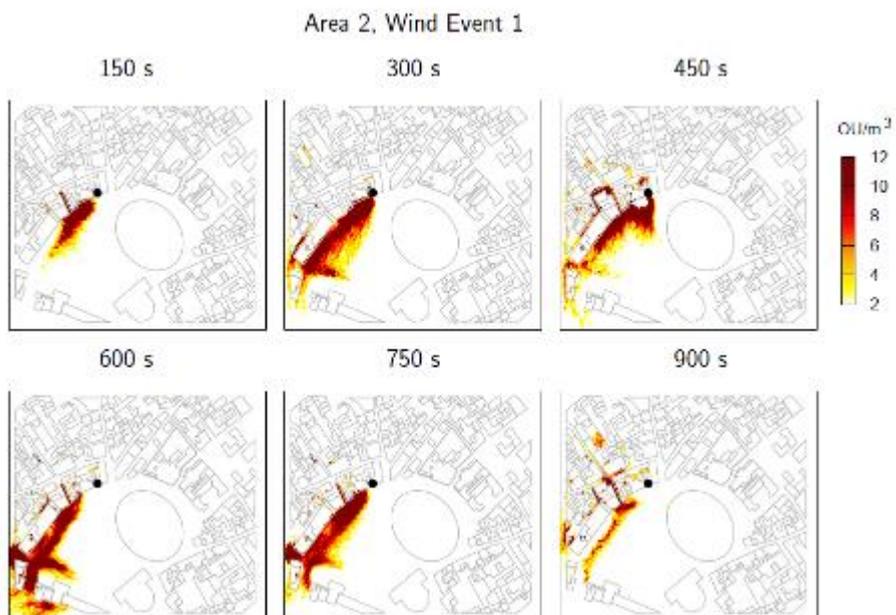


Figura 2-6: Impatto odorigeno nell'Area 2: primo scenario meteorologico (Evento 1).

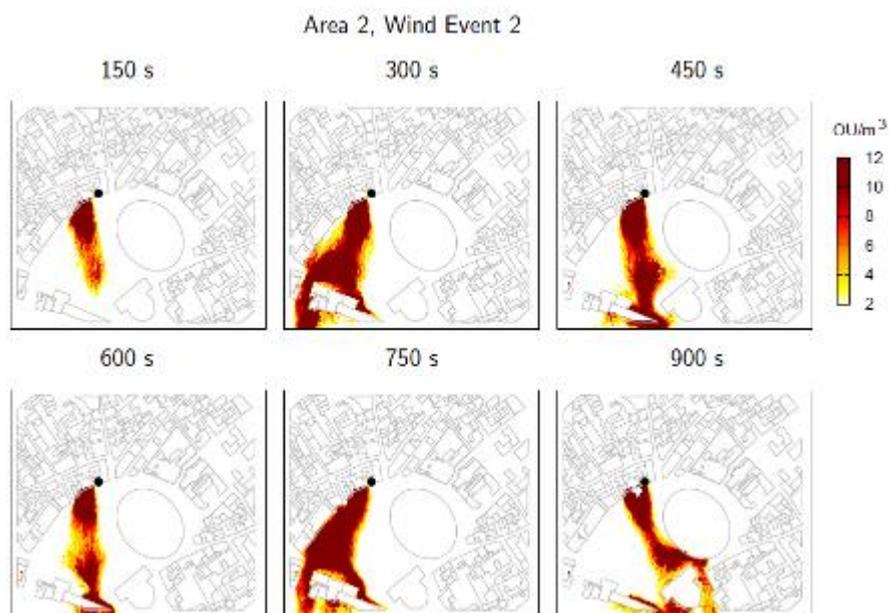
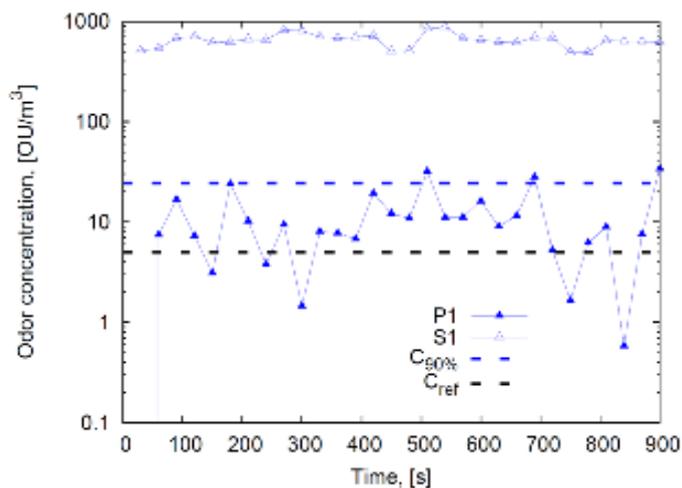


Figura 2-7: Impatto odorigeno nell'Area 2: secondo scenario meteorologico (Evento 2).

L'evoluzione dinamica delle linee di isocontorno dell'odore dà un'idea qualitativa dell'impatto olfattivo atteso sulla base delle informazioni di topografia urbana e di scenario meteorologico.

Tuttavia, per confrontare l'impatto olfattivo su base quantitativa è necessario utilizzare descrittori sintetici. Questi possono essere ottenuti dall'analisi statistica delle serie temporali di concentrazione di odore calcolate dal modello per ciascun punto della griglia del dominio computazionale.

In Figura 2-8 sono riportate le serie temporali di concentrazione di odore calcolate durante l'Evento 1 nel punto della griglia più vicino alla sorgente di emissione S1 e nel punto P1.



**Figura 2-8:** Serie temporali di concentrazione di odore calcolate nei punti P1 e S1.

Secondo la metodologia FIDOL (vedi Environment Agency, 2011) l'intensità dell'odore e la frequenza dell'esposizione sono due dei fattori principali che permettono di valutare la molestia olfattiva prodotta. In questo lavoro, data la ridotta lunghezza del periodo simulato (15 min) e il ridotto tempo di media per la valutazione della concentrazione dell'odore (30 secondi), non possiamo utilizzare il criterio raccomandato dalla normativa di riferimento per valutare l'impatto olfattivo. Proponiamo invece l'utilizzo di due criteri per la valutazione dell'impatto simili a quelli discussi da Griffiths (2014), basati o sull'intensità o sulla frequenza degli eventi in grado di produrre impatto rilevati all'interno del periodo di simulazione disponibile (il periodo di 15 minuti nel nostro caso).

Per il primo criterio, definiamo una frequenza di superamento (per esempio il 10%) e ricaviamo il valore degli isocontorni che corrispondono alla frequenza di superamento definita. Questi isocontorni possono essere confrontati con valori di soglia per individuare le aree in cui un eventuale impatto sarà sufficientemente intenso da risultare molesto; per il secondo criterio, fissiamo invece una concentrazione di soglia (per esempio  $C_{ref} = 5 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ ) e deriviamo una mappa delle frequenze di superamento. In questo modo è possibile delimitare le zone in cui il valore di soglia risulterà superato con frequenza tale da risultare molesta.

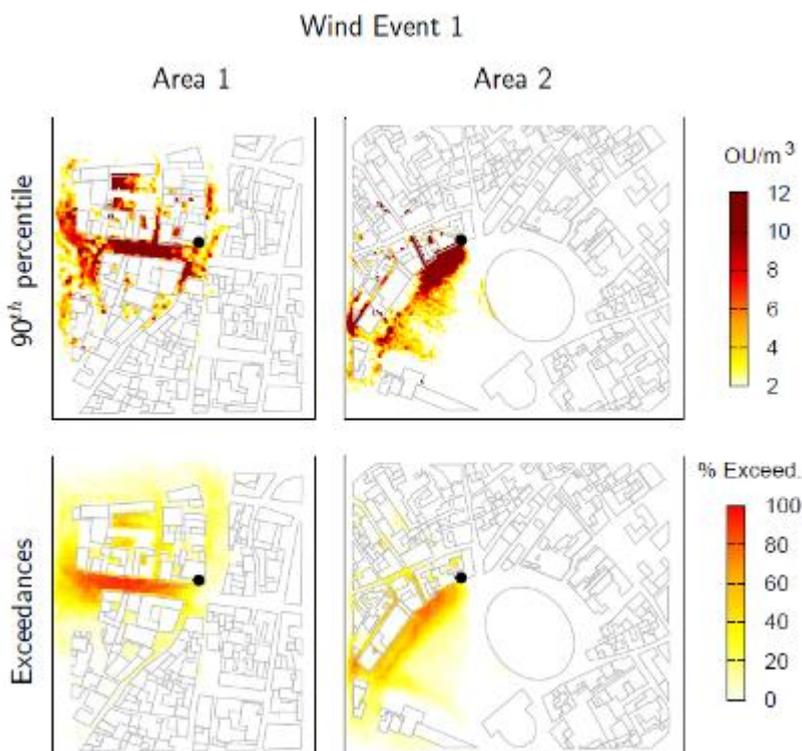
Il tipo di analisi che proponiamo può essere realizzato adottando sia per il valore della frequenza di superamento che per il valore della concentrazione di riferimento qualsiasi altro valore diverso da quello utilizzato in questo lavoro.

Dalla serie temporale di concentrazione di odore calcolata in corrispondenza di ogni punto della griglia di calcolo, possiamo calcolare la concentrazione che non viene superata per il 90% del tempo (90° percentile del set di dati) e la frequenza di superamento della soglia di concentrazione di riferimento,  $C_{ref}$  ( $5 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ , indicata come una linea tratteggiata nel grafico).

Dalla Figura 2-8, si osserva che vicino alla sorgente (S1) la concentrazione di odore è piuttosto elevata e le variazioni nel tempo sono limitate; al punto P1 invece, l'intensità dell'odore è notevolmente inferiore e la sua variabilità nel tempo è maggiore. L'analisi statistica delle due serie temporali calcolate nei punti P1 e S1 indica una concentrazione media di odore pari a 11 e  $653 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ , con deviazione standard pari a 8.7 e  $100 \text{ ou}_E/\text{m}^3$  (corrispondente ad un coefficiente di variazione pari a 0.79 e 0.15).

I valori del 90° percentile calcolati in P1 e S1 sono pari a 24.4 (indicato da una linea tratteggiata sottile nel grafico) e  $802.6 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ ; la soglia di concentrazione di riferimento  $C_{ref}$  (linea tratteggiata spessa nel grafico) viene superata l'80% del tempo in P1 e il 100% del tempo in S1.

Nelle Figure 2-9 e 2-10 sono rappresentati i risultati di questa analisi realizzata in corrispondenza di ogni punto della griglia computazionale per valutare l'impatto odorigeno nell'Area 1 e nell'Area 2 al variare degli scenari meteorologici.



**Figura 2-9:** Criteri per la valutazione d'impatto odorigeno: 90° percentile del valore di concentrazione di odore calcolato (parte alta) e percentuale di superamento del valore di concentrazione di riferimento ( $C=5 \text{ OU}_E/\text{m}^3$ ) (parte bassa). Risultati relativi al primo scenario meteorologico (Evento 1).

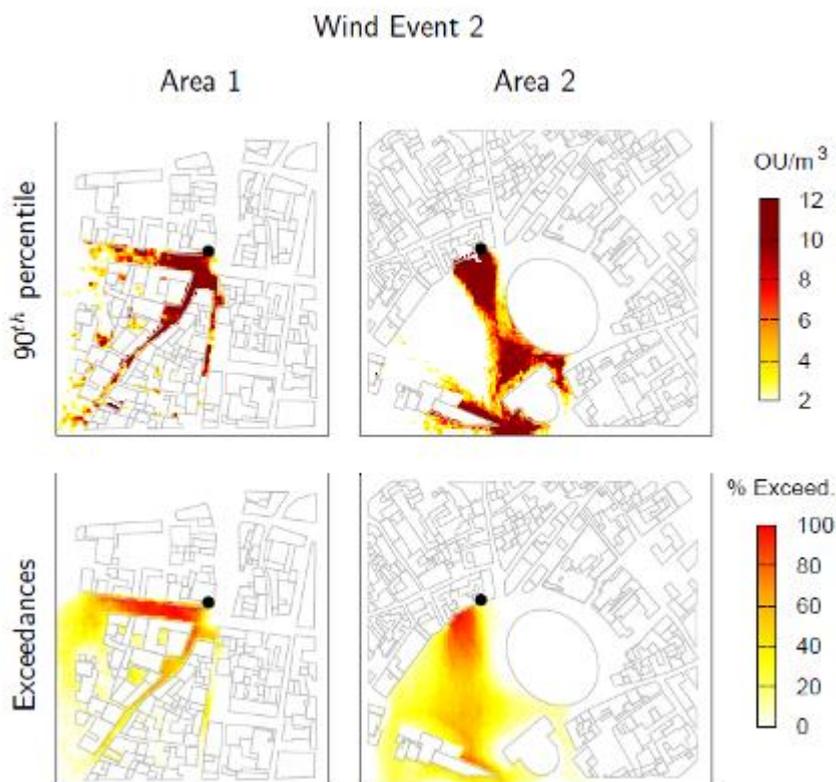
Le immagini riportate nella parte superiore della Figura 2-9 rappresentano gli isocontorni relativi al 90° percentile delle concentrazioni di odore, mentre nella parte inferiore gli isocontorni rappresentano le frequenze di superamento del valore di riferimento ( $C > C_{\text{ref}}$ ).

Queste mappe illustrano l'estensione dell'area entro la quale la concentrazione di odore supera per più del 10% del tempo il valore rappresentato, permettendo di identificare le aree in cui un odore distinto può essere percepito in maniera persistente nel tempo.

Il confronto tra gli isocontorni corrispondenti al 90° percentile calcolati per l'Area 1 e l'Area 2 in corrispondenza dello scenario meteorologico 1 (Evento 1) indica che l'emissione produrrà un odore distinto per almeno il 10% del tempo lungo la strada principale nell'Area 1 e nell'area prospiciente l'Arena. Gli

isocontorni della frequenza di superamento indicano che, in queste aree, un odore debole sarà percepibile per più del 50% del tempo.

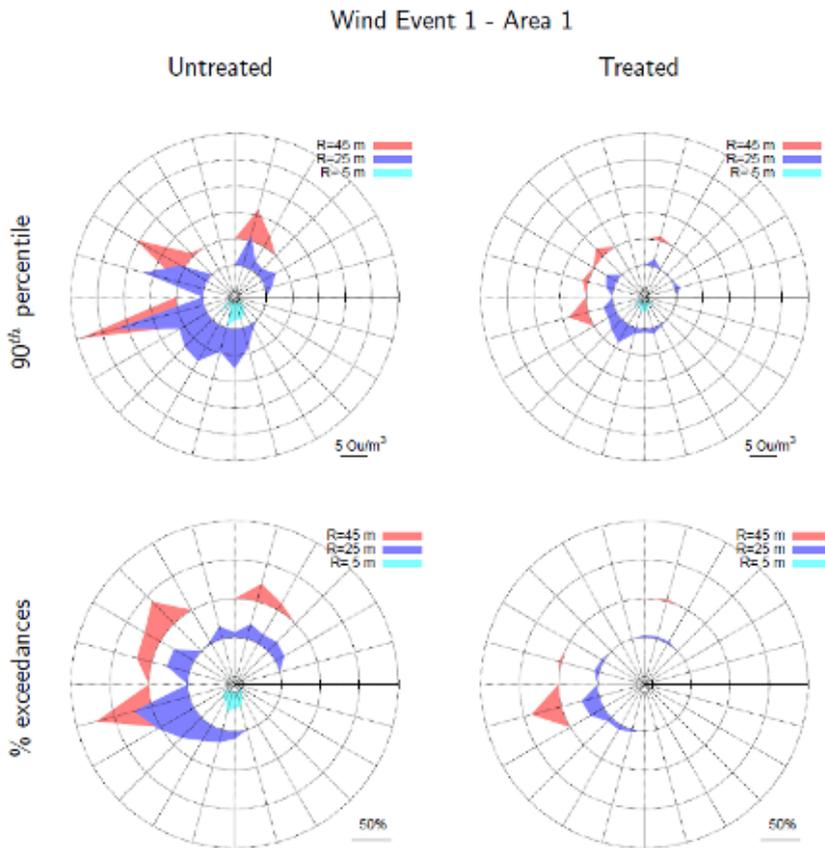
La Figura 2-10 indica che l'impatto odorigeno risulta più significativo nel secondo scenario meteorologico (Evento 2).



**Figura 2-10:** Criteri per la valutazione d'impatto odorigeno: 90° percentile del valore di concentrazione di odore calcolato (parte alta) e percentuale di superamento del valore di concentrazione di riferimento ( $C=5 \text{ ou}_E/\text{m}^3$ ) (parte bassa). Risultati relativi al secondo scenario meteorologico (Evento 2).

In questo caso, odore distinto verrà percepito per più del 10% del tempo lungo le tre strade che confluiscono verso la posizione della sorgente nell'Area 1 ed in una vasta zona limitrofa all'Arena nell'Area 2. Per più del 50% del tempo, odore debole sarà percepibile in aree ancora più vaste.

In Figura 2-11 è riportata una rappresentazione sintetica finale utile per valutare l'impatto odorigeno. Il grafico rappresenta una "rosa dell'odore" ovvero un diagramma polare in cui sono rappresentati (i) il 90° percentile delle concentrazioni di odore (parte alta della Figura) (ii) e la percentuale dei superamenti della soglia di riferimento (parte bassa della Figura), calcolati in corrispondenza di specifiche distanze (5, 25 e 45 m di distanza dal punto emissivo) in corrispondenza di ogni direzione angolare.



**Figura 2-11:** Rosa dell'odore per Area 1 e primo scenario meteorologico (Evento 1).

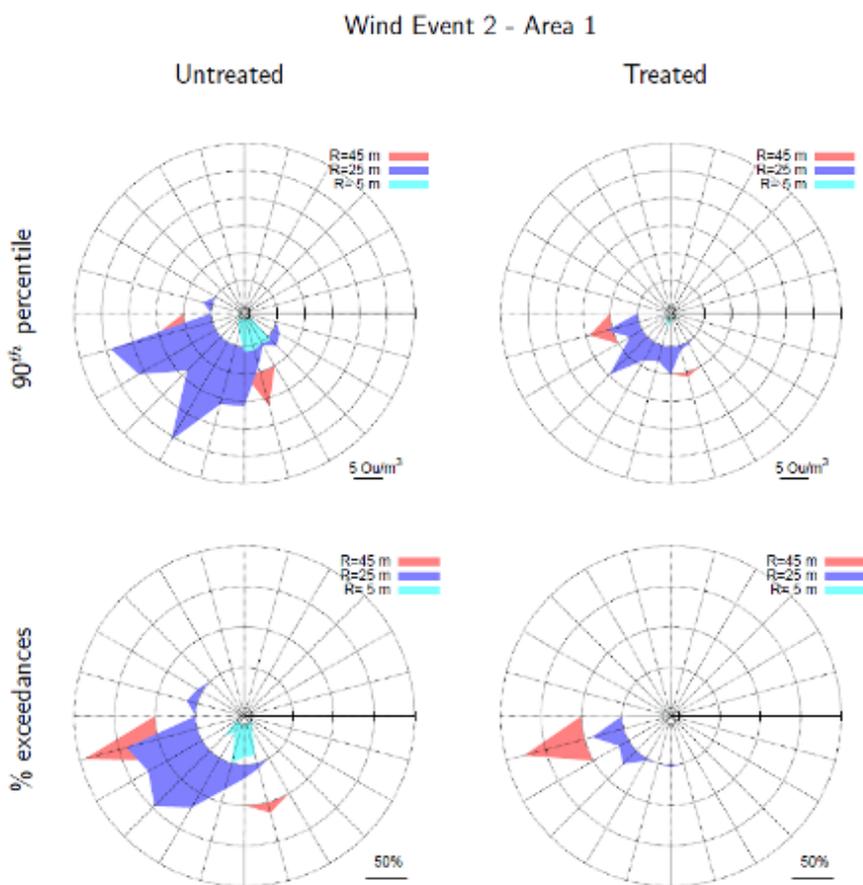
Le colonne destra e sinistra rappresentano, rispettivamente, l'impatto dell'emissione non trattata (emissione di riferimento) e l'impatto dell'emissione trattata (emissione a camino valutata con sistema di abbattimento a carboni attivi funzionante). Nell'angolo in basso a destra di ogni grafico polare è

rappresentata la scala di riferimento per la coordinata radiale (concentrazione di odore o % di superamento).

Analizzando l'impatto della sorgente non trattata e trattata nel primo scenario meteorologico (Figura 2-11 , in alto), si vede che nell'Area 1 il picco di odore viene prodotto in direzione Ovest-Sud-Ovest (O-S-O) e le concentrazioni possono essere pari a  $20 \text{ ou}_E/\text{m}^3$  anche a distanze di 25 e 45 m dalla sorgente S1. La frequenza di superamento della soglia di riferimento (parte bassa della Figura 2-11) è superiore al 60% a distanza di 25 m e 45 m dalla sorgente lungo la direzione O-S-O.

Quando il sistema di abbattimento è attivo (colonna di destra), l'impatto odorigeno raggiunge valori inferiori a  $5 \text{ ou}_E/\text{m}^3$  qualunque sia la distanza e la direzione angolare e il valore di concentrazione di riferimento è superato al massimo per il 5% del tempo.

In Figura 2-12 è riportato l'impatto della sorgente S1 non trattata e trattata nel secondo scenario meteorologico. In questo caso il picco di odore viene registrato nella direzione Sud-Ovest (S-O) con concentrazioni di odore pari a  $40 \text{ ou}_E/\text{m}^3$  a 25 m dalla sorgente emissiva. La frequenza di superamento del valore di riferimento è pari al 100% a distanza di 25 m in direzione S-O e al 100% a distanza di 45 m in direzione O-S-O.



**Figura 2-12:** Rosa dell'odore per Area 1 e secondo scenario meteorologico (Evento 2).

Questi dati indicano la presenza di odore più intenso e persistente nel caso di variazione notevole dell'intensità del vento e direzione stabile (scenario 2). L'impatto odorigeno risulta ovviamente ridotto nel caso di presenza del sistema di abbattimento (colonna a destra), con la percezione di odore distinto per meno del 10% del tempo a 25 m dalla sorgente in direzione S-O. A 45 m dalla sorgente in direzione O-S-O, per il 60% del tempo risulta ancora percepibile un odore debole.

La situazione diventa ancora più critica se la sorgente è posizionata nell'Area 2 (vedi Figura 2-13 in alto). Nel primo scenario meteorologico, il picco di odore

viene prodotto in direzione S-O, con concentrazioni fino a  $40 \text{ ou}_E/\text{m}^3$  a distanze di 25 e 45 m dalla sorgente S2. Debole odore è percepibile per il 60% e il 75% del tempo a distanze di 25 e 45 m dalla sorgente S2. Il sistema di abbattimento permette di ridurre l'impatto, ma un odore distinto è ancora percepibile per il 90% del tempo. Odore debole può essere percepito per 40% e 50% del tempo a distanza di 25 e 45 m dalla sorgente in direzione S-O.

L'impatto peggiora se si considera il secondo scenario meteorologico (Figura 2-14): in questo caso, l'emissione non trattata genera picchi di concentrazione di odore in direzione S-S-O fino a  $75 \text{ ou}_E/\text{m}^3$  a 25 m di distanza dalla sorgente S2. Odore debole è percepito per il 90% del tempo a 25 e 45 m di distanza dalla sorgente in direzione S-O. Il funzionamento del sistema di abbattimento riduce la concentrazione di picco dell'odore a  $20 \text{ ou}_E/\text{m}^3$  ma un debole odore risulterà ancora percepibile per il 75% e l'80% del tempo in direzione S-O a distanza di 25 e 45 m dalla sorgente S2.

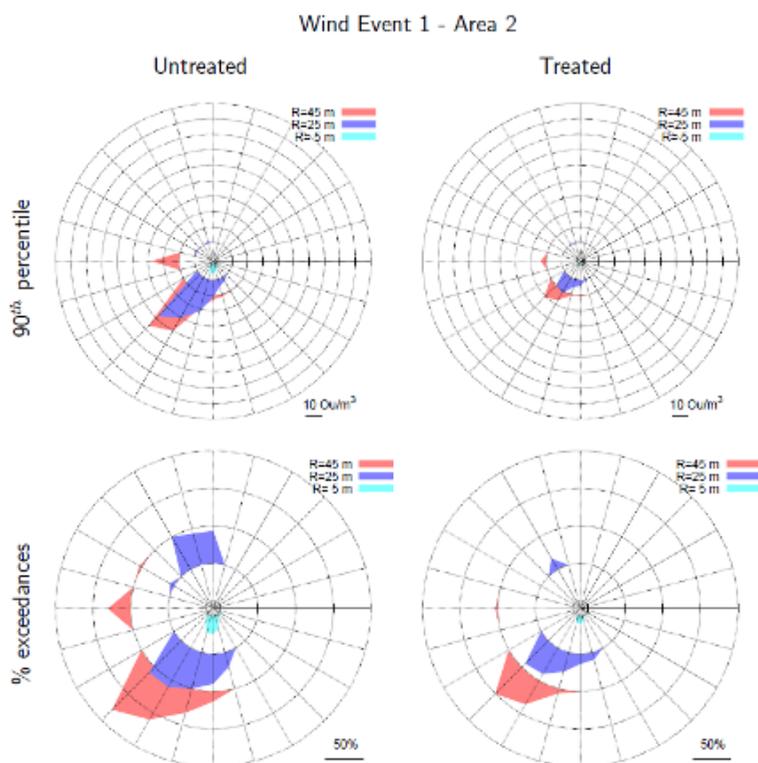


Figura 2-13: Rosa dell'odore per Area 2 e primo scenario meteorologico (Evento 1)

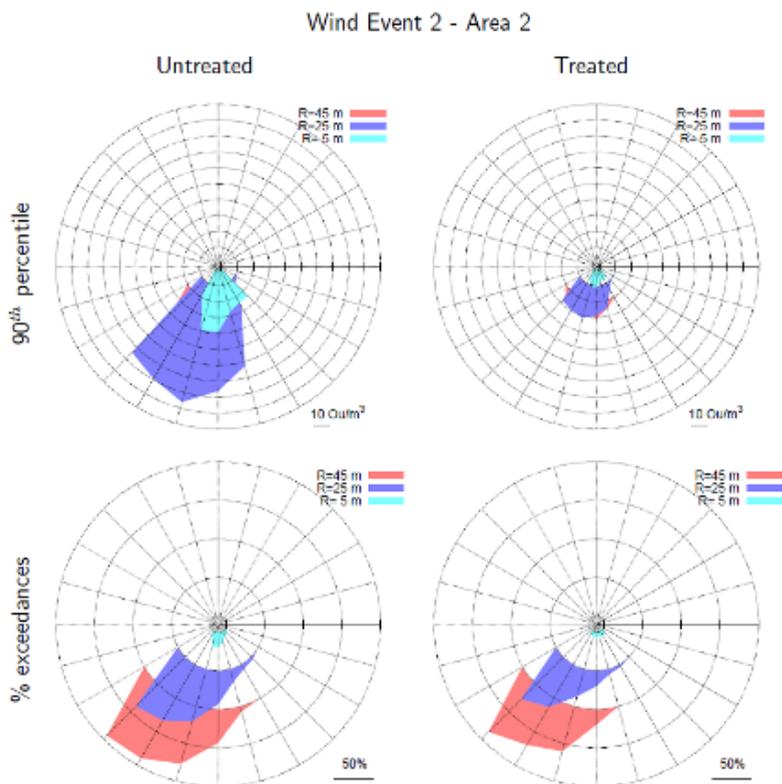


Figura 2-14: Rosa dell'odore per Area 2 e secondo scenario meteorologico (Evento 2)

### 2.4.3 Discussione

In questa sezione è stato proposto e dimostrato l'uso di un modello Euleriano Lagrangiano di tipo "fast response" come strumento idoneo per il calcolo del campo di dispersione degli odori nel breve periodo all'interno di un dominio urbano complesso. La scala spaziale a cui viene riprodotta la struttura del dominio urbano è dell'ordine del metro, sufficiente a descrivere le diverse tipologie di disposizione degli edifici che possono influenzare la dispersione dell'odore.

Il modello “fast response” utilizza algoritmi semplificati per risolvere il dettaglio del campo di vento e di turbolenza all'interno del dominio, permettendo di simulare con sufficiente accuratezza ma con costi computazionali accettabili l'evoluzione dinamica del campo di vento.

La simulazione della dispersione dell'odore basata su tecnica Lagrangiana permette di tracciare fedelmente la dispersione all'interno del campo di vento locale e tempo-dipendente senza significativo aggravio del costo computazionale. Il post-processing dei dati di tracciamento Lagrangiano permette di ricostruire un campo Euleriano di dispersione dell'odore da cui è possibile valutare la ricaduta.

Il costo computazionale del metodo utilizzato è sostanzialmente determinato da tre fattori: (i) la dimensione del dominio computazionale e (ii) la durata del periodo di simulazione, che determinano gli oneri necessari per la ricostruzione del campo di vento spazio e tempo dipendente, e (iii) l'accuratezza con cui, nella fase di elaborazione del campo Euleriano di concentrazione dell'odore, è necessario identificare un valore minimo di concentrazione di riferimento. Quest'ultimo dato determina infatti il costo dell'algoritmo Lagrangiano che deve parcellizzare l'emissione in tante più particelle discrete quanto più basso è il livello minimo di concentrazione che deve essere ricostruito.

Nell'applicazione dimostrativa presentata in questa tesi, l'estensione del dominio computazionale è dell'ordine dei 500 metri (con passo griglia dell'ordine del metro) e l'orizzonte temporale simulato è di 15 minuti (risoluzione pari al minuto per la ricostruzione della dinamica del campo di vento). Il tracciamento di un milione di particelle Lagrangiane (con passo di integrazione di 0.1 sec) ha permesso di ricostruire il campo di concentrazione Euleriano di odore su griglia 2m x 2 m utilizzando un tempo di media pari a 30 secondi per risolvere valori di concentrazione inferiore dell'ordine di 1 ou<sub>E</sub>/m<sup>3</sup>.

Le simulazioni sono state realizzate utilizzando un laptop (8Gb RAM, 2.2Ghz CPU i7 Core) con tempi di calcolo dell'ordine di una settimana per la simulazione dell'impatto nelle due aree di studio e per i due diversi scenari meteorologici. Non si intravedono quindi sostanziali difficoltà per l'utilizzo di questo tipo di modelli su più larga scala o per produrre valutazioni di impatto su orizzonte temporale più esteso.

---

La possibilità di lavorare con tempi di media ridotti per il calcolo della concentrazione dell'odore ma su orizzonti temporali molto più brevi del periodo annuo (periodo di riferimento per il calcolo delle statistiche attualmente utilizzate per l'impatto dell'odore) ci ha permesso di elaborare due criteri, alternativi e complementari, utili per la valutazione dell'impatto odorigeno.

Il primo criterio, basato sulla specifica di una frequenza di superamenti, permette di caratterizzare la zona dell'impatto in funzione del numero di superamenti tollerati. Il valore di concentrazione estratto in corrispondenza alla frequenza di superamento scelta permette di valutare la criticità del superamento, ovvero quanto acuta è l'esposizione.

Il secondo criterio, basato sulla specifica di una soglia di concentrazione di odore, permette di valutare il numero di superamenti di quella soglia e di delimitare le zone in cui la frequenza del superamento potrebbe diventare abbastanza elevata da indicare una molestia persistente (esposizione cronica) anche in presenza di concentrazione di odore non particolarmente elevata.

Utilizzando il modello numerico proposto e i criteri individuati per la valutazione dell'impatto, è stato possibile mettere a confronto l'impatto associato ad una stessa sorgente localizzata in due diverse aree urbane e di valutare l'effetto delle condizioni meteo sull'impatto odorigeno prodotto.

I risultati ottenuti in forma di mappe o di rosa di odore permettono di disporre di strumenti quantitativi e obiettivi (in quanto ricavati in modo deterministico), che consentono di valutare in modo comparativo l'effetto di decisioni alternative, come per esempio quella di stabilire dove sia meno rischioso, in termini di potenziale impatto olfattivo prodotto, autorizzare l'apertura del fast food nella città di Verona.

## 3 Ricerca di sorgenti di odore in area urbana

### 3.1 Motivazione

In questo Capitolo viene affrontato il problema della localizzazione di una sorgente di odore all'interno di un dominio urbano. La localizzazione della sorgente è realizzata sulla base del campionamento intermittente e discontinuo di odore da parte di un sensore che è in grado di muoversi in modo autonomo all'interno del dominio di ricerca.

L'interesse è stato focalizzato sull'implementazione di una strategia ottimale per guidare il movimento del dispositivo su cui è installato il sensore, finalizzata a permettere la localizzazione della sorgente con tempi di ricerca il più possibile contenuti.

Il problema della localizzazione di una sorgente di emissione è di notevole interesse in caso di rilasci accidentali di sostanze tossiche, esplosive o pericolose: in questi campi vengono già utilizzati sistemi mobili equipaggiati con sensori chimici specifici in grado di muoversi autonomamente fino a localizzare l'obiettivo.

Anche in natura esistono insetti e specie animali in grado utilizzare i loro sensori per localizzare una sorgente: i cani sono in grado di seguire la traccia di odore rilasciata da una preda o da persone, localizzandole all'interno di zone molto ampie; le falene riescono a seguire la traccia dei feromoni rilasciati dai propri partner, raggiungendoli anche a distanza di qualche chilometro.

Esiste una vasta letteratura relativa alle diverse strategie di ricerca utilizzate da batteri, insetti, pesci ed altri animali per la localizzazione di nutrienti, partner o prede (Ramakrishnan et al., 2014; Voges et al., 2014; Gardiner and Atena, 2007, Wei et al., 2001). Queste strategie sono principalmente di due tipi:

- Chemotattica, cioè basata sull'utilizzo di un'informazione di tipo quantitativo associata per esempio al valore di concentrazione rilevato dal sensore durante il suo moto di ricerca;

- 
- Infotattica, cioè basata sull'utilizzo di un'informazione di tipo qualitativo, associata per esempio alla rilevazione della presenza (o assenza) di segnale da parte del sensore durante la ricerca.

Entrambe le strategie sono state utilizzate come punto di partenza per lo sviluppo di sistemi artificiali mobili (singole unità o gruppo di sensori inter-agenti) in grado di localizzare una o più sorgenti a partire dalla rilevazione quantitativa o qualitativa di sensori chimici (Pang and Farrell, 2007; de Croon et al., 2013; Spears et al., 2009; Marques et al., 2006).

Metodi di ricerca della sorgente basati sulla chemotassi sono stati utilizzati nello sviluppo di robot eventualmente dotati di sensori multipli (Grasso et al., 2000), in grado di risalire il pennacchio di odore emulando il comportamento delle falene nel seguire le tracce di feromoni (Kuwana et al., 1999).

Gli algoritmi di ricerca di tipo chemotattico utilizzano il gradiente di concentrazione locale della sostanza per indirizzare il sensore mobile verso le posizioni nel dominio più vicine alla sorgente, dove concentrazione e gradiente sono massimi.

Questi algoritmi sono efficaci quando i valori di concentrazione campionati dal sensore sono sufficientemente elevati da risultare misurabili e sufficientemente stabili durante il tempo in cui avviene il campionamento per permettere di ricostruire una mappa di concentrazione rispetto alla quale valutare il gradiente del campo. Il tempo di campionamento del sensore deve quindi essere molto ridotto rispetto alla variabilità del campo esterno.

Il metodo chemotattico richiede la realizzazione di due misure di concentrazione distinte per la stima del gradiente del campo che possono essere ottenute per mezzo della misurazione della concentrazione in un unico punto in due istanti di tempo differenti (tecnica tipicamente utilizzata da sensori singoli), oppure per mezzo della misura contemporanea della concentrazione in punti diversi del campo (tecnica utilizzata nel caso della presenza contemporanea di due o più sensori di ricerca).

La ricerca chemotattica prevede due fasi principali:

- l'identificazione del pennacchio di odore, durante la quale il sensore mobile deve essere in grado di intercettare il tracciante attraverso una serie di movimenti controllati, come per esempio un moto a spirale di Archimede o movimenti a zig-zag;

- la risalita del pennacchio di odore, durante la quale il sensore ricostruendo con campionamenti in punti successivi il gradiente locale di concentrazione, identifica e segue la direzione di provenienza del pennacchio fino a raggiungere la sorgente che lo ha prodotto.

Nelle zone del dominio più lontane dalla sorgente dove la concentrazione della specie tracciante è bassa perché il trasporto della specie diventa intermittente e discontinuo, gli algoritmi di ricerca chemotattica non si dimostrano particolarmente efficaci (Berg, 1993). In questi casi, la ricerca di tipo infotattico può essere molto più efficace.

La strategia di ricerca infotattica per la localizzazione di sorgenti è stata introdotta da Vergassola et al. (2007). In particolare gli autori, oltre a presentare per la prima volta il metodo di ricerca infotattica, hanno valutato l'efficacia di diversi algoritmi utilizzando come campo di ricerca dati sperimentali relativi al trasporto di un tracciante in flusso turbolento.

In seguito Moraud et al. (2010) hanno valutato le prestazioni del metodo di ricerca infotattico analizzando la caratteristica delle traiettorie di ricerca ottenute sia attraverso la simulazione numerica che attraverso l'utilizzo di un robot mobile.

Più di recente, Karpas e Schneidman (2014) hanno esteso la ricerca infotattica ad un gruppo di sensori coordinati, cioè in grado di scambiarsi informazioni, in cui ogni agente è in grado non solo di massimizzare l'utilità dell'informazione singolarmente acquisita ma anche di condividerle con gli altri sensori al fine di minimizzare i tempi di ricerca.

L'infotassi si basa sul progressivo rafforzamento del livello di confidenza esistente rispetto alla possibile posizione della sorgente, grazie all'esame della serie delle informazioni acquisite dal sensore durante il suo percorso di ricerca. Le informazioni relative alla rilevazione/non rilevazione del tracciante contenuto nel pennacchio di odore vengono utilizzate per costruire e aggiornare con continuità una funzione di densità di probabilità di trovare la sorgente in una determinata posizione del dominio. Questa funzione si ricava a partire da un modello di trasporto del tracciante e dalla serie dei rilevamenti acquisiti dal sensore nel tempo.

Il sensore localizzato in posizione  $\mathbf{r}$  è in grado di effettuare un rilevamento in un periodo di tempo  $\delta t$  che può avere esito negativo ("void") oppure positivo

---

("hit"). Sia che il sensore registri un rilevamento o che non lo registri, esso accumula un'informazione utile ad aggiornare la funzione di densità di probabilità relativa alla posizione della sorgente. Sulla base di questa distribuzione di probabilità, il sensore può decidere se spostarsi in una posizione adiacente o rimanere fermo, valutando quale tra queste azioni gli permetterà di incrementare di più l'informazione relativa alla posizione della sorgente. Questo procedimento viene seguito fino alla localizzazione della sorgente.

Vengono di seguito descritti i principi su cui si basa l'algoritmo di ricerca infotattico sviluppato in questo lavoro. Le prestazioni dell'algoritmo di ricerca sono state poi valutate considerando la capacità di localizzare una sorgente di odore in domini semplici e in domini urbani complessi.

## 3.2 Algoritmo di ricerca

### 3.2.1 Modello di trasporto

L'infotassi è un algoritmo di ricerca utilizzato per localizzare una sorgente sulla base dell'informazione associata al segnale emesso dalla sorgente e captato da un sensore. Nel nostro caso la sorgente è una sorgente odorigena e il segnale è il campionamento intermittente e discontinuo della presenza/assenza di odore nel dominio di studio.

La ricerca infotattica è attualmente utilizzata a livello industriale per l'identificazione di sorgenti di rilascio di sostanze inquinanti in atmosfera, di petrolio in mare o più in generale di traccianti inerti in ambienti confinati (Ferri et al., 2009).

In tutte queste applicazioni, la dispersione delle sostanze emesse avviene in un fluido in moto turbolento che per natura tende a disperdere ed a diluire le concentrazioni nel tempo e nello spazio in modo più o meno casuale.

Se definiamo un sistema cartesiano di assi  $x$ ,  $y$  e  $z$  all'interno del dominio di studio tridimensionale, possiamo identificare univocamente la posizione del sensore tramite un vettore  $\mathbf{r}(x, y, z, t)$  che collega l'origine del sistema cartesiano alla posizione del sensore. In modo analogo, la posizione della sorgente emissiva può essere identificata dal vettore  $\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0)$ , indipendente dal

tempo se la sorgente è fissa. L'emissione della sostanza tracciante (specie chimica o odore) può essere assimilata all'emissione di una serie di particelle discrete, ad ognuna delle quali è associata una porzione del flusso emesso. Queste particelle danno origine a "patch" di odore, zone locali in cui la concentrazione di specie tracciante risulta percepibile quando la turbolenza non è sufficientemente intensa da diluire la concentrazione al di sotto del limite di rilevabilità del sensore.

La presenza/assenza di tracciante in ogni posizione del dominio dipende dunque dalle caratteristiche di trasporto e dispersione della corrente fluida e dalla posizione della sorgente. Il numero di rilevamenti che un sensore è in grado di registrare muovendosi all'interno di questo campo dipende dalla sua posizione attuale, dalla posizione e dall'intensità della sorgente, dalle caratteristiche del campo di moto e dalla persistenza della sostanza tracciante nell'ambiente. Il numero di rilevamenti è una variabile casuale descritta dalla funzione  $R(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0)$ , che rappresenta il numero di rilevamenti attesi.

Per modellare il fenomeno che controlla il trasporto delle particelle traccianti possiamo utilizzare l'equazione di convezione-diffusione-reazione con termine sorgente S:

$$0 = VVC(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) + D\Delta C(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) - \frac{1}{\tau}C(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) + S\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (3.1)$$

dove:

- $V$ , è velocità istantanea del flusso [m/s];
- $D$ , è coefficiente di diffusione molecolare [m<sup>2</sup>/s];
- $\tau$ , tempo di vita delle particelle, legato alla loro reattività e capacità di trasformarsi in altre sostanze [s];
- $S$ , è il rateo emissivo;
- $\delta$ , è il delta di Kroneker;
- $\mathbf{r}(x,y,z,t)$ , è posizione del sensore;
- $\mathbf{r}_0(x_0,y_0,z_0)$ , è posizione della sorgente.

La soluzione dell'equazione (3.1) nel caso bidimensionale (moto nel piano  $x, y$ ), per sorgente stazionaria in campo di moto uniforme e costante (Vergassola et al., 2007), è pari a:

---


$$C(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) = \frac{S}{2\pi D} K_0 e^{\frac{-(x-x_0)V}{2D}} e^{\frac{-|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}{\lambda}} \quad (3.2)$$

dove:

- $C(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0)$ , concentrazione di particelle in posizione  $\mathbf{r}$  quando la sorgente è localizzata in  $\mathbf{r}_0$ ;
- $K_0$ , funzione di Bessel di ordine zero;
- $\lambda$ , lunghezza di correlazione, pari a:

$$\lambda = \sqrt{\frac{D\tau}{1 + V^2\tau/4D}} \quad (3.3)$$

che rappresenta la distanza media percorsa dalle particelle prima di dissolversi. Per il caso tridimensionale invece la soluzione dell'eq. (3.1) diventa:

$$C(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) = \frac{S}{4\pi D|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} e^{\frac{-(x-x_0)V}{2D}} e^{\frac{-|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}{\lambda}} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Probabilità di localizzazione della sorgente

Se consideriamo un volume di campionamento sferico intorno al sensore (di raggio  $a$  [m]), possiamo legare il tasso medio di rilevamenti al valore di concentrazione locale utilizzando l'espressione di Smoluchowski:

$$R(\mathbf{r}) = 4\pi DC(\mathbf{r}) \quad (3.5)$$

Sostituendo nell'espressione precedente (Eq. 3.5) le equazioni che si riferiscono al calcolo della concentrazione in posizione  $\mathbf{r}$  (Eq. 3.2 e 3.4) è possibile calcolare il tasso di rilevamenti ("hits") stimato per ogni possibile posizione  $\mathbf{r}_0$  della sorgente.

Nel caso bidimensionale otteniamo:

$$R(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) = \frac{S}{\log\left(\frac{\lambda}{a}\right)} e^{\frac{-(x-x_0)V}{2D}} K_0 e^{\frac{-|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}{\lambda}} \quad (3.6)$$

mentre nel caso tridimensionale avremo:

$$R(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0) = \frac{aS}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|} e^{\frac{-(x-x_0)V}{2D}} e^{\frac{-|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}{\lambda}} \quad (3.7)$$

Il tasso di rilevamenti permette di calcolare la funzione di probabilità  $P_t(\mathbf{r}_0)$  di trovare la sorgente in posizione  $\mathbf{r}_0$  al tempo di ricerca  $t$ . Utilizzando l'analisi d'inferenza bayesiana (in cui le probabilità non sono interpretate come frequenze ma piuttosto come livelli di fiducia nel verificarsi di un dato evento), la funzione del tasso di rilevamenti  $R(\mathbf{r}|\mathbf{r}_0)$  può essere utilizzata per definire una funzione che descrive il livello di fiducia del sensore mobile riguardo alla conoscenza della corretta posizione della sorgente. Questa funzione è una quantità dipendente dal tempo di ricerca che può essere aggiornata ad ogni passo temporale sulla base della traccia di rilevamenti  $T_t$  aggiornata fino all'istante  $t$ . In Appendice è descritto in dettaglio il metodo per ottenere la mappa di probabilità della sorgente a partire dalla registrazione dei rilevamenti acquisiti dal sensore in movimento.

Se assumiamo l'indipendenza tra rilevamenti consecutivi realizzabili lungo una traiettoria, il processo stocastico che descrive il numero di rilevamenti è un processo di Poisson, descritto dalla funzione di probabilità  $P_t(\mathbf{r}_0)$ , costruita al tempo  $t$  a fronte della rilevazione di una traccia  $T_t$ :

$$P_t(\mathbf{r}_0) = \frac{L_{r_0}(T_t)}{\int L_x(T_t)dx} = \frac{e^{-\int_0^t R(\mathbf{r}(s)|\mathbf{r}_0)ds} \prod_{i=1}^H R(\mathbf{r}(t_i)|\mathbf{r}_0)}{e^{-\int_0^t R(\mathbf{r}(s)|\mathbf{x})ds} \prod_{i=1}^H R(\mathbf{r}(t_i)|\mathbf{x}) dx} \quad (3.8)$$

dove:

- $H$ , numero di rilevamenti che il sensore ha registrato;
- $t_i$ , istanti di tempo dei rilevamenti;
- $L_{r_0}$ , funzione di verosimiglianza della traccia  $T_t$  condizionata alla presenza della sorgente in  $\mathbf{r}_0$ .

---

Se il processo di rilevamento è Poissoniano, è possibile aggiornare la funzione di probabilità senza considerare tutta la storia degli incontri:

$$P_{t+\delta t}(\mathbf{r}_0) = \frac{P_t(\mathbf{r}_0) e^{-R(\mathbf{r}(t+\delta t)|\mathbf{r}_0)\delta t} R^\eta(\mathbf{r}(t+\delta t)|\mathbf{r}_0)}{Z_{t+\delta t}} \quad (3.9)$$

dove:

- $\eta$ , numero di rilevamenti del sensore durante l'intervallo di tempo  $\delta t$ ;
- $Z_{t+\delta t}$ , costante di normalizzazione.

Ad ogni passo temporale possiamo quindi ottenere nuove informazioni che permettono di aggiornare la funzione di probabilità e scegliere la migliore direzione per il movimento del sensore. La scelta della migliore direzione viene fatta valutando il valore dell'entropia di Shannon, definita come:

$$S = - \sum p(\mathbf{r}_0) \log(\mathbf{r}_0) \quad (3.10)$$

dove  $\mathbf{r}_0$  è la variabile random che rappresenta la posizione (incognita) della sorgente e  $p(\mathbf{r}_0)$  la probabilità che la sorgente sia effettivamente nella posizione  $\mathbf{r}_0$ . Questa quantità rappresenta l'"incertezza" sulla posizione della sorgente; più grande è  $S$ , più estesa sarà l'area entro cui la sorgente potrebbe essere posizionata.

All'inizio del processo di ricerca, l'incertezza sulla posizione della sorgente è massima perché non ci sono informazioni disponibili: la funzione di probabilità  $P_t(\mathbf{r}_0)$  è costante ed uniforme (uguale probabilità che la sorgente possa essere posizionata in un punto qualsiasi del dominio) e l'entropia è massima.

Quando il sensore inizia a campionare l'odore, vengono raccolte informazioni aggiuntive rispetto al posizionamento potenziale della sorgente ed è possibile aggiornare la mappa di probabilità attribuendo valori più elevati alla probabilità di trovare la sorgente in posizioni specifiche del dominio. L'entropia di Shannon si modifica nel tempo, raggiungendo valori progressivamente minori man mano che l'area del dominio in cui esiste una probabilità non nulla di trovare la sorgente si riduce. L'entropia raggiunge valori prossimi allo zero quando la sorgente viene localizzata.

La mappa di probabilità utilizzata in questo lavoro per identificare la migliore traiettoria di ricerca si basa su un modello di trasporto a particelle che permette di stimare il valore del tasso medio di incontri in condizioni semplificate (rateo emissivo noto, velocità del vento uniforme e costante). Il modello è ovviamente una rappresentazione un po' cruda del reale meccanismo di trasporto, dispersione e trasformazione che controlla la dispersione dell'odore in contesti reali. Nonostante questo, la stima approssimata del tasso di rilevamenti atteso è sufficiente per guidare il sensore mobile nella giusta direzione.

Ad ogni istante successivo il sensore può definire il suo movimento bilanciando due esigenze complementari: utilizzare solo l'informazione di cui già dispone per identificare in miglior punto in cui muoversi ("exploitation") o fare una stima rispetto alla possibilità di incrementare il livello di informazione disponibile a seguito dello spostamento in posizioni adiacenti ("exploration"). L'effetto combinato di questi due criteri di valutazione permette di valutare la variazione di entropia atteso a fronte di uno spostamento verso una nuova posizione  $\mathbf{r}'$  del dominio, sulla base della quale identificare la posizione ottima. Se il sensore si trova in posizione  $\mathbf{r}$  al tempo  $t$  con distribuzione di probabilità  $P_t(\mathbf{r}_0)$  ed entropia  $S$ , per ogni posizione  $\mathbf{r}'$  adiacente alla sua, (4 posizioni nel caso 2D), la variazione attesa di entropia viene valutata come:

$$\Delta S(\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}') = -P_t(\mathbf{r}')S + (1 - P_t(\mathbf{r}')) \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \rho_k(\mathbf{r}') \Delta S_k \right] \quad (3.11)$$

dove il primo termine a destra descrive la probabilità di trovare la sorgente in  $\mathbf{r}'$  sulla base delle sole informazioni già raccolte, mentre il secondo termine rappresenta la variazione di entropia attesa sulla base della stima fatta rispetto all'acquisizione di valide informazioni nella nuova posizione potenziale  $\mathbf{r}'$ . Le quantità che consentono di valutare il secondo termine possono essere calcolate come segue. Considerando un modello Poissoniano per rilevamenti successivi (indipendenti tra loro), possiamo definire la probabilità di campionare  $k$  rilevamenti di odore durante il tempo di campionamento  $\delta t$  come:

$$\rho_k = h_k \exp(-h) / k! \quad (3.12)$$

dove  $h$  è il valore atteso del numero medio di rilevamenti dato da:

---

$$h(\mathbf{r}') = \delta t \int P_t(\mathbf{r}_0) R(\mathbf{r}'|\mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 \quad (3.13)$$

Il termine  $\Delta S_k$  rappresenta invece la riduzione attesa del valore di entropia nel caso di  $k$  rilevamenti di odore nella nuova posizione potenziale ( $\mathbf{r}'$ ).

### 3.3 Risultati

Sono state effettuate una serie di simulazioni numeriche per generare delle mappe di dispersione di odore con le quali testare le prestazioni dell'algoritmo di ricerca infotattico.

Il modello utilizzato per simulazione della dispersione dell'odore è QUIC (Quic Urban & Industrial Complex model, Los Alamos Laboratories), modello lagrangiano a particelle che permette di valutare l'evoluzione di pennacchi di odore trasportati da un flusso turbolento all'interno di domini più o meno complessi (vedi Capitolo 2). In particolare, sono stati ricostruiti campi di dispersione relativi a un pennacchio stazionario emesso in tre diversi domini di riferimento:

- dominio semplice, privo di edifici;
- dominio con edificio isolato;
- dominio con schiera di edifici.

Vengono di seguito presentati e discussi i risultati relativi ad ognuno dei casi esaminati.

#### 3.3.1 Dominio semplice

L'algoritmo di ricerca è stato inizialmente testato considerando il campo di dispersione di odore generato in un dominio semplice. Il campo di concentrazione di odore è stato tracciato considerando la dispersione di una emissione stazionaria all'interno di un dominio di dimensioni 90m x 30m x 40 m (in un sistema di riferimento cartesiano  $x, y, z$ ) privo di edifici. L'intensità del

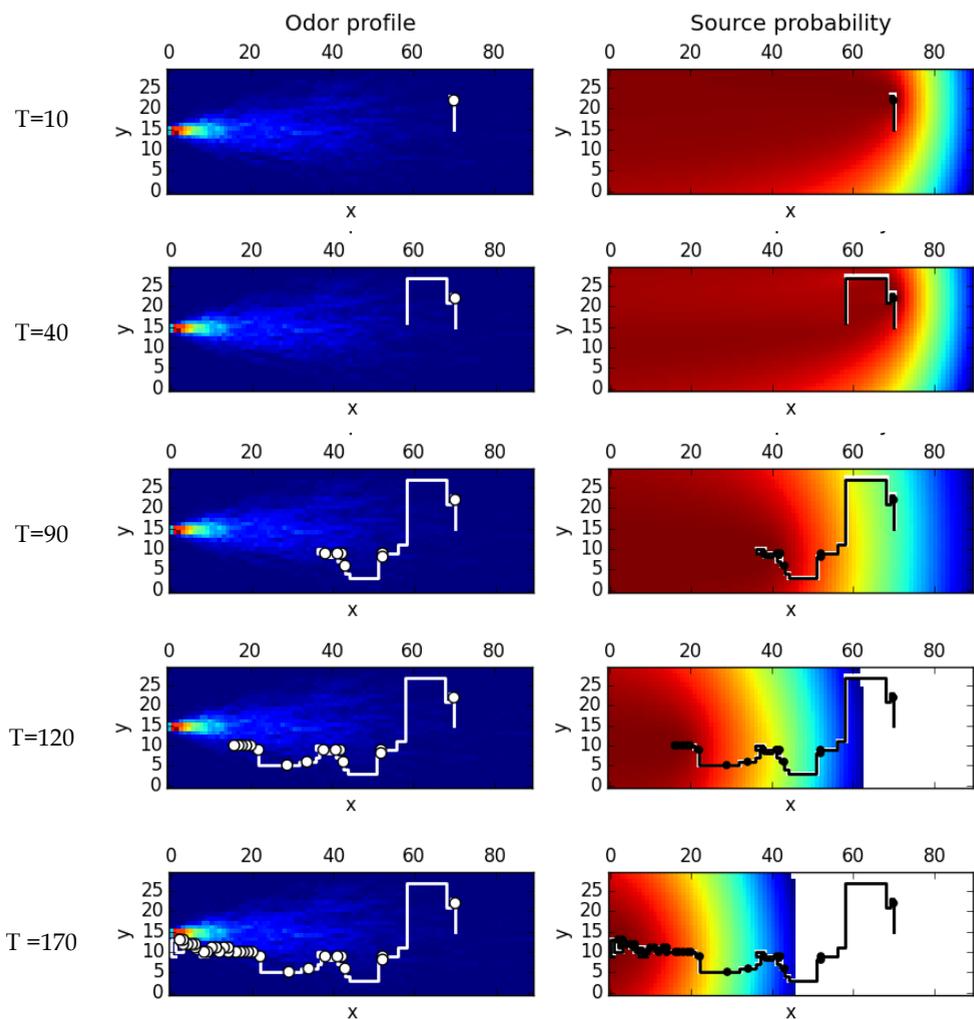
vento è considerata costante e pari a 4 m/s all'altezza di riferimento di 10 m, mentre si utilizza un profilo logaritmico per ricostruire la velocità a diverse altezze  $z$ . Il vento soffia in direzione  $x$ . La sorgente odorigena è posizionata in  $r_0=(0, 15, 1.5)$ . Il rateo emissivo considerato è pari a 200  $ou_E/s$ . La posizione iniziale del sensore è fissata in  $r=(70, 15, 1.5)$  e il sensore si muove nel piano orizzontale ad un'altezza di 1.5 m e corrispondente all'altezza della sorgente.

Lo sviluppo del pennacchio di odore è stato tracciato per un tempo sufficiente a ottenerne il completo sviluppo all'interno del dominio.

In Figura 3-1 sono riportate alcune istantanee relative alle fasi della ricerca eseguita dal sensore. Le diverse immagini corrispondono a diversi istanti temporali. Nella parte sinistra della Figura è rappresentato il campo di concentrazione: i colori rappresentano concentrazioni di odore variabili tra 0 (blu) e 100  $ou_E/m^3$  (rosso). La linea bianca rappresenta lo sviluppo della traiettoria del sensore fino a quel momento. Nella parte destra della Figura è invece rappresentata la mappa che descrive la distribuzione locale della probabilità di trovare la sorgente nelle varie posizioni,  $r_0(x_0, y_0)$ . In questo caso il valore degli isocontorni è dinamicamente ri-assegnato in modo da coprire l'intervallo di variazione min-max della probabilità di localizzazione della sorgente. Lo sviluppo della traiettoria del sensore è riproposto anche su questi contorni utilizzando una linea nera.

L'analisi delle istantanee successive permette di esaminare l'evoluzione della traccia del sensore che campiona, di volta in volta, solo il valore di concentrazione di odore corrispondente alla sua posizione locale: ogni volta che il sensore rileva la presenza di odore (concentrazione locale maggiore della soglia di rilevabilità del sensore), il sensore registra la posizione e l'istante del rilevamento ("hit") che viene indicato con un cerchio sulla traiettoria (in bianco nel grafico a sinistra e in nero in quella a destra).

In corrispondenza di ogni movimento del sensore nel dominio, la mappa della probabilità di trovare la sorgente viene costantemente aggiornata nel tempo: la zona di spazio in cui si concentrano i valori progressivamente più alti di probabilità descrive con precisione crescente l'intorno della posizione in cui è verosimilmente collocata la sorgente.

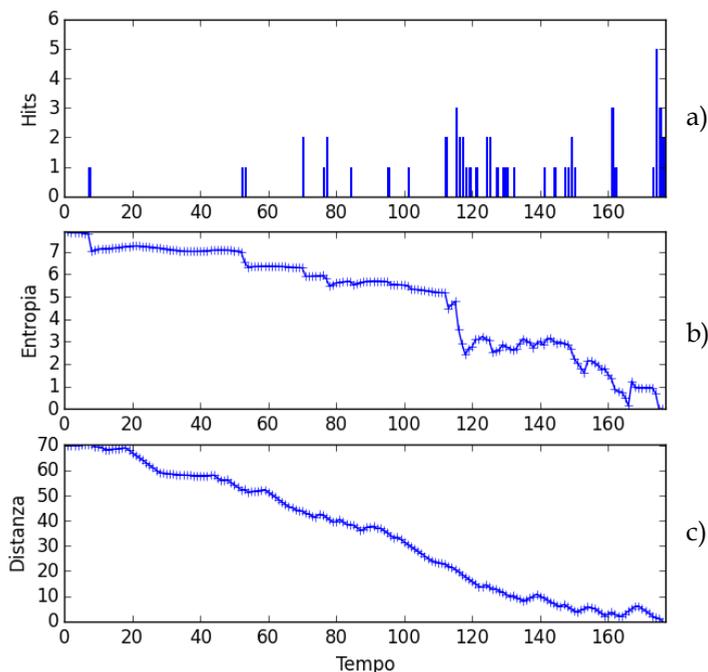


**Figura 3-1:** Campo di concentrazione dell'odore (sinistra) e mappa che descrive la distribuzione locale della probabilità di trovare la sorgente nelle varie posizioni. Gli isocontorni di concentrazione hanno valore variabili nell'intervallo 0 (blu) e 100  $\text{ou}_E/\text{m}^3$  (rosso). Gli isocontorni della mappa di probabilità sono dinamicamente ri-assegnati per coprire l'intervallo di variazione min-max della probabilità di localizzazione della sorgente. Le linee bianca e nera rappresentano lo sviluppo della traiettoria del sensore. I cerchi identificano istanti corrispondenti alla rilevazione di odore.

Dalla Figura 3-1 si nota che, nelle prime fasi della ricerca, il sensore ha poche informazioni riguardo alla posizione della sorgente; il movimento è orientato alla ricerca di ulteriori rilevamenti di concentrazione di odore, con spostamenti laterali (rispetto la direzione del vento) significativi che si estendono a coprire

l'intera ampiezza del dominio. Nella fase successiva in cui la frequenza dei rilevamenti di odore aumenta, il sensore aumenta rapidamente il livello di confidenza per la localizzazione della sorgente e la traiettoria procede in modo più diretto (verso la direzione da cui soffia il vento) verso la zona in cui è posizionata la sorgente. E' importante sottolineare che il sensore, lungo tutto il percorso di ricerca, ha informazione diretta solo sulla presenza/assenza di odore nei punti del dominio che sono stati già visitati e sulla base di questa sola informazione ricostruisce il campo di probabilità (stimato) che la sorgente si trovi in un determinato punto.

Il tempo necessario per ottenere la localizzazione della sorgente calcolato per questa simulazione è pari a 177 unità temporali. In Figura 3-2 è rappresentata l'evoluzione nel tempo di tre quantità che aiutano a descrivere la dinamica della strategia di ricerca. Il Figura 3-2 a) viene rappresentato il numero di rilevamenti di odore campionati in ogni intervallo di ampiezza  $\delta t$  dal sensore. All'inizio della ricerca, quando il sensore si trova in una zona lontana dalla sorgente in cui il valore della concentrazione di odore è basso, i rilevamenti sono pochi e molto discontinui. Avvicinandosi alla sorgente invece, la frequenza e il numero dei rilevamenti di odore aumenta. Il numero e la frequenza dei rilevamenti ha un effetto diretto sulla mappa istantanea di probabilità di localizzazione della sorgente e sul valore di entropia ad essa associata. La Figura 3-2 b) rappresenta infatti l'evoluzione dell'entropia nel tempo: l'andamento del grafico è mediamente decrescente, ma è caratterizzato anche da fasi in cui l'entropia cresce o non cambia molto, questo accade quando il risultato del campionamento indica assenza di odore. Variazioni significative sono invece osservabili quando il numero e/o la frequenza dei campionamenti di odore aumentano. Il valore di entropia raggiunge valori prossimi a zero quando la sorgente è stata localizzata.



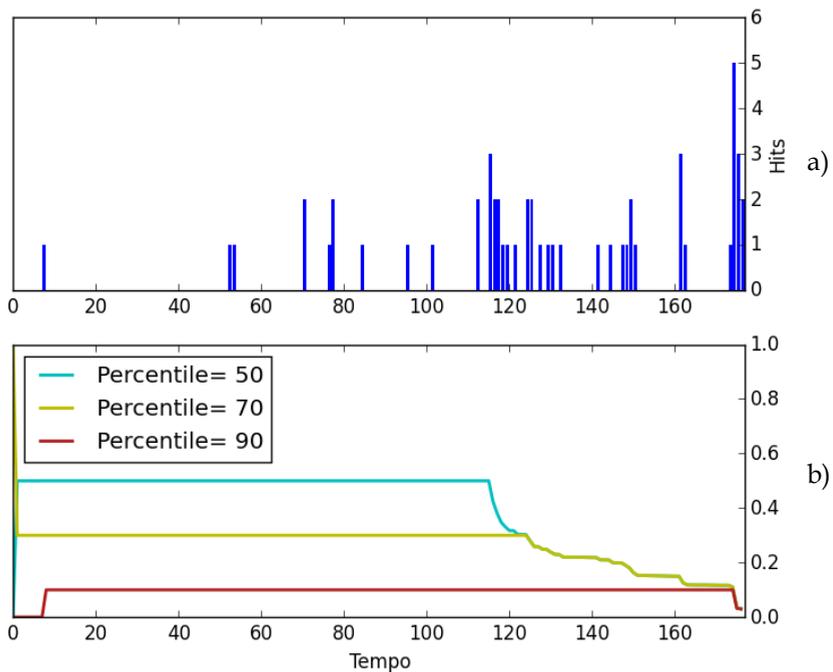
**Figura 3-2:** (a) Frequenza e numero di campionamenti di odore rilevati dal sensore durante il tempo di ricerca; (b) Variazione dell'entropia della mappa di probabilità di localizzazione della sorgente; (c) Variazione della distanza tra sensore e sorgente

La Figura 3-2 c) rappresenta la variazione nel tempo della distanza (calcolata come distanza euclidea) tra sensore e sorgente. Il grafico indica un progressivo avvicinamento del sensore alla sorgente, con una più rapida riduzione della distanza quando viene rilevata la presenza di odore. In queste occasioni, la traiettoria si orienta in modo deciso lungo la direzione di provenienza del vento.

Il numero di campionamenti di odore e la frequenza dei campionamenti realizzati in istanti successivi forniscono informazioni importanti per delimitare con crescente precisione l'area in cui è localizzata la sorgente.

In Figura 3-3 è rappresentata, insieme con il numero e la frequenza dei rilevamenti di odore, la funzione che identifica la variazione nel tempo della frazione di dominio in cui la probabilità di localizzare la sorgente supera un dato valore percentile. Le tre curve rappresentano rispettivamente le frazioni di

dominio corrispondenti al 50° (blu), al 70° (verde) e al 90° (rosso) percentile. Nei primi istanti della ricerca, i valori dei percentili non sono ben definiti perché la distribuzione della probabilità di localizzazione della sorgente è molto appiattita. La variazione dell'area del dominio associata ad ogni percentile indica che la localizzazione della sorgente avviene dapprima attraverso uno spostamento progressivo delle celle in cui è definita una probabilità non nulla di trovare la sorgente. Solo in un secondo momento l'area di questa zona diminuisce di estensione permettendo una localizzazione precisa della sorgente.

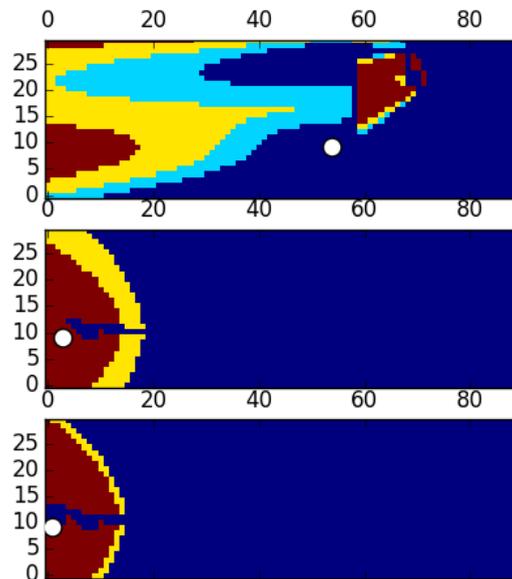


**Figura 3-3:** Quantificazione delle informazioni ricevute dal sensore nel tempo: (a) frequenza e numero di campionamenti di odore rilevati dal sensore durante il tempo di ricerca. (b) variazione nel tempo della frazione di dominio in cui la probabilità di localizzare la sorgente supera un dato valore percentile. Le tre curve rappresentano rispettivamente le frazioni di dominio corrispondenti al 50° (blu), al 70° (verde) e al 90° (rosso) percentile

In Figura 3-4 è riportata la variazione dell'estensione dell'area di possibile localizzazione della sorgente identificata in corrispondenza di tre diversi istanti di ricerca (50, 150 e 170 unità temporali). La posizione del sensore è identificata dal cerchio bianco. Le aree di colore rosso, giallo e azzurro identificano zone del

---

dominio in cui il valore della probabilità di localizzare la sorgente è rispettivamente superiore a 0.5, 0.7 o 0.9.



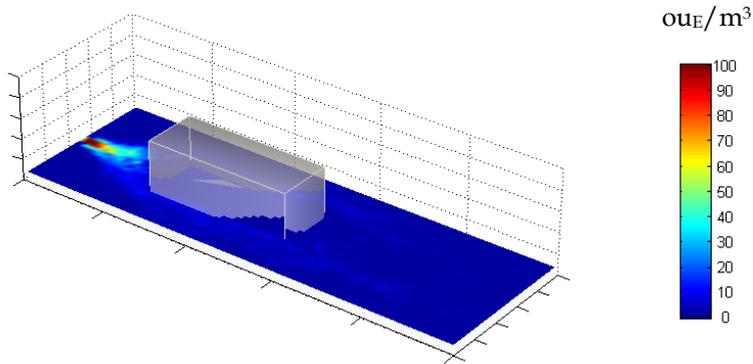
**Figura 3-4:** Evoluzione nel tempo della mappa dei percentili: le zone rossa, gialla e azzurra delimitano le frazioni di area del dominio in cui la probabilità di localizzare la sorgente è superiore a 0.9, 0.7 e 0.5. Gli istanti rappresentati corrispondono a 50, 150 e 170 unità temporali.

Durante le prime fasi della ricerca, l'estensione delle aree non varia e si osserva solo una variazione della forma delle stesse. Con il progredire della ricerca invece, l'estensione delle aree si assottiglia e alcuni quantili diventano indistinguibili per l'effetto della progressiva "concentrazione" della distribuzione di probabilità intorno alla corretta localizzazione della sorgente.

### 3.3.2 Dominio con edificio isolato

Il secondo test di valutazione dell'algoritmo di ricerca è stato fatto considerando la dispersione di un pennacchio di odore in un dominio più complesso in cui è presente un edificio isolato (vedi Figura 3-5).

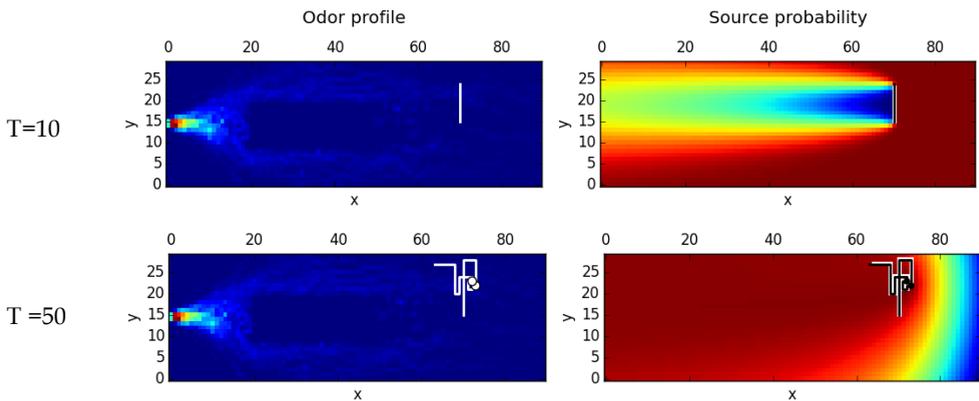
Le dimensioni del dominio, i dati relativi al campo di vento e all'emissione della sorgente sono gli stessi della simulazione precedente.

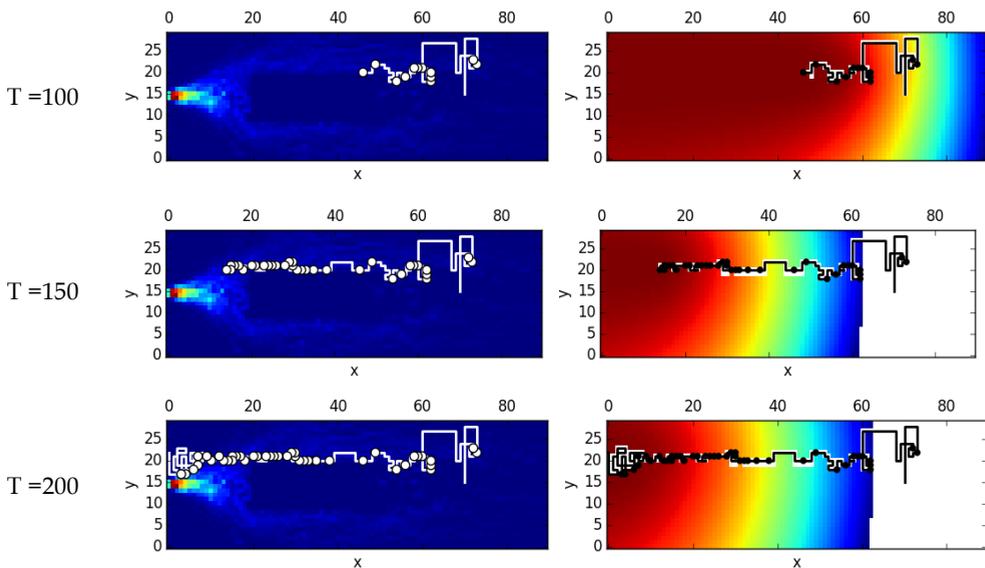


**Figura 3-5:** Campo di concentrazione di odore nel dominio urbano con edificio isolato. I valori di concentrazione di odore variano nell'intervallo (0-100)  $ou_E/m^3$  (colori dal blu al rosso).

In Figura 3-5 è rappresentata la mappa degli isocontorni della concentrazione di odore calcolata in corrispondenza del piano in cui si muove il sensore. La presenza dell'edificio in mezzo al dominio di studio determina una deflessione del pennacchio a destra e a sinistra dell'ostacolo: questo genera due vie preferenziali per il trasporto e la dispersione dell'odore, che risulta quindi presente in concentrazioni significative (più alte rispetto alla dispersione del pennacchio in dominio senza edifici) a distanza maggiore dalla sorgente.

In Figura 3-6 è riportata l'evoluzione della traiettoria di ricerca del sensore in questo dominio.





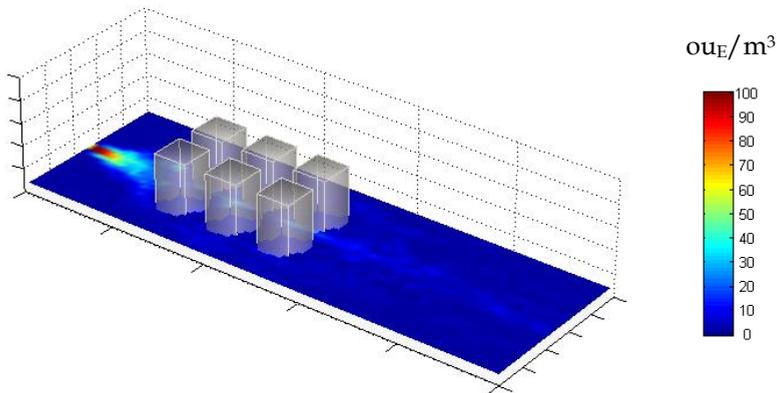
**Figura 3-6:** Campo di concentrazione dell'odore (sinistra) e mappa che descrive la distribuzione locale della probabilità di trovare la sorgente nelle varie posizioni all'interno del dominio urbano con singolo edificio. Gli isocontorni di concentrazione hanno valore variabile nell'intervallo 0 (blu) e  $100 \text{ ou}_E/\text{m}^3$  (rosso). Gli isocontorni della mappa di probabilità sono dinamicamente ri-assegnati per coprire l'intervallo di variazione min-max della probabilità di localizzazione della sorgente. Le linee bianca e nera rappresentano lo sviluppo della traiettoria del sensore. I cerchi identificano istanti corrispondenti alla rilevazione di odore.

L'analisi delle istantanee proposte mostra che la fase iniziale di ricerca per il rilevamento della presenza di odore ha una durata ridotta rispetto alla prima simulazione. La dispersione dell'odore si estende intorno all'edificio a distanze maggiori dalla sorgente e l'odore può essere rilevato prima anche nella zona iniziale di ricerca del sensore. Il rilevamento dell'odore permette di acquisire fin da subito utili informazioni inerenti alla probabile posizione della sorgente, e di aggiornare la mappa di probabilità (escludere quindi una buona parte del dominio dalla ricerca). L'effetto più visibile è quello di permettere al sensore di muoversi direttamente verso la sorgente con una traiettoria abbastanza rettilinea, aggirando la presenza dell'edificio. Il tempo necessario per ottenere la localizzazione della sorgente calcolato per questa simulazione è pari a 200 unità temporali.

### 3.3.3 Dominio con schiera di edifici

Il terzo test di valutazione dell'algoritmo di ricerca è stato fatto considerando la dispersione di un pennacchio di odore in un dominio ancora più complesso in cui è presente una schiera di edifici (vedi Figura 3-8). Questa configurazione urbana determina vincoli aggiuntivi per la possibilità di movimento del sensore e modifica il campo di vento e, di conseguenza, il trasporto e la dispersione dell'odore. La presenza di edifici crea effetti di canyon urbano che possono determinare l'accumulo locale o il trasporto preferenziale di odore lungo alcune direzioni in base alla disposizione degli edifici rispetto alla direzione del vento.

In Figura 3-7 è rappresentata la mappa degli isocontorni della concentrazione di odore calcolata in corrispondenza del piano in cui si muove il sensore.

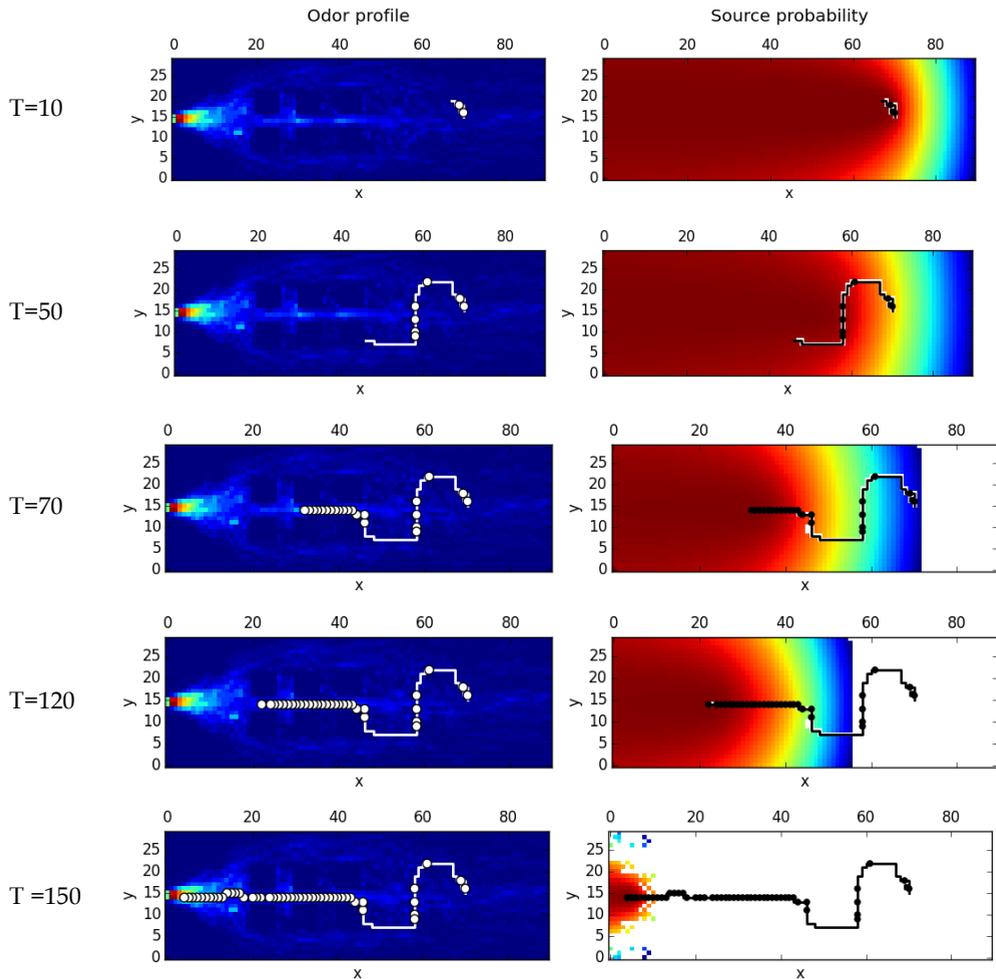


**Figura 3-7:** Campo di concentrazione di odore nel dominio urbano 2 con schiera di edifici. I valori di concentrazione di odore variano nell'intervallo (0-100)  $ou_E/m^3$  (colori dal blu al rosso).

La presenza degli edifici crea una via preferenziale per la dispersione dell'odore, permettendo al pennacchio di manifestarsi con concentrazioni ancora rilevabili dal sensore anche all'estremità del dominio.

Il canyon urbano presente nella parte centrale del dominio permette di rilevare concentrazioni di odore dell'ordine di  $40\ ou_E/m^3$  tra gli edifici (valori dello stesso ordine di quelli rilevabili in prossimità della sorgente).

In Figura 3-8 è riportata l'evoluzione della traiettoria di ricerca del sensore in questo dominio.



**Figura 3-8:** Campo di concentrazione dell'odore (sinistra) e mappa che descrive la distribuzione locale della probabilità di trovare la sorgente nelle varie posizioni all'interno di dominio urbano con schiera di edifici. Gli isocontorni di concentrazione hanno valore variabile nell'intervallo 0 (blu) e 100  $\text{ou}_E/\text{m}^3$  (rosso). Gli isocontorni della mappa di probabilità sono dinamicamente ri-assegnati per coprire l'intervallo di variazione min-max della probabilità di localizzazione della sorgente. Le linee bianca e nera rappresentano lo sviluppo della traiettoria del sensore. I cerchi identificano istanti corrispondenti alla rilevazione di odore.

L'assenza di rilevamento di odore nelle prime fasi della ricerca porta il sensore a muoversi verso l'esterno del dominio e ad assumere una traiettoria abbastanza involuta finché l'odore non viene rilevato. Da questo punto in poi, il sensore è in grado di seguire una traiettoria che lo riporta prima verso la posizione iniziale, e poi verso il centro del dominio dove il campo di moto determina valori più

intensi di concentrazione di odore. La traiettoria lungo il canyon urbano procede dritta nella direzione della sorgente essendo confermata dalla frequenza e dal numero progressivamente crescente dei rilevamenti di odore.

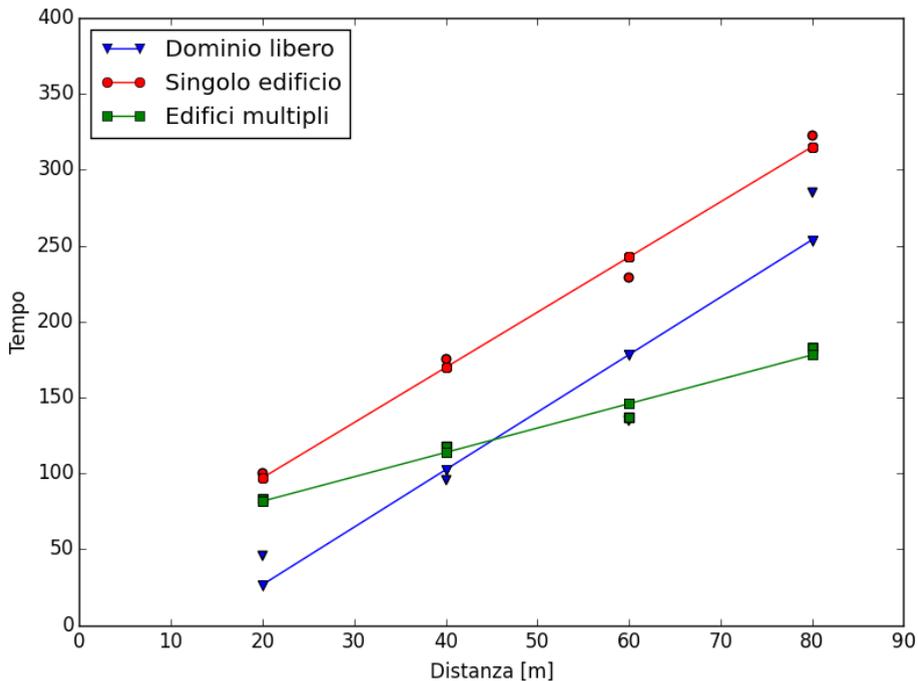
### **3.3.4 Statistiche per la valutazione delle prestazioni dell'algoritmo di ricerca**

Gli esempi di applicazione dell'algoritmo di ricerca infotattica appena discussi descrivono una singola realizzazione del processo di ricerca all'interno del dominio considerato. Per valutare la prestazione dell'algoritmo è necessario valutare l'effetto della variazione della posizione iniziale del sensore sul tempo richiesto per la localizzazione della sorgente.

Per questo è stata realizzata un'analisi statistica, (i) considerando diverse possibili realizzazioni della ricerca e (ii) variando la posizione iniziale del sensore. Questa procedura ha permesso di correlare il tempo per la localizzazione della sorgente con la distanza iniziale tra sensore e sorgente al variare della complessità del dominio.

Sono stati definiti dodici punti di partenza del sensore all'interno del dominio, organizzati secondo una matrice di tre punti trasversali per quattro distanze sottovento (rispettivamente a 20, 40, 60 e 80 m dalla sorgente). Per ogni punto iniziale di ricerca del sensore sono state condotte 5 simulazioni in modo da valutare l'effetto della casualità nella rilevazione/non rilevazione istantanea di odore sul tempo necessario per la localizzazione della sorgente.

In Figura 3-9 è rappresentato il grafico che esprime la correlazione tra la distanza lineare del sensore dalla sorgente e il tempo medio di ricerca. I simboli rappresentano i risultati ottenuti per le simulazioni realizzate nei tre domini di riferimento.



**Figura 3-9:** Relazione tra tempo medio per la localizzazione della sorgente e distanza iniziale tra sensore e sorgente. I simboli blu, rossi e verdi identificano il dominio di riferimento utilizzato per la simulazione (dominio semplice, edificio singolo e schiera di edifici). Le linee rappresentano la tendenza dei dati (fit lineare).

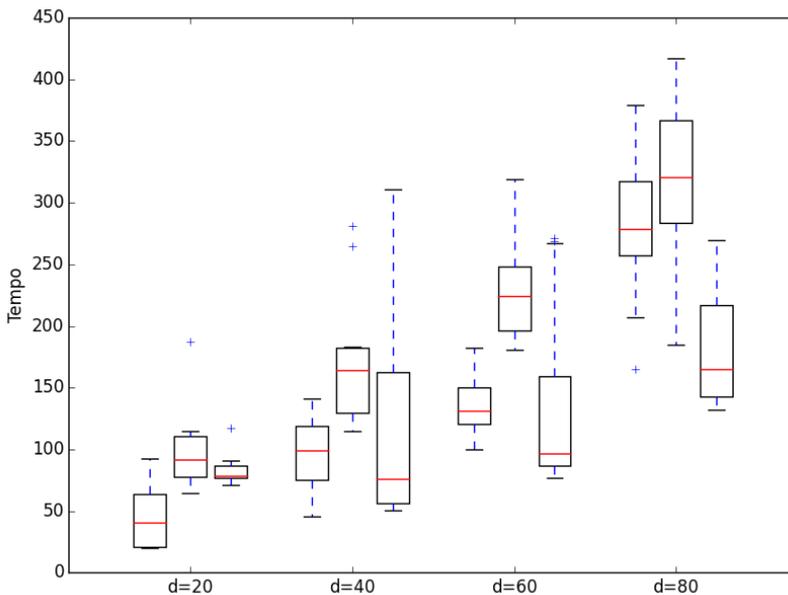
In blu sono riportati i tempi medi di localizzazione relativi alla ricerca realizzata nel dominio privo di edifici, in rosso quelli relativi alla ricerca condotta nel dominio urbano con singolo edificio mentre in verde sono indicati i tempi relativi alla ricerca nel dominio urbano con schiera di edifici. Qualsiasi sia la tipologia di dominio, il tempo necessario per la localizzazione della sorgente aumenta linearmente con la distanza iniziale del sensore dalla sorgente.

Le linee di tendenza calcolate per i diversi set di dati indicano che, all'aumentare della distanza dalla sorgente, l'aumento del tempo di localizzazione è minore nel caso di ricerca all'interno del dominio con schiera di edifici. Questo risultato può essere spiegato dal fatto che il canyon urbano promuove il trasporto dell'odore a distanze maggiori rispetto al caso senza edifici o con singolo edificio. In queste condizioni il sensore è quindi in grado di rilevare prima la presenza di concentrazione di odore, anche se si trova a

distanza iniziale elevata dalla sorgente. Questo permette di acquisire ed elaborare prima che negli altri domini le informazioni utili per la localizzazione della sorgente.

Un parametro molto utile per quantificare le prestazioni dell'algoritmo di ricerca è dato dalla variabilità del tempo di localizzazione. In Figura 3-10 è riportata la distribuzione statistica dei tempi di localizzazione della sorgente calcolati nelle quindici simulazioni realizzate per una determinata distanza iniziale tra sensore e sorgente. La distribuzione statistica è graficamente sintetizzata utilizzando un boxplot e, per ogni distanza, sono rappresentati tre boxplot associati alla statistica calcolata per ricerca effettuata nei tre diversi domini.

Il boxplot di sinistra, centrale e di destra rappresentano rispettivamente le statistiche relative alla ricerca effettuata in dominio privo di edifici, con singolo edificio e con schiera di edifici.



**Figura 3-10:** Variabilità del tempo necessario per la localizzazione della sorgente al variare della distanza iniziale tra sensore e sorgente per ricerche effettuate in domini di crescente complessità. I boxplot di sinistra, centrale di destra rappresentano la statistica calcolata per dominio senza edifici, con singolo edificio e con schiera di edifici.

---

Dalla Figura 3-10 si vede che la variabilità dei tempi di localizzazione della sorgente aumenta all'aumentare della distanza nel caso di dominio semplice e dominio con singolo edificio. La variabilità aumenta a breve distanza (40 m) per diminuire a distanze maggiori nel caso di ricerca della sorgente in dominio con schiera di edifici.

## 4 Conclusioni

In questa tesi di dottorato sono state introdotte e utilizzate diverse tipologie di modelli che potrebbero essere utilizzati dalle Autorità come strumenti di supporto per una serie di attività collegate alla previsione, alla pianificazione e al controllo degli impatti olfattivi.

Nel primo esempio presentato, abbiamo valutato la possibilità di utilizzare modelli predittivi dell'impatto per discriminare quale sia, tra due sorgenti emissive, quella responsabile della generazione di un impatto olfattivo. Sulla base della misura olfattometrica che quantifica l'emissione di una delle due sorgenti, è stato ricostruito l'impatto ad essa direttamente associabile: eventuali impatti superiori, sarebbero da associare ad un contributo aggiuntivo all'emissione di odore, presumibilmente associabile alla sorgente emissiva vicina. In questo modo è stato possibile "oggettivare" la relazione causa-effetto tra sorgente e impatto. Questa tipologia di studi è di fondamentale importanza sia in fase di valutazione dello stato di fatto che, in ottica predittiva, per lo studio di scenari emissivi diversi al fine di operare le scelte migliori dal punto di vista tecnico-gestionale per ridurre l'impronta olfattiva sul territorio. L'utilizzo del modello ha anche permesso di valutare in che modo alcune semplici modifiche tecniche all'impianto stesso possano portare ad una sostanziale riduzione dell'impronta olfattiva sul territorio.

Le tecniche adottate in questo primo studio non possono essere applicate in contesti più complessi come le aree urbane. La topografia urbana infatti impone l'adozione di strumenti a risoluzione maggiore capaci di tenere in considerazione gli effetti degli edifici sul moto dell'aria e quindi sul trasporto, dispersione e trasformazione delle specie. Gli studi di impatto odorigeno in questo caso sono stati condotti attraverso un modello a particelle Lagrangiano.

Nello specifico, ci siamo occupati di definire una metodologia per la quantificazione dell'impatto odorigeno di attività di ristorazione all'interno del contesto urbano di Verona definendo alcuni indicatori sintetici di facile lettura per la valutazione e il confronto dell'impatto olfattivo prodotto (rosa dell'odore). Lo strumento computazionale proposto, permettendo di ricostruire nel breve termine e con risoluzione temporale e spaziale elevata l'impatto

---

prodotto da una sorgente, potrebbe essere utilizzato dalle Pubbliche Autorità per verificare se una nuova (o esistente) installazione potenzialmente può produrre (o in realtà produce) emissioni odorigene indesiderate. Oggettivando la relazione tra causa (intensità dell'emissione) ed effetto (impatto olfattivo prodotto) diventa possibile fissare limiti di emissione specifici per ogni attività commerciale durante la fase di autorizzazione (o, a posteriori, per la mitigazione ed il controllo dell'odore).

La modellazione fino ad ora studiata è stata utilizzata per correlare i dati emissivi delle sorgenti al reale impatto sul dominio di studio. L'ultima parte del lavoro si è focalizzata sullo studio di una problematica inversa. L'obiettivo è stato quello di studiare e verificare l'applicabilità di algoritmi per la localizzazione di una sorgente a partire dalle informazioni intermittenti e sparse che un sensore in movimento potrebbe captare sul territorio. L'algoritmo di ricerca sviluppato utilizza l'infotassi che consiste nel massimizzare il contenuto informativo dei segnali ricevuti dal sensore durante il suo tragitto per identificare la traiettoria che permette di avvicinarsi il più velocemente possibile alla sorgente.

L'algoritmo di ricerca è stato testato considerando un campo di dispersione di odore generato all'interno di un dominio urbano in cui la configurazione degli edifici influenza il trasporto e la dispersione delle specie odorigene. Sono state condotte diverse simulazioni per correlare i tempi di ricerca alla distanza iniziale del sensore dalla sorgente. Le simulazioni hanno dimostrato come la presenza di effetti di canyon urbano, dovuti a particolari configurazioni degli edifici ed alla loro disposizione rispetto alla direzione principale del vento, favorisca la dispersione dell'odore a notevoli distanze riducendo così il tempo di ricerca medio della sorgente da parte del sensore.

Le simulazioni infotattiche sono state condotte grazie all'utilizzo di un solo sensore capace di muoversi nel dominio ed utilizzare le informazioni ricavate dalle misurazioni di odore random ed intermittenti per localizzare la sorgente. L'efficacia di ricerca della sorgente dipende dalla quantità e dalla qualità di informazioni che è in grado di registrare nel tempo.

Un'evoluzione del presente lavoro potrebbe essere quella di utilizzare un gruppo di sensori indipendenti che siano in grado di condividere le informazioni ed influenzare vicendevolmente il percorso di ricerca (vedi Salge e Polani, 2011).

Tali sensori potrebbero ottimizzare il processo di ricerca nei seguenti modi:

- condividendo un'unica mappa di probabilità di trovare la sorgente da aggiornare nel tempo sulla base delle informazioni provenienti da tutti i componenti del gruppo nel tempo;
- mantenere una singola mappa di probabilità per ogni sensore che verrebbe però aggiornata sulla base delle informazioni di tutti i sensori del gruppo.



## Bibliografia

Berg H. C., 1993, *Random Walks in Biology* (Princeton, NJ: Princeton University Press).

Blanes-Vidal, V., Suh, H., Nadimi, E.S., Løfstrøm, P., Ellermann, T., Andersen, E.V., Schwartz, J., 2012, Residential exposure to outdoor air pollution from livestock operations and perceived annoyance among citizens, *Environment International*, 40: 44-50.

Brattoli, M., de Gennaro, G., de Pinto, V., Loiotile, A.D., Lovascio, S., Penza, M., 2011, Odour Detection Methods: Olfactometry and Chemical Sensors, *Sensors*, 11(5): 5290-5322.

Campolo, M., Salvetti, M.V., Soldati, A., 2005, Mechanisms for microparticle dispersion in a jet in crossflow, *AICHE J.*, 51(1): 28-43.

Capelli, L., Sironi, S., Del Rosso, R., Centola, P., Rossi, A., Austeri, C., 2011, Olfactometric approach for the evaluation of citizens' exposure to industrial emissions in the city of Terni, Italy, *Science of the Total Environment*, 409: 595-603.

De Croon, G.C.H.E., O'Connor L.M., Nicol, C., Izzo, D., 2013, Evolutionary robotics approach to odor source localization, *Neurocomputing* 121(2013)481-497

Dourado, H., Santos, J.M., Reis, N.C., Mavroidis, I., 2012, Numerical modelling of odour dispersion around a cubical obstacle using large eddy simulation, *Water Science and Technology*, 66(7): 1549-1557.

---

Dourado, H., Santos, J.M., Reis, N.C., Mavroidis, I., 2014, Development of a fluctuating plume model for odour dispersion around buildings, *Atmospheric Environment*, 89: 148-157.

Drew, G.H., Smith, R., Gerard, V., Burge, C., Lowe, M., Kinnersley, R., Sneath, R., Longhurst, P.J., 2007, Appropriateness of selecting different averaging times for modelling chronic and acute exposure to environmental odours, *Atmospheric Environment*, 41(13): 2870-2880.

Ferri, G., Caselli, E., Mattoli, V., Mondinib, A., Mazzolai, B., Dario, P., 2009, Spiral: A novel biologically-inspired algorithm for gas/odor source localization in an indoor environment with no strong airflow, *Robotics and Autonomous Systems* 57 (2009) 393402.

Franzese, P., 2003, Lagrangian stochastic modeling of a fluctuating plume in the convective boundary layer, *Atmospheric Environment*, 37(12): 1691-1701.

Gailis, R.M., Hill, A., Yee, E., Hilderman, T., 2007, Extension of a fluctuating plume model of tracer dispersion to a sheared boundary layer and to a large array of obstacles, *Boundary-Layer Meteorol.*, 122: 577-607.

Gardiner, J. M., Atena, J., 2007, Sharks need the lateral line to locate odor sources: rheotaxis and eddy chemotaxis, *The Journal of Experimental Biology* 210, 1925-1934, Published by The Company of Biologists.

Gowardhan, A.A., Pardyjak, E. R., Senocak, I., Browm, M.J., 2011, A CFD-based wind solver for an urban fast response transport and dispersion model, *Environmental Fluid Mechanics*, 11(5): 439-464.

Grasso, F. W., Consi, T. R., Mountain, D. C. & Atema, J., 2000, Biomimetic robot lobster performs chemo-orientation in turbulence using a pair of spatially separated sensors: Progress and challenges. *Rob. Auton. Syst.* 30, 115-131.

Griffiths, K.D., 2014, Disentangling the frequency and intensity dimensions of nuisance odour, and implications for jurisdictional odour impact criteria, *Atmospheric Environment*, 90: 125-132.

Hanna, S.R., Brown, M.J., Camell, F.E.; Chan, S.T., Coirier, W.J., Hansen, O.R., Huber, A.H., Kim, S., Reynolds, R.M., 2006, Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan: An application of five computational fluid dynamics models, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(12): 1713-1726.

Huiling cui, Yao, R., Xu, X., Xin, C., Yang, J., 2011, A tracer experiment study to evaluate the CALPUFF real time application in a near-field complex terrain setting, *Atmospheric Environment*, 45: 7525-7532.

Karpas, E., Schneidman, E., 2014, Collective Search by Group Infotaxis, *Collective Intelligence Conference*.

Kuwana, Y., Nagasawa, S., Shimoyama, I. & Kanzaki, R., 1999, Synthesis of the pheromone oriented behaviour of silkworm moths by a mobile robot with moth antennae as pheromone sensors. *Biosens. Bioelectron.* 14, 195-202.

Latos, M., Karageorgos, P., Kalogerakis, N., Lazaridis, M., 2011, Dispersion of Odorous Gaseous Compounds Emitted from Wastewater Treatment Plants, *Water Air Soil Pollut.*, 215: 667-677.

Maizi, A., Dhaouadi, H., Bournot, P., Mhiri, H., 2010, CFD prediction of odorous compound dispersion: Case study examining a full scale wastewater treatment plant, *Biosystems Engineering*, 106: 68-78.

Manor, A., 2014, A Stochastic Single-Particle Lagrangian Model for the Concentration Fluctuations in a Plume Dispersing Inside an Urban Canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume: 150, Issue: 2, Pages: 327-340.

Marques, L., Nunes, U., A. T. de Almeida, 2006, Particle swarm-based olfactory guided search, *Auton Robot* 20:277-287.

---

Michioka, T., Sato, A., Sada, K., 2013, Large-eddy simulation coupled to mesoscale meteorological model for gas dispersion in an urban district, *Atmospheric Environment*, 75: 153-162.

Moraud, E.M., Martinez, D., 2010, Effectiveness and robustness of robot infotaxis for searching in dilute conditions, *Frontiers in neurorobotics* 4 (1), 1-8.

Mussio, P., Gnyp, A.W., Hensha, P.F., 2001, A fluctuating plume dispersion model for the prediction of odour-impact frequencies from continuous stationary sources, *Atmospheric Environment*, 35: 2955-2962.

Nicell, J.A., 2009, Assessment and regulation of odour impacts, *Atmospheric Environment*, 43 (1): 196-206.

Nicolas, J., Cors, M., Romain, A.C., Delva, J., 2011, Identification of odour sources in an industrial park from resident diaries statistics, *Atmospheric Environment*, 44(13): 1623-1631.

Olafsdottir, S., Gardarsson, S.M., 2013, Impacts of meteorological factors on hydrogen sulfide concentration downwind of geothermal power plants, *Atmospheric Environment*, 77: 185-192.

Pang, S., Member, IEEE, and Jay A. Farrell, 2006, Chemical Plume Source Localization, *Systems, Man, And Cybernetics—Part B: Cybernetics*, Vol. 36, No. 5, 1068-1080.

Piringer, M., Schauburger, G., Petz, E., Knauder, W., 2012, Comparison of two peak-to-mean approaches for use in odour dispersion models, *Water Science and Technology*, 66(7): 1498-1501.

Pitton, E., Marchioli, C., Lavezzo, V.; et al., 2012, Anisotropy in pair dispersion of inertial particles in turbulent channel flow. *Physics of Fluids*, Volume: 24, Issue: 7, Article Number: 073305.

---

Pullen, J, Vawda, Y., 2007, Review of Dispersion Modelling for Odour Predictions. Tech. Rep. Science Report: SC030170/SR3 UK Environment Agency.

Ramakrishnan, S., Laurent, T., Kumar, M., Bertozzi, A.L., 2014, Spatiotemporal chemotactic model for ant foraging, Volume: 28 Issue: 30, Article Number: 1450238.

Salge, C., Polani, D., 2011, Local Information Maximisation creates Emergent Flocking Behaviour, Advances in Artificial Life, ECAL 2011.

Schauberger, G., Piringer, M., Schmitzer, R., Kamp, M., Sowa, A., Koch, R., Eckhof, W., Grimm, E., Kypke, J., Hartung, E., 2012, Concept to assess the human perception of odour by estimating short-time peak concentrations from one-hour mean values. Reply to a comment by Janicke et al., Atmospheric Environment, 54: 624-628.

Seo, S.G., Ma, Z.K., Jeon, J.M., Jung, S.C., Lee, W.B., 2011, Measurements of key offensive odorants in a fishery industrial complex in Korea, Atmospheric Environment, 45(17): 2929-2936.

SEPA, Scottish Environment Protection Agency, Technical Guidance Note IPPC-H4, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Horizontal Guidance for Odour Part 1 - Regulation and Permitting, Draft, 2002.

Sironi, S., Capelli, L., Centola, P., Del Rosso, R., Pierucci, S., 2010, Odour impact assessment by means of dynamic olfactometry, dispersion modelling and social participation, Atmospheric Environment, 44(3): 354-360.

Sohn, J.H., Pioggia, G., Craig, I.P., Stuetz, R.M., Atzeni, M.G., 2009, Identifying major contributing sources to odour annoyance using a non-specific gas sensor array, Biosystems Engineering, 102(3): 305-312.

Sommer-Quabach, E., Piringer, M., Petz, E., Schauburger, G., 2014. Comparability of separation distances between odour sources and residential

---

areas determined by various national odour impact criteria. *Atmospheric Environment* 95, 20-28.

Spears, D., Thayer, D., Zarzhitsky, D., Foundations of swarm robotic chemical plume tracing from a fluid dynamics perspective, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics* Vol. 2 No. 4, 2009 pp. 745-785.

Tsai, C., Chen, M., Ye, A., Chou, M., Shen, S., Mao, I., 2008, The relationship of odor concentration and the critical components emitted from food waste composting plants, *Atmospheric Environment*, 42:8246-8251.

Vergassola, M., Villermaux, E., Shraiman, B.I., 2007, Infotaxis as a strategy for searching without gradients. *Nature*, 445: 406-9.

Voges, N., Chaffiol, A., Lucas, P., Martinez, D., 2014, Reactive Searching and Infotaxis in Odor Source Localization, *PLOS Computational Biology*, Volume 10 | Issue 10 | e1003861:1-13.

Wei Li, Jay A. Farrell, Ring T. Cardé, 2001, Tracking of Fluid-Advection Odor Plumes: Strategies Inspired by Insect Orientation to Pheromone, *International Society of Adaptive Behavior*, Vol 9(3-4): 143-170.

Zwack, L.M., Hanna, S.R., Spengler, J.D., Levy, J.I., 2011, Using advanced dispersion models and mobile monitoring to characterize spatial patterns of ultrafine particles in an urban area, *Atmospheric Environment*, 45(28): 4822-4829.

[http://www.richmond.gov.uk/planning\\_guidance\\_for\\_food\\_and\\_drink\\_establishments.pdf](http://www.richmond.gov.uk/planning_guidance_for_food_and_drink_establishments.pdf)

## Appendice

### Aggiornamento della mappa di probabilità partendo dalle informazioni raccolte

In questa sezione andremo a ricavare la mappa di probabilità di trovare una sorgente di odore ignota per un sensore che si muove in un dominio specifico, partendo dalla definizione di un semplice modello Gaussiano di dispersione e dalle tracce di rilevamento e non-rilevamento ottenute durante il suo percorso di ricerca.

Consideriamo il comportamento di un plume di odore in un dominio turbolento.

Al fine di sviluppare un algoritmo in grado di ricercare la sorgente all'interno di un ambiente in cui il flusso è turbolento è necessario partire da un modello che vada a descrivere nel tempo e nello spazio la dispersione dell'odore. In tali condizioni risulta molto complesso descrivere in maniera deterministica il comportamento di ogni particella di odore nel moto di dispersione. Si utilizza quindi una descrizione probabilistica dell'evoluzione spazio temporale del plume di odore.

La concentrazione di una sostanza in un plume mediata nel tempo segue una distribuzione di tipo Gaussiano lungo la direzione principale del vento:

$$\bar{C} = C_m \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \quad (\text{A.1})$$

dove:

- $x$ , direzione principale del vento;
- $y$ , distanza dall'asse del pennacchio in direzione perpendicolare al vento;
- $\sigma_y$ , larghezza media del pennacchio funzione della coordinata  $x$ ;
- $\bar{C}$ , concentrazione del pennacchio mediata nel tempo;

- 
- $C_m$ , concentrazione lungo l'asse del pennacchio.

Questo modello è in grado di predire valori di concentrazione in modo accurato solamente nel caso in cui le medie temporali vengano effettuate per lunghi periodi ed il flusso del vento risulti sempre allineato lungo una determinata direzione.

In contesti reali tali condizioni non vengono rispettate in quanto il campo di moto può variare significativamente nello spazio e nel tempo.

Per far fronte a tale complessità è stato proposto un altro approccio basato sulla descrizione di un moto medio controllato dalla velocità del vento e dalle caratteristiche geometriche del dominio a cui è stato sovrapposto il contributo locale delle fluttuazioni turbolente.

La posizione di un pacchetto di odore in un determinato istante di tempo può essere quindi descritta partendo dalla dall'espressione della velocità locale:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{U}(\mathbf{X}, t) + \mathbf{N}(t) \quad (\text{A.2})$$

dove:

- $\mathbf{X}(t) = (x, y)$  è la posizione del pacchetto di odore,
- $\mathbf{U}(t) = (u_x, u_y)$  è la velocità media del flusso,
- $\mathbf{N} = (n_x, n_y)$  è una variabile random Gaussiana con media nulla e varianza  $(\sigma_x, \sigma_y)$ .

### Dispersione di un singolo pacchetto di odore

Consideriamo ora un singolo pacchetto di odore emesso dalla sorgente e valutiamo la sua distribuzione spazio-temporale ad un tempo  $t_k$  successivo al tempo di rilascio  $t_l$ . Integrando l'espressione precedente otteniamo:

$$\mathbf{X}(t_l, t_k) = \int_{t_l}^{t_k} \mathbf{U}(\mathbf{X}(\tau)) d\tau + \int_{t_l}^{t_k} \mathbf{N}(\tau) d\tau + \mathbf{X}_s \quad (\text{A.3})$$

dove  $\mathbf{X}(t_l, t_k)$  è la posizione del pacchetto di odore al tempo  $t_k$  nel caso in cui sia stato rilasciato dalla sorgente posizionata in  $\mathbf{X}_s(x_s, y_s)$  al tempo  $t_l$ . La posizione

media al tempo  $t_k$  è quindi  $\bar{\mathbf{X}}(t_l, t_k) = \int_{t_l}^{t_k} \mathbf{U}(\mathbf{X}(\tau)) d\tau + \mathbf{X}_s$ . Definiamo quindi  $\mathbf{W}(t_l, t_k) = \int_{t_l}^{t_k} \mathbf{N}(\tau) d\tau$  il termine random con media nulla e varianza  $[(t_k - t_l)\sigma_x^2, (t_k - t_l)\sigma_y^2]$ . La distribuzione della posizione del pacchetto di odore  $\mathbf{X}(t_l, t_k)$  al tempo  $t_k$  ha una distribuzione Gaussiana con media  $\bar{\mathbf{X}}(t_l, t_k)$  e varianza  $[(t_k - t_l)\sigma_x^2, (t_k - t_l)\sigma_y^2]$ .

### Distribuzione dei pacchetti di odore nel caso di emissione continua

Consideriamo il caso di un emissione continua di odore per un periodo di tempo  $t \in [t_0, t_k]$ . Se definiamo un tasso di emissione di odore pari a  $N$  pacchetti al secondo, al tempo  $t_k$  nel nostro dominio sarà presente un numero totale di pacchetti pari a  $F = N(t_k - t_0)$ .

La posizione di ognuno di essi sarà definita dall'equazione (A.2) in accordo con la distribuzione Gaussiana descritta nell'equazione (A.3).

Assumendo un tasso di rilascio uniforme, i tempi di rilascio degli  $F$  pacchetti dalla sorgente saranno  $[t_0, t_0 + d\tau, t_0 + 2d\tau, \dots, t_k]$  dove  $d\tau$  è pari a  $1/N$ .

Infine, il vettore posizione media dei pacchetti di odore al tempo  $t_k$  sarà pari a  $\bar{\mathbf{X}}(t_k) = [\bar{\mathbf{X}}(t_0, t_k), \bar{\mathbf{X}}(t_0 + d\tau, t_k), \dots, \bar{\mathbf{X}}(t_k, t_k)]$  e la sua componente random risulta pari a  $\mathbf{W}(t_k) = [\mathbf{W}(t_0, t_k), \mathbf{W}(t_0 + d\tau, t_k), \dots, \mathbf{W}(t_k, t_k)]$ .

Il vettore  $\mathbf{X}(t_k) = \bar{\mathbf{X}}(t_k) + \mathbf{W}(t_k)$  segue una distribuzione Gaussiana dove  $\bar{\mathbf{X}}(t_k)$  rappresenta una stima della posizione media dell'asse del pennacchio mentre la deviazione standard di  $\mathbf{W}(t_k)$  rappresenta una stima della sua larghezza.

Definiamo quindi un dominio computazionale rettangolare a griglia delle dimensioni di  $m \times n$  celle di lunghezza  $L_x$  ed  $L_y$  lungo le direzioni  $x$  ed  $y$  rispettivamente.

In tale dominio definiamo per semplicità:

- $C = [C_1, C_2, \dots, C_M]$  il vettore contenente tutte le celle del dominio (celle totali pari a  $M = nm$ ).
- $\pi = [\pi_1, \dots, \pi_M]$  il vettore contenente la probabilità di trovare la sorgente in ogni cella, con  $0 \leq \pi_i \leq 1$ .

All'inizio della ricerca il vettore  $\pi$  è costante e se si considera una sola sorgente nel dominio esso può essere inizializzato assumendo il valore di probabilità per ogni punto pari a  $\pi_i = \frac{1}{M}$ . La stima iniziale della probabilità può anche non essere

---

piatta se si hanno a disposizione ulteriori informazioni in merito alla posizione della sorgente.

### Mapa della probabilità di trovare la sorgente

In questa sezione andremo a calcolare la mappa di probabilità di trovare l'odore in una specifica posizione partendo dai rilevamenti e non-rilevamenti salvati nella traccia degli incontri per il caso di un singolo rilascio odorigeno e per un'emissione continua.

#### A. Singolo pacchetto di odore

Definiamo ora due vettori:

- $\{U(X_v(t_i))\}_{i=0}^k$  vettore contenente i dati del campo di moto
- $\{X_v(t_i)\}_{i=0}^k$  vettore degli incontri ("hits") o dei vuoti ("voids") lungo la traiettoria del sensore.

Supponiamo che la sorgente emetta solamente un pacchetto di odore al tempo  $t_l$ . Se rileviamo tale pacchetto in posizione  $X_v$  nella cella  $C_j$  al tempo  $t_k$ , quale sarà la probabilità di trovare la sorgente in posizione  $C_i$ ? Risolviamo l'equazione (A.3) per ottenere la posizione della sorgente:

$$\mathbf{X}_s(t_l, t_k) = \mathbf{X}_v - \int_{t_l}^{t_k} \mathbf{U}(\mathbf{X}(\boldsymbol{\tau})) d\boldsymbol{\tau} - \int_{t_l}^{t_k} \mathbf{N}(\boldsymbol{\tau}) d\boldsymbol{\tau} \quad (\text{A.4})$$

dove:

- $C_j$  è la cella in cui si trova il sensore;
- $X_j$  è la posizione del punto centrale della cella.

Considerando la dimensione caratteristica del dominio molto maggiore rispetto a quella delle celle possiamo univocamente indicare la posizione del sensore con  $\mathbf{X}_v(t_k) = X_j = (x_j, y_j)$ . Essendo i rilevamenti del sensore registrati in modo discreto nel tempo  $\{t_i\}_{i=0}^k$  e definiti localmente, l'espressione  $\int_{t_l}^{t_k} \mathbf{U}(\mathbf{X}(\boldsymbol{\tau})) d\boldsymbol{\tau}$  può essere approssimata con  $\sum_{t_l}^{t_k-1} \mathbf{U}(\mathbf{X}(t_i)) dt$ .

Questa espressione introduce però un errore poichè il vettore del flusso può variare nello spazio.

Se definiamo  $\mathbf{V}(t_1, t_k) = (v_x(t_1, t_k), v_y(t_1, t_k)) = \sum_{t_l}^{t_k-1} \mathbf{U}(\mathbf{X}(t_i)) dt$ , l'equazione (A.4) diventa:

$$\mathbf{X}_s(t_l, t_k) = \mathbf{X}_j - \mathbf{V}(t_l, t_k) - \mathbf{W}(t_l, t_k) \quad (\text{A.5})$$

Nell'equazione (A.5) il termine  $\mathbf{X}_j - \mathbf{V}(t_l, t_k)$  può essere calcolato ( $\mathbf{X}_j$  è la posizione corrente del sensore e  $\mathbf{V}(t_l, t_k)$  può essere ricavato dal campo di moto) e la quantità  $\mathbf{W}(t_l, t_k)$  è una variabile random Gaussiana con media nulla.

Pertanto anche  $\mathbf{X}_s(t_l, t_k)$  è una variabile random distribuita normalmente con media nulla e varianza  $(t_k - t_l)\sigma^2$ .

La probabilità quindi di localizzare la sorgente in posizione  $\mathbf{X}_i$  è definita come la probabilità del vettore  $\mathbf{W}(t_l, t_k)$  che rende  $\mathbf{X}_i$  una soluzione dell'equazione (A.5).

Riportiamo qui di seguito la funzione di densità di probabilità (PDF) di  $\mathbf{W}(t_l, t_k)$ :

$$f(w_x(t_l, t_k)) = \frac{e^{-\frac{w_x^2}{2(t_k-t_l)\sigma_x^2}}}{\sqrt{2\pi(t_k - t_l)\sigma_x^2}} \quad (\text{A.6})$$

$$f(w_y(t_l, t_k)) = \frac{e^{-\frac{w_y^2}{2(t_k-t_l)\sigma_y^2}}}{\sqrt{2\pi(t_k - t_l)\sigma_y^2}} \quad (\text{A.7})$$

Ad ogni timestep è possibile ottenere utili informazioni sia nel caso il sensore rilevi un pacchetto di odore sia nel caso di non-rilevamento.

### A.1 Singolo rilascio e singolo rilevamento

Indichiamo con  $S_{ij}(t_1, t_k)$  la probabilità che vi sia una sorgente localizzata nella cella  $C_i$  che abbia rilasciato un pacchetto di odore all'istante  $t_1$ , dato il rilevamento della particella in posizione  $C_j$  al tempo  $t_k$  ( $t_k > t_1$ ).

Dalle equazioni (A.5) - (A.7) ricaviamo:

$$\begin{aligned}
S_{ij}(t_l, t_k) &= \int_{x \in C_i} e^{-\frac{(x_j - v_x(t_l, t_k) - x)^2}{2(t_k - t_l)\sigma_y^2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi(t_k - t_l)\sigma_x^2}} dx \times \int_{y \in C_i} e^{-\frac{(y_j - v_y(t_l, t_k) - y)^2}{2(t_k - t_l)\sigma_y^2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi(t_k - t_l)\sigma_y^2}} dy \\
&= \frac{1}{2\pi(t_k - t_l)\sigma_x\sigma_y} \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} e^{-\frac{(x_j - x_i - v_x(t_l, t_k) - x)^2}{2(t_k - t_l)\sigma_x^2}} dx \\
&\quad \times \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} e^{-\frac{(y_j - y_i - v_y(t_l, t_k) - y)^2}{2(t_k - t_l)\sigma_y^2}} dy
\end{aligned} \tag{A.8}$$

L'espressione (A.8) è funzione della posizione relativa tra il sensore e la sorgente (es.  $\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i$ ), del vettore del campo di moto  $\mathbf{V}(t_l, t_k)$  e del periodo di tempo  $[t_l, t_k]$ . Se calcoliamo  $\{S_{ij}(t_l, t_k)\}_{i=1}^M$  in corrispondenza di tutte le celle del dominio otteniamo la mappa di probabilità di trovare la sorgente relativa ad un singolo rilascio al tempo  $t_l$  e con un rilevamento nella cella  $C_j$  al tempo  $t_k$ .

## A.2 Singolo rilascio e singolo non-rilevamento

Nel caso in cui non si rilevi alcun pacchetto di odore nella cella  $C_j$  all'istante di tempo  $t_k$ , tale evento è comunque utile poichè fornisce informazioni riguardo la probabilità nulla in specifici punti.

Supponiamo che la sorgente localizzata in  $C_i$  emetta solamente un pacchetto di odore al tempo  $t_l$ , quale sarà la probabilità di non effettuare un rilevamento in posizione  $C_j$  al tempo  $t_k$ ?

Vediamo inizialmente qual'è la probabilità di effettuare il rilevamento.

Sia  $\mu$  la probabilità di effettuare un rilevamento nel caso in cui ci sia dell'odore nella cella.

Pertanto, la probabilità di trovare un odore rilasciato dalla sorgente in posizione  $C_i$  al tempo  $t_l$  e rilevato in posizione  $C_j$  al tempo  $t_k$  è pari a  $\mu S_{ij}(t_l, t_k)$ , mentre la probabilità di non trovarlo è  $(1 - \mu S_{ij}(t_l, t_k))$ .

Se calcoliamo tale valore per ogni punto del dominio otteniamo la mappa di probabilità di non rilevare l'odore  $\{1 - \mu S_{ij}(t_l, t_k)\}_{j=1}^M$  nel caso di una sorgente posizionata in  $C_i$  che ha rilasciato l'odore al tempo  $t_l$ .

Il vettore  $\{1 - \mu S_{ij}(t_l, t_k)\}_{j=1}^M$  può quindi essere interpretato come la mappa che esprime la massima verosimiglianza di trovare la sorgente dato un singolo rilascio effettuato all'istante di tempo  $t_l$  e non rilevato nella cella  $C_j$  al tempo  $t_k$ .

### B. Rilascio continuo di pacchetti di odore

Ricaviamo ora la probabilità di ottenere e non ottenere rilevamenti nel dominio nel caso in cui ci sia un rilascio continuo di pacchetti di odore.

Consideriamo un emissione continua per un periodo di tempo  $t \in [t_0, t_k]$ . Se definiamo un tasso di emissione di odore pari a  $N$  pacchetti al secondo, al tempo  $t_k$  nel nostro dominio sarà presente un numero totale di pacchetti pari a  $F = N(t_{k-1} - t_0)$ . Quando il sensore rileva odore nella cella  $C_j$  al tempo  $t_k$  non è possibile in questo caso determinare il tempo in cui è stato emesso ( $t_l$ ). Infatti l'istante di tempo di inizio rilascio  $t_0$  è sconosciuto ma si suppone che sia antecedente all'istante di inizio ricerca da parte del sensore.

#### B.1 Rilascio continuo - rilevazione singolo pacchetto

Consideriamo che una sorgente rilasci odore in modo continuo partendo dall'istante  $t_0$ , sia  $\beta_{ij} = (t_0, t_k)$  la probabilità della sorgente posizionata in  $C_i$  nel caso di rilevamento in  $C_j$  al tempo  $t_k$ . Poichè l'istante di inizio rilascio  $t_l$  non è noto ma si suppone essere distribuito uniformemente in  $[t_0, t_k]$ , nel calcolo di  $\beta_{ij}$  è necessario considerare tutti i possibili istanti di tempo  $t_l$ , quindi:

$$\beta_{ij}(t_0, t_k) = \frac{1}{k} \sum_{l=0}^{k-1} S_{ij}(t_l, t_k) \quad (\text{A.9})$$

Il vettore  $\{\beta_{ij}(t_0, t_k)\}_{i=1}^M$  può quindi essere interpretato come la mappa di probabilità di trovare la sorgente continua per un incontro effettuato nella cella  $C_j$  al tempo  $t_k$ .

#### B.2 Rilascio continuo - singolo evento di non rilevamento

Calcoliamo ora la mappa di non rilevamento per il caso di una sorgente con rilascio continuo.

Sappiamo che la probabilità di non rilevamento di un pacchetto di odore nella cella  $c_j$  al tempo  $t_k$  che è stato rilasciato al tempo  $t_l$  in  $C_i$  è pari a  $(1 - \mu S_{ij}(t_l, t_k))$ . Se integriamo ora tutti possibili istanti di rilascio iniziali  $t_l$  ( $t_0, t_k$ ), la probabilità di non rilevare il pacchetto di odore nella cella  $C_j$  al tempo  $t_k$  dovuta al rilascio continuo della sorgente in  $C_i$  è:

$$\gamma_{ij}(t_0, t_k) = \prod_{l=0}^{k-1} [1 - \mu S_{ij}(t_l, t_k)] \quad (\text{A.10})$$

Anche in questo caso, il vettore  $\{\gamma_{ij}(t_0, t_k)\}_{i=1}^M$  rappresenta la mappa di non-rilevamento al tempo  $t_k$  per un rilascio continuo di una sorgente in  $C_i$ .

Tale vettore può essere interpretato come la mappa di verosimiglianza di trovare la sorgente nel caso in cui non vi sia stato un rilevamento da parte del sensore nella cella  $C_j$  al tempo  $t_k$ .

Verifichiamo ora come è possibile sviluppare un metodo per incorporare le informazioni ricavate dagli eventi di rilevamento e non-rilevamento registrate nella traccia  $\{X_v(t)\}_{t=t_0}^{t_k}$  al fine di aggiornare la mappa di probabilità ad ogni timestep della simulazione.

Partiamo dalla definizione di alcuni oggetti:

- $A_i$ , evento associato al posizionamento della sorgente nella cella  $C_i$ ;
- $D_j(t_k)$ , evento di rilevamento del pacchetto di odore nella posizione  $C_j$  al tempo  $t_k$ ;
- $\bar{D}_j(t_k)$ , evento di non rilevamento del pacchetto di odore nella posizione  $C_j$  al tempo  $t_k$ ;
- $B_j(t_{k-1})$ , sequenza di rilevamenti e non-rilevamenti avvenuti nel periodo di tempo da  $t_0$  a  $t_{k-1}$ ;
- $\{\alpha_i(t_{k-1}) = P(A_i | B(t_{k-1}))\}_{i=1}^M$ , mappa di probabilità di trovare la sorgente basata sulla sequenza di rilevamenti avvenuti durante il periodo di tempo  $t_0$  a  $t_{k-1}$ .

Sulla base di questi elementi vogliamo calcolare in modo ricorsivo la mappa di probabilità di trovare la sorgente al tempo  $t_k$  ovvero  $\alpha(t_k) = [\alpha_i(t_k)]$ , conoscendo solamente la mappa di probabilità della sorgente all'istante di

tempo precedente  $\alpha(t_{k-1})$  e l'evento di rilevamento o non-rilevamento all'istante  $t_k$ .

Consideriamo il caso più semplice, utilizzare le informazioni relative all'evento di rilevamento per aggiornare la mappa di probabilità.

Se rileviamo un pacchetto di odore al tempo  $t_k$  nella cella  $C_j$ , utilizzando l'equazione (A.9) possiamo calcolare la mappa di probabilità di trovare la sorgente basata sull'evento di rilevamento singolo:

$$P(A_i|D_j(t_k)) = \beta_{ij}(t_0, t_k) \quad (\text{A.11})$$

Per calcolare  $P(A_i|B(t_k))$  è necessario assumere la semplificazione che  $B(t_{k-1})$  e  $D_j(t_k)$  siano eventi indipendenti.

In questo modo utilizzando la teoria di Bayes per gli eventi indipendenti calcoliamo:

$$\begin{aligned} \alpha_i(t_k) &= P(A_i|B(t_{k-1}), D_j(t_k)) = \frac{P(A_i B(t_{k-1}) D_j(t_k))}{P(B(t_{k-1}) D_j(t_k))} \\ &= \frac{1}{P(A_i)} P(A_i|B(t_{k-1})) P(A_i|D_j(t_k)) \\ &= \frac{1}{P(A_i)} \alpha_i(t_{k-1}) \beta_{ij}(t_0, t_k) = M \alpha_i(t_{k-1}) \beta_{ij}(t_0, t_k) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

dove  $j$  è l'indice della cella in cui il sensore è posizionato all'istante  $t_k$  e  $P(A_i) = \pi_i = 1/M$  è la probabilità che ci sia una sorgente nella cella  $C_i$  all'inizio della ricerca (probabilità a priori). Tale probabilità è utilizzata per inizializzare  $\alpha_i(0) = \pi_i$ .

Se calcoliamo  $\alpha_i(t_k)$  in tutte le posizioni del dominio otteniamo la mappa di probabilità di trovare la sorgente.

Vediamo ora come utilizzare le informazioni ricevute dall'evento di non-rilevamento per aggiornare la mappa.

Se non osserviamo un rilevamento in posizione  $C_j$  all'istante  $t_k$ , dall'equazione (A.10) possiamo ricavare la probabilità di non rilevare un pacchetto di odore nel caso di una sorgente posizionata in  $C_i$ :

$$P(\bar{D}_j(t_k)|A_i) = \gamma_{ij}(t_0, t_k) \quad (\text{A.13})$$

---

Pertanto, tenendo in considerazione che la sorgente potrebbe essere posizionata in qualsiasi cella del dominio:

$$P(\bar{D}_j(t_k)) = \sum_{i=1}^M P(\bar{D}_j(t_k)|A_i)P(A_i) = \sum_{i=1}^M \frac{\gamma_{ij}(t_0, t_k)}{M} \quad (\text{A.14})$$

Ora possiamo calcolare la probabilità  $P(A_i|B(t_k))$  date le probabilità  $P(A_i|B(t_{k-1}))$ ,  $P(\bar{D}_j(t_k)|A_i)$  e  $P(\bar{D}_j(t_k))$ , assumendo  $B(t_k)$  e  $\bar{D}_j(t_k)$  eventi indipendenti.

Utilizziamo anche in questo caso il teorema di Bayes:

$$\begin{aligned} \alpha_i(t_k) &= P\left(A_i|B(t_{k-1}), \bar{D}_j(t_k)\right) = \frac{P(A_i B(t_{k-1}) \bar{D}_j(t_k))}{P(B(t_{k-1}) \bar{D}_j(t_k))} \\ &= P(A_i|B(t_{k-1})) \frac{P(\bar{D}_j(t_k) | A_i)}{P(\bar{D}_j(t_k))} = \frac{M \alpha_i(t_{k-1}) \gamma_{ij}(t_0, t_k)}{\sum_{i=1}^M \gamma_{ij}(t_0, t_k)} \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

