

Appendice I
Studio relativo a Formazione
e Trasporto di Nebbia

Doc. No. P0012790-5-H1 Rev.0 - Agosto 2019



IVI Petrolifera S.p.A. Santa Giusta (OR), Italia

Impianto di Stoccaggio, Rigassificazione e Distribuzione GNL nel Porto di Oristano- Santa Giusta

Studio Relativo a Formazione e Trasporto di Nebbia


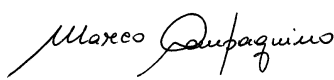
Doc. No. P0012790-5-H4 Rev.0 - Agosto 2019

Rev.	0
Descrizione	Prima Emissione
Preparato da	Arianet Srl
Controllato da	A. Puppo
Approvato da	M.Compagnino
Data	Agosto 2019

**Impianto di Stoccaggio, Rigassificazione e Distribuzione
GNL nel Porto di Oristano-Santa Giusta**

Studio Relativo a Formazione e Trasporto di Nebbia



Rev.	Descrizione	Preparato da	Controllato da	Approvato da	Data
0	Prima Emissione	Arianet Srl	 A. Puppo	 M. Compagnino	Agosto 2019

Tutti i diritti, traduzione inclusa, sono riservati. Nessuna parte di questo documento può essere divulgata a terzi, per scopi diversi da quelli originali, senza il permesso scritto di RINA Consulting S.p.A.

INDICE

	Pag.
LISTA DELLE TABELLE	2
LISTA DELLE FIGURE	2
1 INTRODUZIONE	4
2 METODOLOGIA UTILIZZATA	6
3 SCELTA DELLE SITUAZIONI METEOROLOGICHE	7
3.1 IL SITO DI PROGETTO	7
3.2 CONDIZIONI METEOCLIMATICHE LOCALI	7
3.3 IL SISTEMA QUALEARIA E I DATI METEO SUL SITO	10
4 STIMA DELLE CONDIZIONI TERMODINAMICHE INIZIALI MEDIANTE IL CODICE CODE_SATURNE	19
4.1 CASO CON FLUSSO DA MARE	22
4.2 CASO CON FLUSSO DA TERRA	25
5 DOMINI DI CALCOLO PER IL MODELLO SPRAY	28
5.1 CASO CON FLUSSO DA MARE	28
5.2 CASO CON FLUSSO DA TERRA	29
6 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI CON MODELLO SPRAY	32
6.1 CASO CON FLUSSO DA MARE	33
6.2 CASO CON FLUSSO DA TERRA	37
7 CONCLUSIONI	41
REFERENZE	42
APPENDICE A: IL CODICE CODE_SATURNE	
APPENDICE B: I CODICI SWIFT, SURFPRO E SPRAY	

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 3.1:	Riassunto delle principali grandezze meteorologiche nelle due situazioni identificate	18
Tabella 4.1:	Caratteristiche del Sistema di Evaporazione Fornite dal Costruttore	20
Tabella 4.2:	Riassunto delle principali grandezze meteorologiche in uscita dal singolo vaporizzatore simulate dal codice Code_Saturne	24
Tabella 4.3:	Riassunto delle principali grandezze meteorologiche in uscita dal singolo vaporizzatore simulate dal codice Code_Saturne	27

LISTA DELLE FIGURE

Figura 3.1:	Posizione dell'Impianto di Rigassificazione, Contenuta all'Interno del Circolo Rosso	7
Figura 3.2:	Posizione dell'Anemometro di Capo Frasca Rispetto all'Impianto di Rigassificazione	8
Figura 3.3:	Stazione Meteoclimatica di Capo Frasca, Grafico delle Massime, Minime e Medie delle medie Mensili delle Temperature [°C] (Periodo 1971 – 2000) (Aeronautica Militare – Servizio Meteorologico, Climatologia Sito web)	8
Figura 3.4:	Rosa dei venti climatologica, anni 1971-1990, dati SMAM stazione di Capo Frasca	9
Figura 3.5:	Rosa dei Venti Annuale 2017 presso il Sito del Terminale di Rigassificazione (Modello WRF)	10
Figura 3.6:	QualeAria: Domini di Riferimento Meteorologico e di Dispersione del Sistema Modellistico	11
Figura 3.7:	Esempio di output del sistema QualeAria: campo di vento al suolo sul dominio interno nazionale.	12
Figura 3.8:	Area complessiva di copertura dei punti meteorologici QualeAria sul territorio nazionale	13
Figura 3.9:	Dettaglio della copertura dei punti meteorologici QualeAria sulla Sardegna	13
Figura 3.10:	Confronto tra la rosa dei venti annuali WRF 2017 (sinistra) e QualeAria 2018 (destra) nella posizione della stazione di rigassificazione	14
Figura 3.11:	Rose dei venti QualeAria 2018 diurna (destra) e notturna (destra) nella posizione della stazione di rigassificazione	15
Figura 3.12:	Temperature medie mensili climatologiche misurate a capo Frasca (sinistra) ed estratte dal database QualeAria 2018 nella posizione della stazione di rigassificazione (destra)	15
Figura 3.13:	Andamento della velocità e direzione del vento in prossimità del suolo estratti dal database QualeAria 2018 nella posizione della stazione di rigassificazione il giorno 15/1/2018	16
Figura 3.14:	Andamento della temperatura dell'aria ed umidità relativa in prossimità del suolo estratti dal database QualeAria 2018 nella posizione della stazione di rigassificazione il giorno 15/1/2018	17
Figura 3.15:	Andamento della pressione atmosferica al suolo estratta dal database QualeAria 2018 nella posizione della stazione di rigassificazione il giorno 15/1/2018	17
Figura 4.1	Elementi del Sistema di Vaporizzazione e della Struttura dei Ventilatori	19
Figura 4.2:	Disposizione dei 6+6 vaporizzatori	19
Figura 4.3:	Rappresentazione tridimensionale del dominio di calcolo e del grigliato di celle in cui è suddiviso.	22
Figura 4.4:	Sezione verticale al centro del canale della componente verticale della velocità dell'aria simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria. Valori in m/s secondo la scala a sinistra	23
Figura 4.5:	Sezione verticale al centro del canale della temperatura dell'aria simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria valori in °C secondo la scala colorata a sinistra	23
Figura 4.6:	Sezione verticale al centro del canale contenuto specifico di acqua liquida espresso in kg/kg, simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria	24

Figura 4.7:	Sezione verticale al centro del canale della componente verticale della velocità dell'aria simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria. Valori in m/s secondo la scala a sinistra	25
Figura 4.8:	Sezione verticale al centro del canale della temperatura dell'aria simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria valori in °C secondo la scala colorata a sinistra	26
Figura 4.9:	Sezione verticale al centro del canale contenuto specifico di acqua liquida espresso in kg/kg, simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria	26
Figura 5.1:	Dominio di calcolo con uso del suolo CORINE 21 classi a 100 m di risoluzione e iso-linee dei livelli orografici, nel caso con flusso da mare. Il punto rosso indica la posizione della sorgente (vaporizzatori GNL)	28
Figura 5.2:	Grigliato orizzontale del dominio innestato della simulazione di dispersione rispetto al dominio della simulazione meteorologica, nel caso con flusso da mare. Il punto rosso indica la posizione della sorgente (vaporizzatori GNL)	29
Figura 5.3:	Grigliato orizzontale del dominio della simulazione di dispersione, nel caso con flusso da mare. Il punto rosso indica la posizione del centro geometrico della sorgente (vaporizzatori GNL)	29
Figura 5.4:	Dominio di calcolo con uso del suolo CORINE 21 classi a 100 m di risoluzione e iso-linee dei livelli orografici, nel caso con flusso da terra. Il punto rosso indica la posizione della sorgente	30
Figura 5.5:	Grigliato orizzontale del dominio innestato della simulazione di dispersione rispetto al dominio della simulazione meteorologica, nel caso con flusso da terra. Il punto rosso indica la posizione della sorgente (vaporizzatori GNL)	31
Figura 5.6:	Grigliato orizzontale del dominio della simulazione di dispersione, nel caso con flusso da terra. Il punto rosso indica la posizione del centro geometrico della sorgente (vaporizzatori GNL)	31
Figura 6.1:	Rappresentazione tridimensionale della nube di aria umida visibile nel caso di flusso da mare, in termini di contenuto specifico di acqua liquida pari a 0.05 g/kg	33
Figura 6.2:	Contenuto specifico di acqua liquida al suolo q_l nel caso con flusso da mare. Valori in g/kg.	34
Figura 6.3:	Umidità relativa nel caso con flusso di mare. Valori in %	35
Figura 6.4:	Isolinee di temperatura nel caso con flusso di mare. Valori in gradi Celsius	35
Figura 6.5:	Isosuperfici della lunghezza di visibilità in prossimità del suolo espressa in m (scala colorata a destra), calcolate secondo la formula di Kunkel	36
Figura 6.6:	Rappresentazione tridimensionale della nube di aria umida visibile nel caso di flusso da terra, in termini di contenuto specifico di acqua liquida pari a 0.05 g/kg	37
Figura 6.7:	Contenuto specifico di acqua liquida al suolo q_l nel caso con flusso da terra. Valori in g/kg	38
Figura 6.8:	Umidità relativa nel caso con flusso di terra. Valori in %	39
Figura 6.9:	Isolinee di temperatura nel caso con flusso di terra. Valori in gradi Celsius	39
Figura 6.10:	Isosuperfici della lunghezza di visibilità in prossimità del suolo espressa in m (scala colorata a destra), calcolate secondo la formula di Kunkel	40

1 INTRODUZIONE

La società IVI Petrolifera S.p.A. intende realizzare all'interno dell'area del Porto Industriale di Oristano un impianto per lo stoccaggio, la rigassificazione e la distribuzione di Gas Naturale Liquefatto (GNL).

Il progetto prevede la realizzazione degli interventi infrastrutturali e impiantistici necessari a consentire:

- ✓ l'approvvigionamento del GNL all'impianto, mediante navi metaniere di capacità pari a circa 4,000 m³;
- ✓ il trasferimento del prodotto liquido al sistema di stoccaggio, costituito da No. 9 serbatoi criogenici da 1,000 m³ ciascuno;
- ✓ la rigassificazione del GNL tramite l'utilizzo di 6+6 vaporizzatori ad aria a circolazione forzata;
- ✓ la distribuzione del prodotto attraverso operazioni di caricamento su bettoline ("terminal to ship") e camion ("terminal to truck").

L'impianto prevede, per la realizzazione del processo di rigassificazione del GNL, l'utilizzo simultaneo di 12 vaporizzatori ad aria a circolazione forzata, dei quali ciclicamente 6 operativi per consentire il cambiamento di stato del liquido e 6 in fase di defrosting. Tale configurazione consente di raggiungere la massima capacità richiesta di 100 m³/h di GNL rigassificato, corrispondente ad una produzione di circa 60,000 Nm³/h di gas naturale.

Una conseguenza relativa all'utilizzo di aria come fluido riscaldante per la vaporizzazione del GNL è la formazione di nebbia durante il processo di scambio termico. L'aria è infatti una miscela contenente una componente secca insieme a vapore d'acqua. Quando l'aria, cedendo energia al GNL per il processo di rigassificazione, si raffredda, raggiunge facilmente la saturazione e parte del vapore d'acqua contenuto tende a condensare formando goccioline che determinano la presenza di nebbia. Il problema può essere inoltre amplificato dalla presenza di più unità di vaporizzazione che lavorano nello stesso momento, generando quantitativi di nebbia potenzialmente rilevanti.

IVI Petrolifera ha presentato, in data 9 Agosto 2018, istanza per l'avvio della procedura integrata di VIA-Valutazione di Incidenza per il progetto descritto, unitamente alla documentazione necessaria prevista dalla vigente normativa in materia (D.Lgs. 152/06), la quale è stata pubblicata sul sito del MATTM.

Nell'ambito della procedura VIA, sono pervenute le seguenti richieste di integrazione/osservazioni da parte delle Autorità Competenti inerenti alla documentazione presentata nell'Agosto 2018:

- ✓ No.15 richieste di integrazioni della Direzione Generale per le Valutazioni e le Autorizzazioni Ambientali (DVA) del Ministero dell'Ambiente del 3 Giugno 2019, predisposte dalla Commissione tecnica di verifica dell'impatto ambientale VIA e VAS (CTVA);
- ✓ No.11 richieste di integrazioni della Direzione Generale Archeologia, Belle Arti e Paesaggio (Servizio V – Tutela del Paesaggio) del Ministero per i Beni e le Attività Culturali del 31 Ottobre 2018;
- ✓ No.18 osservazioni della Regione Sardegna (Assessorato della Difesa dell'Ambiente) del 25 Marzo 2019.

In particolare, la seconda richiesta di integrazione al Quadro Ambientale della CTVA richiede di *"approfondire con simulazioni, nello scenario con rigassificatore, gli effetti sul microclima in particolare per la adiacente area Natura 2000 (Stagno di Santa Giusta) per quanto riguarda la formazione di nebbie causata dall'esercizio del rigassificatore"*. Inoltre, l'osservazione No. 13 della Regione Sardegna riporta quanto segue: *"dovranno essere meglio indagati gli effetti sul microclima della formazione di nebbia causata dal funzionamento del rigassificatore, provvedendo a valutare gli impatti potenziali sulla salute pubblica e sugli ecosistemi, considerando anche la vicinanza con i siti della Rete natura 2000 e valutando eventuali rischi per la circolazione stradale e la navigazione"*. Infine, il parere ARPAS allegato alle osservazioni della Regione Sardegna *"richiede al proponente di fornire ulteriori informazioni che consentano una stima del possibile impatto ambientale sul territorio connesso alla produzione di nebbia causata dal processo di rigassificazione del GNL."*

Scopo del presente studio è pertanto la valutazione della consistenza e del trasporto della nebbia che si viene a generare a causa del funzionamento a regime del sistema di vaporizzazione. Il rapporto è strutturato come segue:

- ✓ al Capitolo 2 è descritta la metodologia utilizzata per lo sviluppo dello studio;
- ✓ nel Capitolo 3 sono identificati gli scenari meteorologici considerati nelle simulazioni modellistiche;
- ✓ il Capitolo 4 è relativo alla stima delle condizioni termodinamiche iniziali, quantificate con l'utilizzo del codice "Code_Saturne";

- ✓ nel Capitolo 5 sono delineati i domini di calcolo per il modello “Spray”;
- ✓ nel Capitolo 6 sono esposti i risultati delle simulazioni condotte con il modello “Spray”;
- ✓ al Capitolo 7 sono sintetizzate le conclusioni dello studio.

Per la preparazione del presente documento, RINA Consulting si è avvalsa del supporto scientifico della società ARIANET Srl, nelle persone di:

- ✓ Dott. Gianni Luigi Tinarelli
- ✓ Dott. Giuseppe Carlino

Vengono quindi realizzate simulazioni modellistiche in grado di definire le caratteristiche del fluido atmosferico a valle dei vaporizzatori con eventuale formazione di nebbia, nonché il trasporto di quest’ultima ipotizzando le due distinte situazioni verso le regioni critiche indicate dal MATTM, ovvero con flusso atmosferico diretto verso lo Stagno di Santa Giusta oppure verso il mare. Attraverso i risultati delle simulazioni è possibile quindi valutare sia l’estensione spaziale della nebbia, degli effetti di visibilità al suo interno e della regione all’interno della quale le condizioni atmosferiche di temperatura ed umidità risultano modificate rispetto a quelle che sarebbero presenti in assenza del sistema di vaporizzazione, consentendo una valutazione degli effetti che potenzialmente determinano.

2 METODOLOGIA UTILIZZATA

Per la realizzazione del presente lavoro, è stato necessario l'utilizzo di metodologie modellistiche differenti, in grado di descrivere i processi in gioco a diverse scale spaziali e temporali. I modelli e il livello di dettaglio utilizzati hanno un grado di complessità tale da non consentire la realizzazione di simulazioni su lungo periodo: è quindi necessario identificare situazioni meteorologiche rappresentative da un lato di situazioni caratteristiche del sito e dall'altro di situazioni di interesse specifico rispetto ai potenziali impatti della formazione di nebbie connesse al processo di vaporizzazione del GNL.

Complessivamente, la metodologia utilizzata può essere riassunta nei seguenti punti dettagliati nei capitoli successivi:

- scelta delle situazioni meteorologiche: sulla base di un database di risultati di simulazioni meteorologiche su scala nazionale, vengono analizzati i dati in prossimità del sito e scelte due situazioni significative che rappresentano da un lato il flusso atmosferico in direzione dell'entroterra, ovvero verso il sito Natura 2000 (SIC) "Stagno di Santa Giusta" e dall'altro verso il porto e il mare. Le informazioni vengono poi utilizzate sia per definire le condizioni atmosferiche dell'aria utilizzata in ingresso al sistema di vaporizzazione, sia le condizioni di trasporto/dispersione e trasformazione termodinamica dell'atmosfera incontrate all'uscita dal vaporizzatore;
- caratterizzazione delle condizioni dell'aria all'uscita del sistema di vaporizzazione ad aria forzata: viene allo scopo utilizzato il modello di Computational Fluid Dynamic (CFD) Code_Saturne, in grado di simulare il flusso di aria forzata dal sistema di ventilazione all'interno di ognuno degli elementi attivi del sistema di vaporizzazione. Il modello calcola l'eventuale trasformazione del vapore presente nell'aria in ingresso in acqua liquida, determinato dalla cessione di energia dell'aria mediante scambio termico con le tubazioni che contengono il GNL nel vaporizzatore, all'interno delle quali avviene la trasformazione di fase in gas. Le simulazioni vengono effettuate considerando le due diverse condizioni atmosferiche scelte al punto precedente e forniscono le caratteristiche del flusso d'aria in uscita dal vaporizzatore, che costituiscono l'input da utilizzare per le simulazioni successive;
- configurazione dei domini di calcolo per il modello tridimensionale di dispersione lagrangiano a particelle SPRAY, che simula il pennacchio atmosferico umido contenente acqua in fase liquida generato dal vaporizzatore. I domini vengono scelti in funzione delle caratteristiche di direzione prevalente del vento in ognuna delle due situazioni considerate. In ognuno dei due domini vengono estratte le informazioni necessarie per la realizzazione delle simulazioni con il modello SPRAY, ovvero il profilo orografico e le caratteristiche di uso del suolo;
- simulazione tridimensionale mediante il codice SPRAY della dispersione del pennacchio umido. Le due simulazioni, realizzate in condizioni stazionarie, prevedono preventivamente la ricostruzione delle condizioni meteorologiche di temperatura, flusso medio e turbolenza mediante l'utilizzo dei codici SWIFT e SurfPro. Le simulazioni con il codice SPRAY forniscono le informazioni per il calcolo in ogni punto del dominio di calcolo del contenuto di acqua in fase liquida, che determina l'eventuale presenza di nebbia. Viene quindi ricostruita la struttura tridimensionale della regione dello spazio all'interno della quale è possibile la presenza di nebbia, nonché l'estensione rispetto alla zona di origine, nelle due direzioni di trasporto. In aggiunta, è possibile l'identificazione della regione dello spazio all'interno della quale le condizioni di umidità risultano modificate rispetto alla situazione in assenza del vaporizzatore. Quest'ultimo punto permette in particolare una valutazione dell'eventuale impatto, nella situazione di flusso indirizzato verso l'entroterra, di condizioni modificate nella zona dello Stagno di Santa Giusta.

3 SCelta DELLE SITUAZIONI METEOROLOGICHE

3.1 IL SITO DI PROGETTO

Nel presente paragrafo si richiamano le caratteristiche essenziali utili alla scelta delle situazioni meteorologiche da prendere in considerazione.

L'area scelta per l'installazione dell'impianto ricade all'interno della zona industriale e portuale di Oristano-Santa Giusta, in una zona compresa nel perimetro di competenza del Consorzio Industriale Provinciale Oristanese (CIPOR).

La Figura 3.1 illustra la posizione del progettato impianto (contenuto nell'area all'interno del circolo rosso in figura) e mette in evidenza la presenza di una situazione orografica costiera, dove è prevedibile la presenza di un flusso orientato principalmente lungo la direzione ortogonale alla linea di costa con il verso che segue le caratteristiche tipiche della brezza. Ad Est dell'impianto, a circa 2 km da quest'ultimo, inizia lo stagno di Santa Giusta mentre la zona portuale di attracco si trova verso Ovest ad una distanza minima di circa 200 metri.



Figura 3.1: Posizione dell'Impianto di Rigassificazione, Contenuta all'Interno del Circolo Rosso

Per la descrizione di dettaglio del sito di progetto si rimanda allo Studio di Impatto Ambientale (documento No. P0006938-1-H8 Rev. 0 – Agosto 2018).

3.2 CONDIZIONI METEOCLIMATICHE LOCALI

Le condizioni meteorologiche e climatiche tipiche della zona, che costituiscono la base della scelta dei due periodi di simulazione, sono descritte in dettaglio nel già citato SIA dell'Agosto 2018, di cui si riportano nel seguito i contenuti salienti.

I dati di riferimento utilizzati sono ottenuti dalle misure sul periodo climatologico 1971-2000 della stazione meteorologica di Capo Frasca, localizzata alle coordinate 39° 44' 23.59" N, 8° 27' 34.15" E, e posizionata 95 metri sul livello del mare, circa 16 km a Sud-Ovest del progettato impianto, come indicato in Figura 3.2.

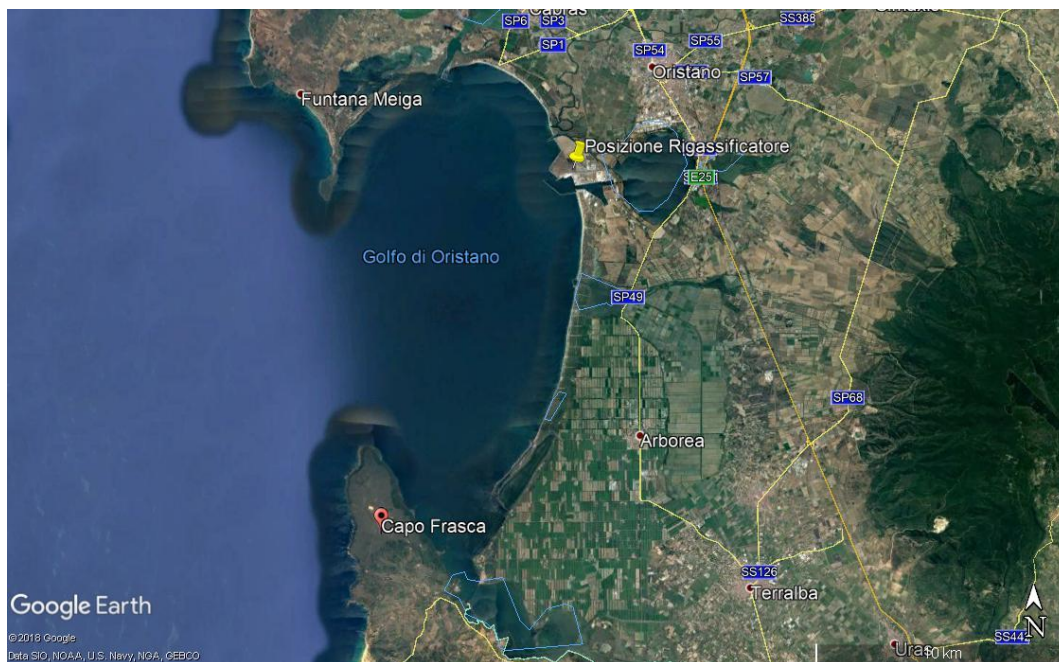


Figura 3.2: Posizione dell'Anemometro di Capo Frasca Rispetto all'Impianto di Rigassificazione

Durante il periodo climatologico considerato, i valori medi, minimi e massimi della temperatura misurati presso la stazione sono rappresentati in Figura 3.3.

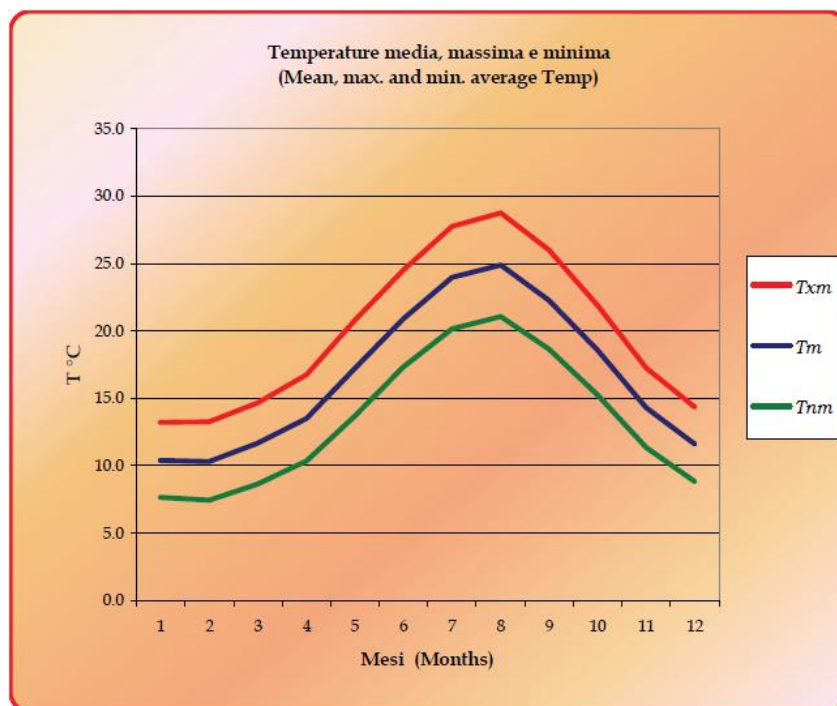


Figura 3.3: Stazione Meteoclimatica di Capo Frasca, Grafico delle Massime, Minime e Medie delle medie Mensili delle Temperature [°C] (Periodo 1971 – 2000) (Aeronautica Militare – Servizio Meteorologico, Climatologia Sito web)

Gli andamenti di temperatura mostrano la presenza di condizioni relativamente miti, con i valori minimi delle medie mensili che non scendono al di sotto di 7.5 °C.

Per quanto riguarda le condizioni anemologiche, la Figura 3.4 rappresenta la rosa dei venti climatologica, con suddivisione non dettagliata di settori di provenienza del vento (45 gradi) e di intensità del vento, misurata presso la stazione di Capo Frasca nel periodo climatologico considerato. Dalla Figura 3.2 si nota come la linea di costa, nell'area della stazione meteorologica, risulta essere piegata in direzione da Sud-Ovest verso Nord-Est rispetto a quanto accade nella zona dell'impianto. Ciò giustifica le caratteristiche della rosa dei venti che, nonostante la suddivisione non dettagliata in direzioni, descrive due direzioni principali di flusso, da Nord-Ovest e Sud-Est, corrispondenti alle caratteristiche della brezza di mare nella zona dell'anemometro. È lecito quindi attendersi, nella zona della stazione di rigassificazione, una rosa dei venti con direzioni più polarizzate da Ovest e da Est, che rappresenterebbero le direttrici di provenienza del vento di maggiore interesse in questo lavoro.

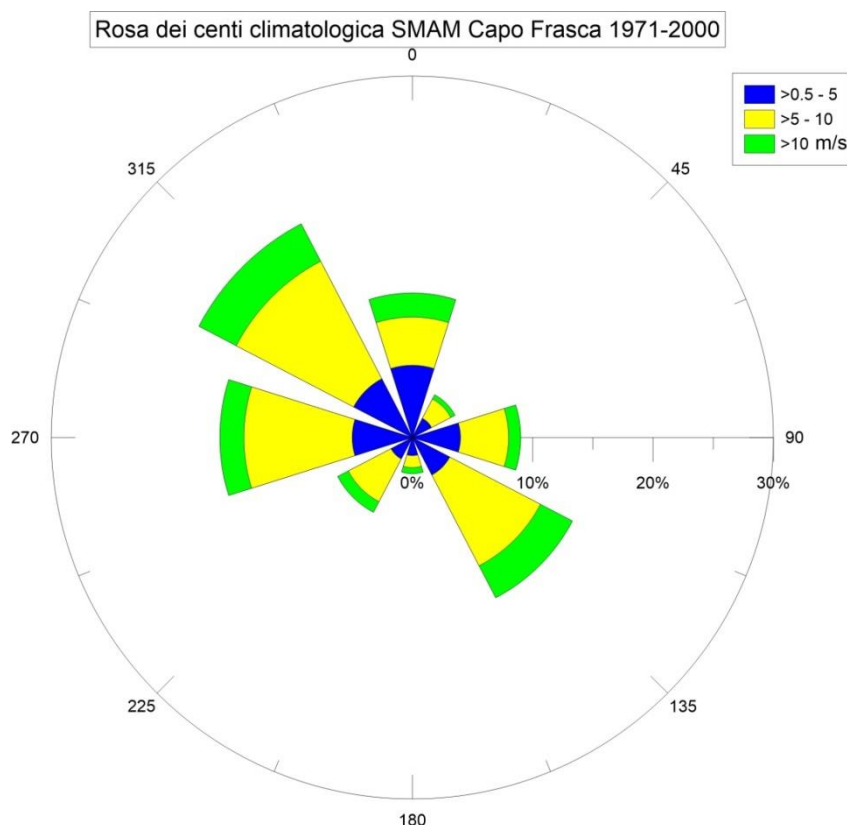


Figura 3.4: Rosa dei venti climatologica, anni 1971-1990, dati SMAM stazione di Capo Frasca

Nell'ambito dello SIA Agosto 2018, sono state condotte simulazioni modellistiche della dispersione dei fumi emessi dal traffico navale indotto dall'operatività dell'impianto. Per la realizzazione di tali simulazioni sono stati utilizzati dati anemologici provenienti da simulazioni realizzate con il modello meteorologico alle equazioni primitive WRF per l'anno 2017. La rosa dei venti annuale estratta dai dati al suolo in prossimità dell'impianto è descritta in Figura 3.5.

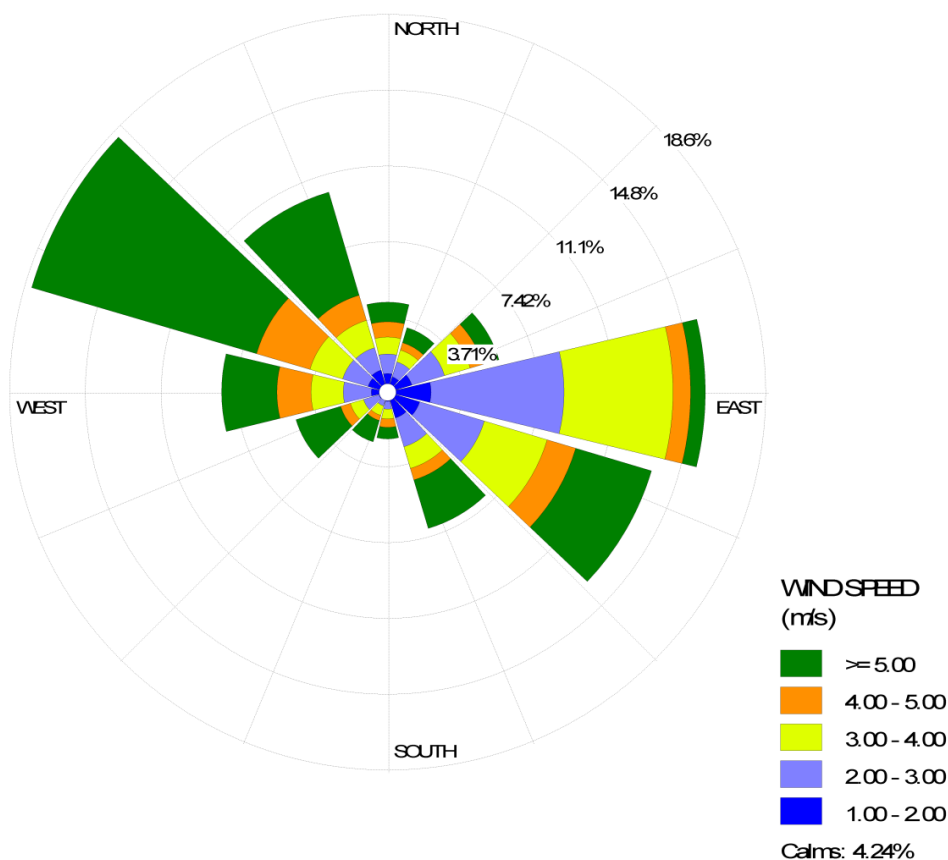


Figura 3.5: Rosa dei Venti Annuale 2017 presso il Sito del Terminale di Rigassificazione (Modello WRF)

La Figura 3.5 mostra in effetti la presenza di un flusso atmosferico polarizzato su due direzioni principali, più ruotate verso Est e Ovest rispetto a quelle indicate dall'anemometro di Capo Frasca, con intensità del vento mediamente più elevate dai quadranti di provenienza occidentali corrispondenti a condizioni di vento dal mare.

Per la realizzazione delle simulazioni descritte nel presente lavoro sono stati utilizzati i dati più aggiornati (relativi all'intero anno 2018) disponibili dal modello meteorologico alle equazioni primitive RAMS [1] simile al codice WRF, resi disponibili da un sistema di previsioni operativo da diversi anni presso ARIANET S.r.l., previa verifica di consistenza di tali dati con quelli caratteristici del sito descritti in precedenza. Nel seguito viene riportata una descrizione di tale database.

3.3 IL SISTEMA QUALEARIA E I DATI METEO SUL SITO

Per la realizzazione delle simulazioni di dispersione a scala locale con il modello lagrangiano a particelle SPRAY è necessario disporre di un insieme di dati meteorologici tridimensionali, che riproduca realisticamente le caratteristiche meteorologiche del dominio sotto investigazione. Per questo scopo sono disponibili i dati meteorologici prodotti dal sistema di previsione QualeAria (<http://www.aria-net.eu/QualeAria>), un sistema modellistico che produce previsioni meteorologiche e di qualità dell'aria in grado di coprire tutto il territorio nazionale, operativo in continuo dall'anno 2010.

QualeAria produce ogni giorno dell'anno campi meteorologici su base oraria mediante il modello prognostico RAMS (Pielke et al., 1995) e campi di concentrazione per gli inquinanti normati, mediante il codice fotochimico FARM sui domini rappresentati in Figura 3.6.

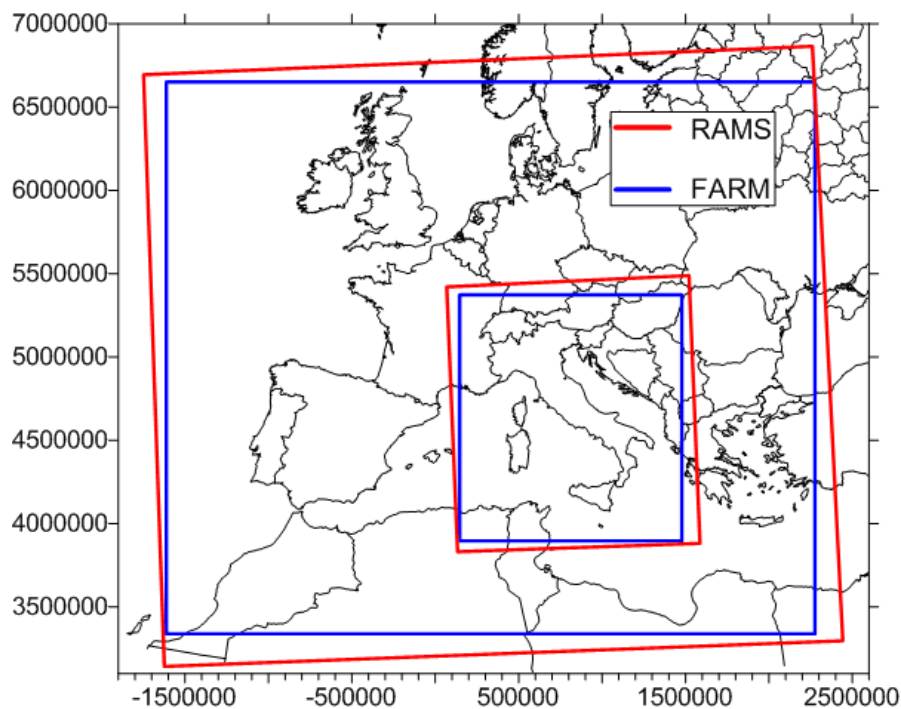


Figura 3.6: QualeAria: Domini di Riferimento Meteorologico e di Dispersione del Sistema Modellistico

Il sistema è attivo su due domini innestati, il più interno dei quali a scala nazionale ed a risoluzione orizzontale di circa 10 km.

La Figura 3.7 mostra un esempio di output meteorologico del sistema modellistico e rappresenta un campo di vento al suolo sul territorio nazionale.

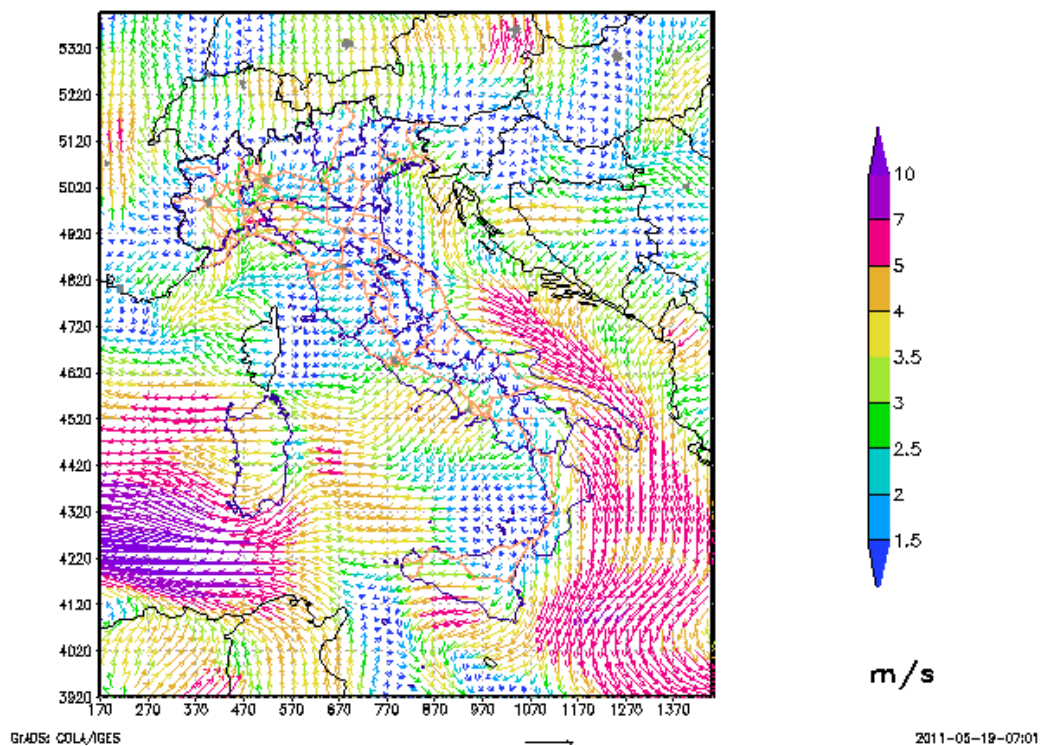


Figura 3.7: Esempio di output del sistema QualeAria: campo di vento al suolo sul dominio interno nazionale.

Per le simulazioni oggetto del presente lavoro è stato scelto l'anno 2018, il più recente completo. L'area interessata dalle simulazioni meteorologiche del sistema QualeAria copre interamente la zona di simulazione localizzata in Sardegna, come indicato in Figura 3.8 e in Figura 3.9.



Figura 3.8: Area complessiva di copertura dei punti meteorologici QualeAria sul territorio nazionale



Figura 3.9: Dettaglio della copertura dei punti meteorologici QualeAria sulla Sardegna

Il dataset QualeAria contiene i campi meteorologici tridimensionali (matrici di vento, temperatura e umidità) e bidimensionali (precipitazione e copertura nuvolosa) a risoluzione temporale oraria in grado di alimentare il sistema di downscaling costituito dai modelli diagnostici SWIFT e SurfPro necessari al codice SPRAY. Il compito delle simulazioni meteorologiche mediate i codici diagnostici sul dominio e alla risoluzione target è quello di ricalibrare localmente l'informazione proveniente dal dataset QualeAria, caratteristico di un contesto più ampio, consentendo un migliore incanalamento del flusso rispetto all'orografia e l'uso del suolo locali.

Sono stati quindi estratti per l'intero anno 2018 i dati anemologici in prossimità del suolo presso il sito dell'impianto di rigassificazione, che hanno generato la rosa dei venti annuale confrontata con quella relativa alle simulazioni WRF per l'anno 2017 nella Figura 3.10. Il confronto mostra la sostanziale corrispondenza tra le due rose dei venti che riportano entrambe lo stesso tipo di polarizzazione e percentuali simili per le classi di intensità del vento. Vi è, nel 2018, una minore incidenza statistica dei dati di provenienza da Est (che rimane comunque una delle principali), dovuta probabilmente alle condizioni di un differente anno.

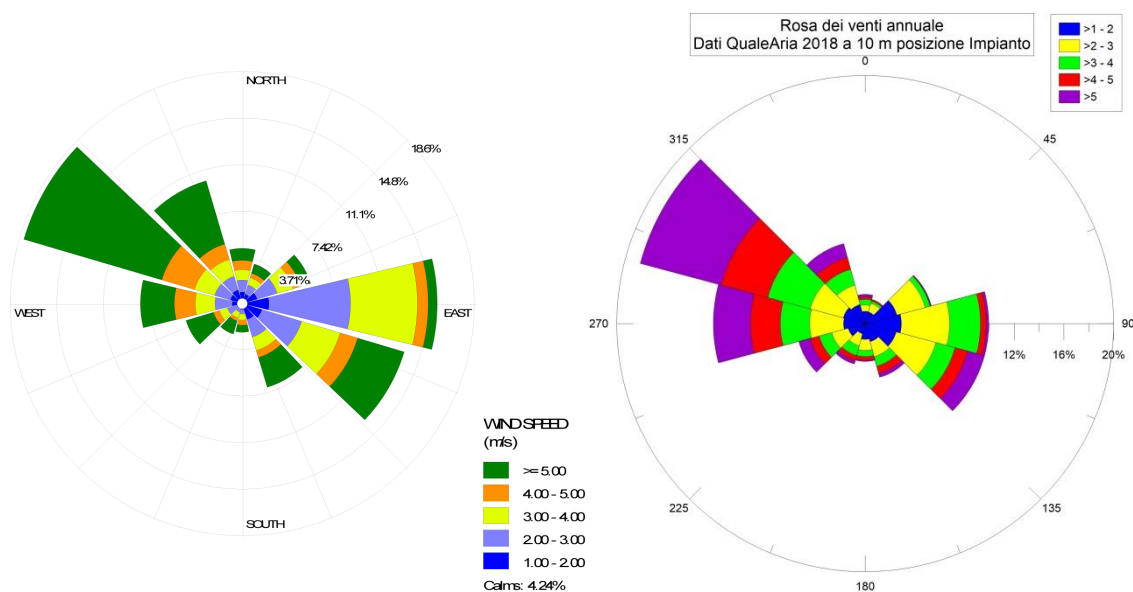


Figura 3.10: Confronto tra la rosa dei venti annuali WRF 2017 (sinistra) e QualeAria 2018 (destra) nella posizione della stazione di rigassificazione

La Figura 3.11 mostra la suddivisione giorno-notte della rosa dei venti annuale 2018 estratta dal dataset QualeAria che evidenzia una maggiore incidenza dei venti da Ovest durante le ore diurne e la presenza di una più consistente percentuale di venti dall'entroterra nelle ore notturne, come lecito attendersi nel sito in esame caratterizzato da cicli di brezza costiera. Le due direzioni del vento di maggiore interesse, da Ovest e da Est, caratterizzano situazioni complessivamente di circa il 23 % dei casi totali nell'anno con intensità del vento significativa, e possono essere quindi considerate nella scelta delle configurazioni meteorologiche da utilizzare nelle simulazioni.

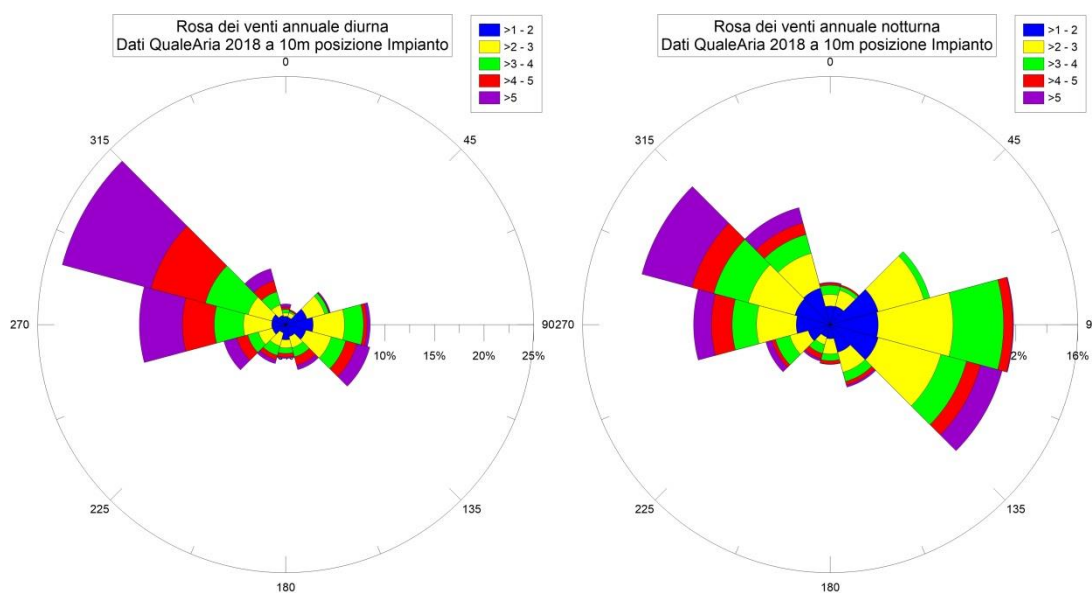


Figura 3.11: Rose dei venti QualeAria 2018 diurna (destra) e notturna (destra) nella posizione della stazione di rigassificazione

In Figura 3.12 è invece riportato l'andamento delle medie mensili di temperatura estratte dal dataset delle simulazioni meteorologiche QualeAria per l'anno 2018 in prossimità del suolo, confrontato in questo caso con le statistiche climatologiche misurate a Capo Frasca. Anche in questo caso è evidente come i dati estratti dal database QualeAria risultano consistenti con i valori della climatologia media nella zona.

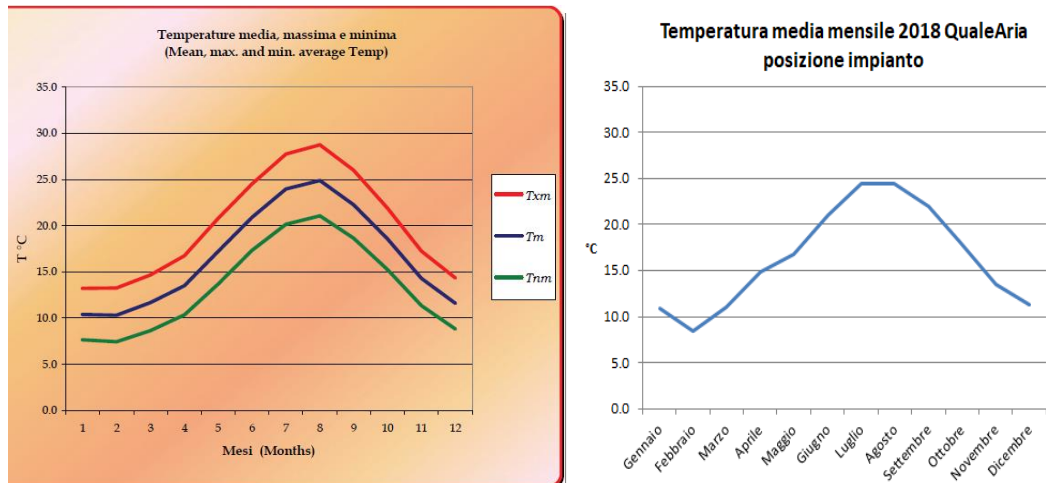


Figura 3.12: Temperature medie mensili climatologiche misurate a capo Frasca (sinistra) ed estratte dal database QualeAria 2018 nella posizione della stazione di rigassificazione (destra)

I dati meteorologici di vento, temperatura, umidità relativa e pressione atmosferica della serie temporale annuale QualeAria estratti presso la posizione dell'impianto sono stati quindi analizzati allo scopo di ricercare due situazioni aventi le seguenti caratteristiche generali, tali da configurare da un lato scenari conservativi di massimizzazione della dispersione delle nebbie e dall'altro di rappresentare comunque situazioni realistiche:

- ✓ ciascuna situazione deve appartenere ad un regime di circolazione con direzione del vento di interesse, la prima con flusso di provenienza da mare e direzione da Ovest (circa 270°), in grado di trasportare il pennacchio umido prodotto dal sistema di vaporizzazione verso lo stagno di Santa Giusta, attraversando le

strade ad Est dell'impianto e la seconda con direzione del vento esattamente opposta (circa 90°) in grado di trasportare il pennacchio verso la zona del porto;

- ✓ in ciascuna situazione l'intensità del vento deve essere statisticamente significativa ma su valori non troppo elevati, per evitare situazioni nelle quali la nebbia viene rapidamente dissipata dinamicamente, permettendo invece un eventuale trasporto dalla zona di origine verso le regioni critiche;
- ✓ in entrambe le situazioni la temperatura dell'aria deve essere realistica ma corrispondente a valori più critici per il sistema di vaporizzazione ovvero sui valori più bassi delle medie climatologiche. In particolare, dato che il sistema di vaporizzazione non è in grado di funzionare autonomamente con temperature dell'aria < 15 °C, vengono forzatamente cercate situazioni con temperature inferiori a tale limite, che configurano situazioni potenzialmente più critiche;
- ✓ volendo considerare situazioni che determinano più facilmente la formazione di nebbia all'uscita del sistema di vaporizzazione, si richiede che le situazioni siano caratterizzate da umidità relativa elevata, superiore all'80%, con valori più alti nella situazione con vento di provenienza dal mare;
- ✓ presenza di condizioni meteorologiche sufficientemente stazionarie,

L'analisi dei dati disponibili ha portato ad identificare due situazioni di interesse all'interno della giornata invernale del 15/1/2018. La Figura 3.13, la Figura 3.14 e la Figura 3.15 mostrano rispettivamente l'andamento temporale orario durante tale giornata di velocità e direzione del vento, temperatura dell'aria e umidità relativa e pressione atmosferica.

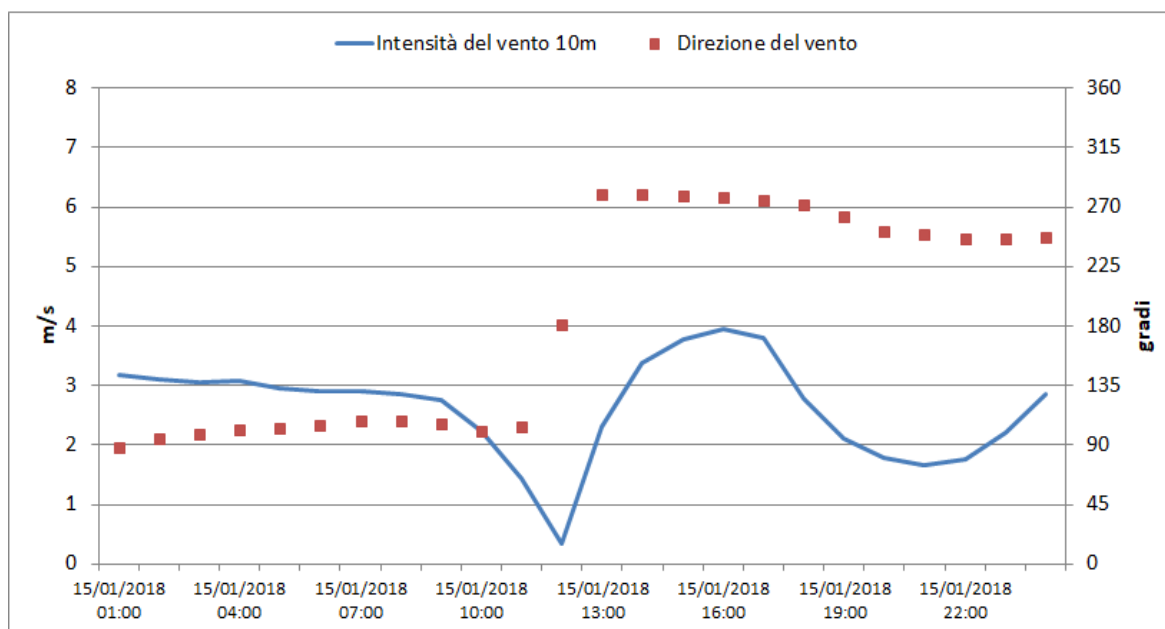


Figura 3.13: Andamento della velocità e direzione del vento in prossimità del suolo estratti dal database QualeAria 2018 nella posizione della stazione di rigassificazione il giorno 15/1/2018

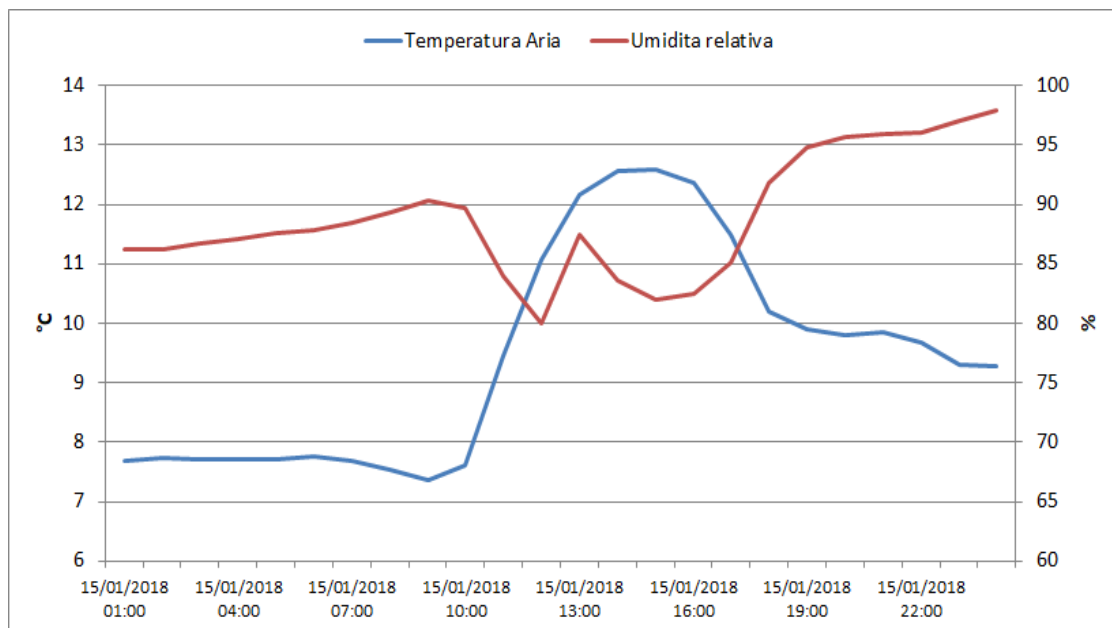


Figura 3.14: Andamento della temperatura dell'aria ed umidità relativa in prossimità del suolo estratti dal database QualeAria 2018 nella posizione della stazione di rigassificazione il giorno 15/1/2018

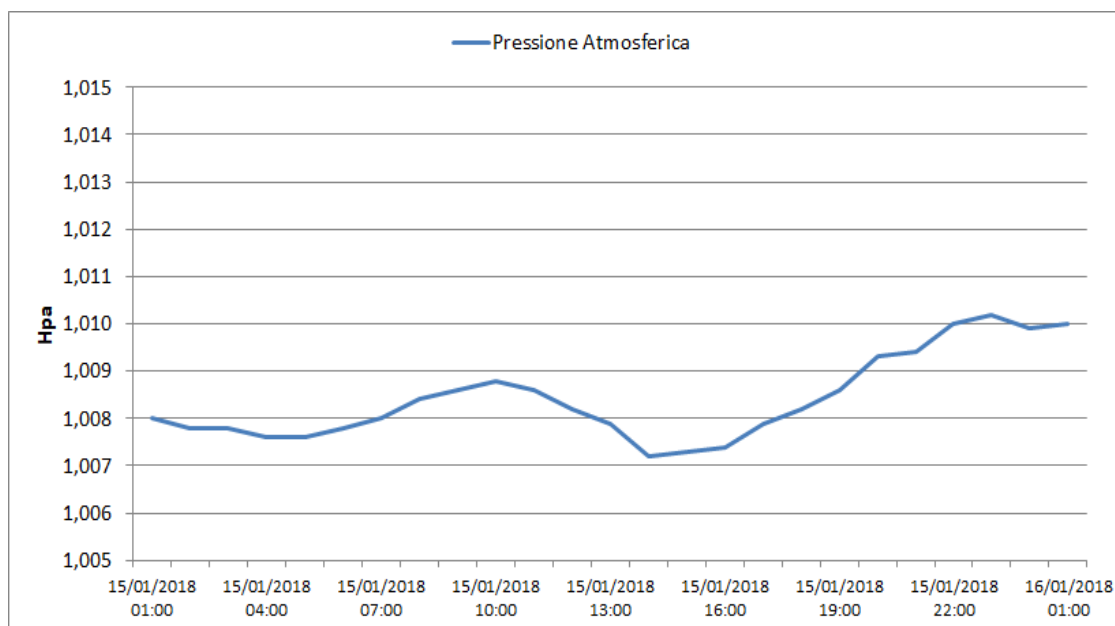


Figura 3.15: Andamento della pressione atmosferica al suolo estratta dal database QualeAria 2018 nella posizione della stazione di rigassificazione il giorno 15/1/2018

Durante le prime ore della giornata, il flusso risulta essere persistentemente diretto verso il mare, con intensità intorno a 3 m/s, temperatura inferiore a 8 °C e umidità relativa di poco superiore a 85%, a partire dalle ore 12, il flusso viene completamente invertito, risultando diretto verso l'entroterra fino a fine giornata con intensità comprese tra 2 e 4 m/s, temperature che crescono ma non superano i 12 °C e umidità relativa che si porta a valori superiori al 90% nelle ore in cui la temperatura tende a diminuire. La pressione atmosferica risulta essere elevata, caratterizzata da poca variabilità nelle prime ore della giornata e in aumento dal pomeriggio.

Le due condizioni considerate per le simulazioni sono quelle delle ore 01:00 e 18:00 caratterizzate dai dati riassunti in Tabella 3.1.

Tabella 3.1: Riassunto delle principali grandezze meteorologiche nelle due situazioni identificate

Ora	intensità del vento al suolo (m/s)	Direzione del vento al suolo (gradi)	Temperatura dell'aria T _b (°C)	Umidità relativa (%)	Pressione atmosferica (hPa)
01:00	3.1	88	7.7	86	1009
18:00	2.8	272	10.2	92	1008

Le condizioni rappresentano situazioni realistiche in grado di definire scenari potenzialmente critici di formazione della nebbia connessa al processo di vaporizzazione del GNL (temperature basse ed umidità relativa elevata) e di trasporto verso Est e lo Stagno di Santa Giusta (caso delle ore 18:00) e verso Ovest e la zona degli accosti portuali (caso delle ore 01:00). L'intensità del vento è in entrambe le situazioni non trascurabile ma non tale da determinare dissipazione della nebbia per ragioni meccaniche, permettendo un potenziale trasporto a distanza.

Le due situazioni vengono identificate, nel seguito del rapporto, come flusso da mare (caso delle ore 18:00) e flusso da terra (caso delle ore 01:00).

4 STIMA DELLE CONDIZIONI TERMODINAMICHE INIZIALI MEDIANTE IL CODICE CODE_SATURNE

Il processo di vaporizzazione del GNL implica la fornitura di calore sufficiente per scaldarlo fino alla temperatura di circa 5°C. Le fonti di calore utilizzabili possono essere di diverso tipo, a seconda della tipologia di vaporizzatore utilizzata. Nel caso specifico del rigassificatore in oggetto, si è optato per un sistema ad aria a circolazione forzata "FDVA".

La capacità complessiva richiesta di 100 m³/h di LNG rigassificato, corrispondente ad una produzione di circa 60,000 Nm³/h di gas naturale, può essere raggiunta attraverso l'uso di 6 coppie di vaporizzatori ad aria a ventilazione forzata. Ogni elemento è costituito da una torre di altezza circa 13 m all'interno della quale viene fatta scorrere aria forzata da 4 ventilatori posti sulla sommità. L'aria, che lambisce il fascio di tubazioni all'interno di ogni elemento, cede calore raffreddandosi, consentendo la rigassificazione del GNL allo stato liquido. La Figura 4.1 fornisce un'illustrazione indicativa della struttura esterna dei vaporizzatori e dei ventilatori.



Figura 4.1 Elementi del Sistema di Vaporizzazione e della Struttura dei Ventilatori

La disposizione in pianta di 6+6 vaporizzatori è illustrata in Figura 4.2. Di volta in volta 6 vaporizzatori sono operativi, 6 sono in modalità defrosting. Durante la fase di defrosting, i ventilatori sono comunque in funzione e l'aria all'interno viene utilizzata per eliminare l'eventuale ghiaccio che si forma sulle tubazioni.

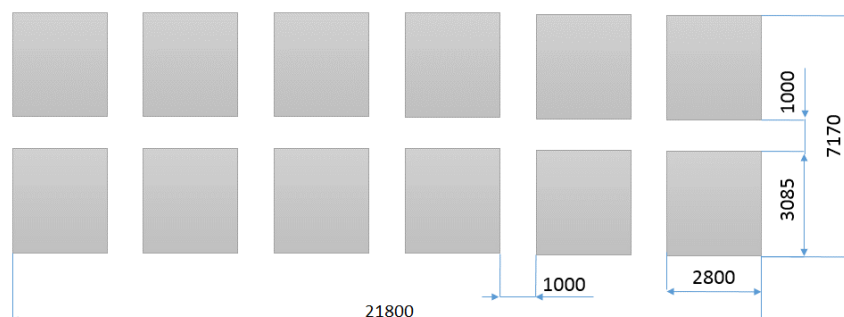


Figura 4.2: Disposizione dei 6+6 vaporizzatori

Considerato che con temperature ambientali inferiori a 15°C non può essere garantito il raggiungimento di temperature positive del gas in uscita, un electric trim heater è attualmente previsto per fornire il calore sensibile in modo tale da aumentare la temperatura del gas a temperature superiori ai 3°C: una situazione caratterizzata da temperatura dell'aria inferiore a 15 °C non compromette quindi l'utilizzo dei vaporizzatori, ma è comunque da considerare come maggiormente critica perché pone il sistema nelle condizioni di minime di funzionamento, con una più probabile formazione di nebbia. Una conseguenza relativa all'utilizzo di aria come fluido riscaldante per la vaporizzazione del LNG è infatti la formazione di nebbia. Durante il processo di scambio termico il vapore acqueo presente nell'aria tende a condensare e a diventare nebbia una volta raffreddato: è quindi necessario l'utilizzo di un modello in grado di simulare, all'interno di strutture delle dimensioni dei vaporizzatori dove viene convogliata e forzata l'aria ambiente, lo scambio termico con il GNL all'interno delle tubazioni. Il modello deve fornire lo stato termodinamico del flusso d'aria in uscita, il quale viene rilasciato nell'atmosfera presente. Se il contenuto di acqua liquida dell'aria in uscita risulta essere superiore ad un valore di soglia, si può considerare la presenza di nebbia.

La Tabella 4.1 riassume le caratteristiche del sistema di vaporizzazione fornite dal costruttore

Tabella 4.1: Caratteristiche del Sistema di Evaporazione Fornite dal Costruttore

	Descrizione	Unità	Processo	Aria
Processo	Mezzo considerato		GNL ⁽⁴⁾	Aria
	Flusso in massa	kg/h	7632	229440
	Flusso in volume	Nm ³ /h	10000	177392
	Area della superficie riscaldante	m ²	248	1803
	Temperatura di ingresso	°C	-160 ⁽¹⁾	20 ⁽¹⁾
	Temperatura di uscita	°C	5 ⁽¹⁾	-9 ⁽¹⁾
	Temperatura minima di uscita	°C	Ambiente -15	Da determinare
	Potenza Nominale	kW	1545 ⁽¹⁾	1545 ⁽¹⁾
	Pressione di progetto	barg	90	-
	Pressione massima operativa	barg	90	-
	Pressione di prova	barg	128.7	-
	Caduta di pressione	bar	<0.95 ⁽¹⁾	-
	Ciclo di lavoro massimo	h	da 4 a 8 ⁽²⁾	
	Tempo minimo di rigenerazione	h	4 ⁽²⁾	
	Meccanica	Descrizione	Unità	Processo
Livello di rumore		dB(A)	90 ± 2 (@1 m di distanza e 1 m di elevazione)	
Lunghezza unitaria esterna		mm	3500 ⁽³⁾	
Larghezza unitaria eterna		mm	3200 ⁽³⁾	
Altezza unitaria esterna		mm	13000 ⁽³⁾	
Peso a secco		kg	13500 ⁽³⁾	
Peso operativo	kg	20000 ⁽³⁾		
Ventilatori	Descrizione	Unità	Valore	
	Numero di ventilatori		4	
	Flusso d'aria di progetto	Nm ³ /h	45000	
	Caduta di pressione	Pa	300	
	Diametro	mm	1400	
Velocità	rpm	960		
Note	⁽¹⁾ Caso di progetto; flusso completo, GNL sottoraffreddato a 77 barg, T ambiente 20° C e 79% RH, dopo ciclo di 8 ore			
	⁽²⁾ Valori indicativi, i tempi di ciclo effettivi sono da determinare in operativo			
	⁽³⁾ Valori preliminari, da definire durante l'ingegnerizzazione finale			
	⁽⁴⁾ Composizione di riferimento del GNL: C ₁ 94% / C ₂ 4,7% / C ₃ 0,8% / C ₄ + 0,2% / N ₂ 0,3% Metano n. 83 Valore calorico (basso) 49,5 MJ / kg			

Questa parte dello studio è realizzata mediante l'utilizzo del codice CFD Code_Saturne, le cui caratteristiche sono descritte in Appendice A. Questo codice è stato sviluppato dal servizio R&D (Recherche et Développement, originariamente DER) di EDF - Électricité de France ed è stato reso disponibile sotto la licenza GNU GPL nel Marzo 2007. Il modello è in grado di risolvere il sistema delle equazioni fluidodinamiche di Navier-Stokes per flussi 3D, stazionari e non-stazionari, laminari o turbolenti, con possibilità di integrare, come nel caso in esame, la microfisica dei fluidi bifase come nel caso dell'aria atmosferica contenente acqua, tenendo conto delle trasformazioni di fase e degli scambi energetici che considerano il calore latente di evaporazione o di liquefazione. Il codice è stato quindi configurato per simulare le condizioni all'ingresso, all'interno e all'uscita di ciascuno degli evaporatori considerati in funzione.

Il modello Code_Saturne viene utilizzato per ricostruire le caratteristiche del flusso d'aria umido in uscita da un singolo evaporatore. L'evaporatore viene rappresentato schematicamente mediante un canale a forma di parallelepipedo, di sezione pari a $2.86 \times 2.57 \text{ m}^2$ ed altezza pari a 11 m. Sia le dimensioni della base che l'altezza sono dedotti da caratteristiche di progetto e rappresentano la colonna verticale all'interno della quale viene forzato il flusso d'aria. Al limite superiore il flusso viene determinato dalla condizione al contorno sulla velocità definita sulla base delle caratteristiche di portata dei ventilatori, che tiene conto degli effetti di caduta di pressione dovuta alla complessità delle strutture interne che costituiscono un ostacolo per l'aria forzata. All'interno del canale, viene considerata una perdita di energia per unità di volume e per unità di tempo secondo le caratteristiche di progetto fornite, che simula la cessione di energia dell'aria verso il GNL necessaria per il processo di rigassificazione di $10,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e per portare il gas ad una temperatura di circa 5°C .

L'aria ambiente in ingresso, caratterizzata nei due casi da simulare da una determinata temperatura e contenuto di vapore (calcolato attraverso l'umidità relativa), viene quindi raffreddata nel passaggio attraverso il canale e raggiungendo la saturazione con formazione di acqua liquida. La soluzione di equilibrio della simulazione con il modello CFD fornisce quindi le caratteristiche dell'aria al contorno inferiore del dominio che, mediate sull'intera sezione di uscita, definiscono l'eventuale presenza di nebbia che verrà trasportata attraverso il modello SPRAY. Il codice CFD fornisce quindi la temperatura dell'aria, la concentrazione e il flusso di acqua liquida generata durante il processo di raffreddamento all'interno.

Il contenuto di acqua liquida generato complessivamente dal sistema di vaporizzazione viene ottenuto moltiplicando per 12 il valore ottenuto dalle simulazioni CFD, che considerano il funzionamento di un singolo vaporizzatore. In questo modo si ipotizzano in funzione 12 vaporizzatori, considerando i 6 in fase di defrosting come se fossero in azione per il cambiamento di fase del GNL, condizione molto conservativa dato che durante la fase di defrosting il vaporizzatore non dovrebbe produrre nebbia. Analogamente, l'area occupata dal pennacchio umido complessivo in uscita viene ipotizzata come pari a quella occupata dai 12 vaporizzatori più lo spazio presente tra loro, indicata in Figura 4.2.

Le condizioni operative di riferimento considerate quindi per ciascuno dei vaporizzatori sono le seguenti:

- ✓ flusso d'aria generato dai ventilatori (4 in totale per ogni vaporizzatore) $177392 \text{ Nm}^3/\text{h}$;
- ✓ potenza nominale ceduta al GNL 1545 kW .

La Figura 4.3 rappresenta graficamente la griglia delle celle di calcolo utilizzata per suddividere la colonna verticale nella simulazione CFD, che schematizza l'interno del singolo vaporizzatore. In totale, vengono utilizzate 12100 celle di calcolo.

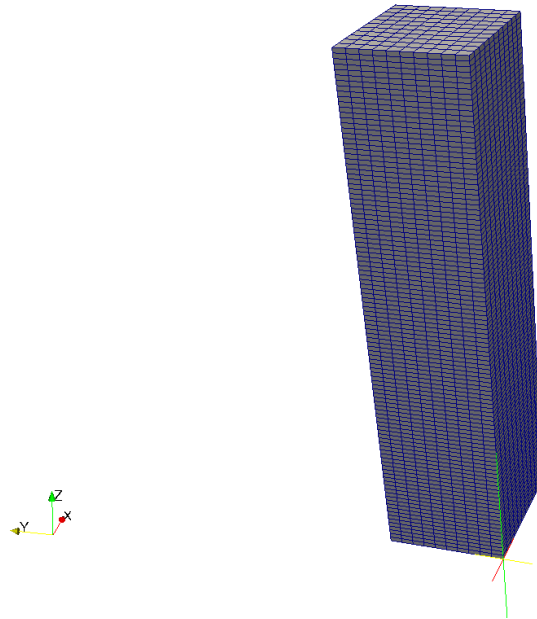


Figura 4.3: Rappresentazione tridimensionale del dominio di calcolo e del grigliato di celle in cui è suddiviso.

Per la realizzazione delle simulazioni sono state utilizzate le seguenti parametrizzazioni nel codice Code_Saturne:

- ✓ chiusura della turbolenza mediante metodo k- ϵ . Tale metodo utilizza due equazioni differenziali alle derivate parziali per il trasporto di k (l'energia cinetica turbolenta) ed ϵ (velocità di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta), che rappresentano le proprietà turbolente del flusso;
- ✓ pareti laterali con rugosità 0.01 cm;
- ✓ simulazione con time step variabile e ricerca della soluzione stazionaria;
- ✓ 2000 iterazioni massime (in generale 1500 sono risultate sempre sufficienti per raggiungere la convergenza);
- ✓ attivazione della microfisica dell'acqua, che contiene le equazioni sui cambiamenti di fase ed equazione di trasporto della Temperatura Potenziale Liquida.

Come anticipato in precedenza, sono state realizzate due differenti simulazioni che tengono in considerazione le due differenti caratteristiche dell'atmosfera con flusso proveniente da mare e flusso da terra, i cui risultati vengono descritti nei paragrafi seguenti.

4.1 CASO CON FLUSSO DA MARE

Nel caso con flusso da mare, corrispondente alla situazione meteorologica relativa alle ore 18:00 del giorno 15/1/2018, la temperatura dell'aria entrante nel vaporizzatore forzata dai ventilatori è di 10.2 °C, caratterizzata da un'umidità relativa del 92%.

La Figura 4.4, la Figura 4.5 e la Figura 4.6 riportano rispettivamente la sezione verticale della componente verticale (longitudinale al vaporizzatore, negativa verso il basso) della velocità dell'aria all'interno del canale, della temperatura dell'aria e del contenuto di acqua liquida (LWC, Liquid Water Content o q_l) espresso in kg/(kg aria umida), ottenute come soluzione stazionaria della simulazione con il modello Code_Saturne.

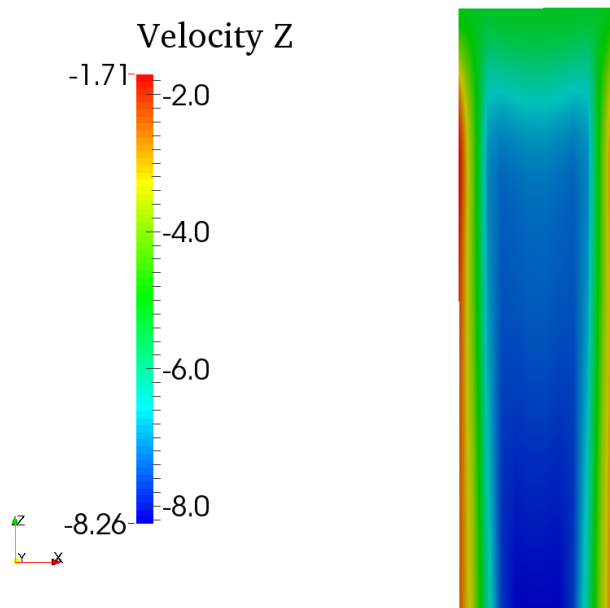


Figura 4.4: Sezione verticale al centro del canale della componente verticale della velocità dell'aria simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria. Valori in m/s secondo la scala a sinistra

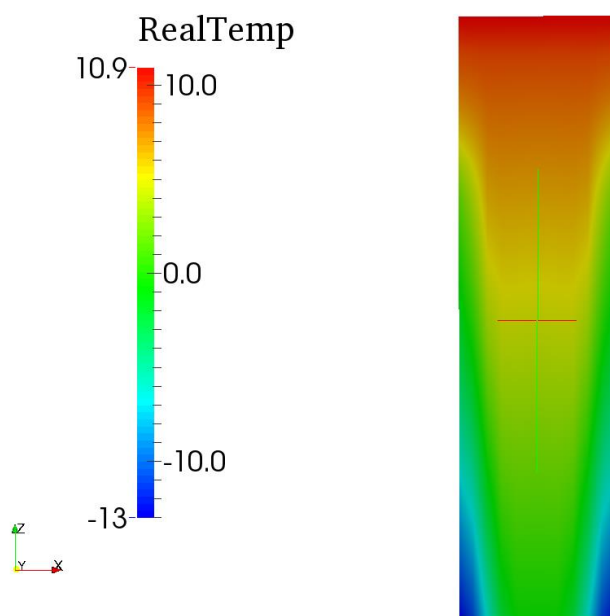


Figura 4.5: Sezione verticale al centro del canale della temperatura dell'aria simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria valori in °C secondo la scala colorata a sinistra

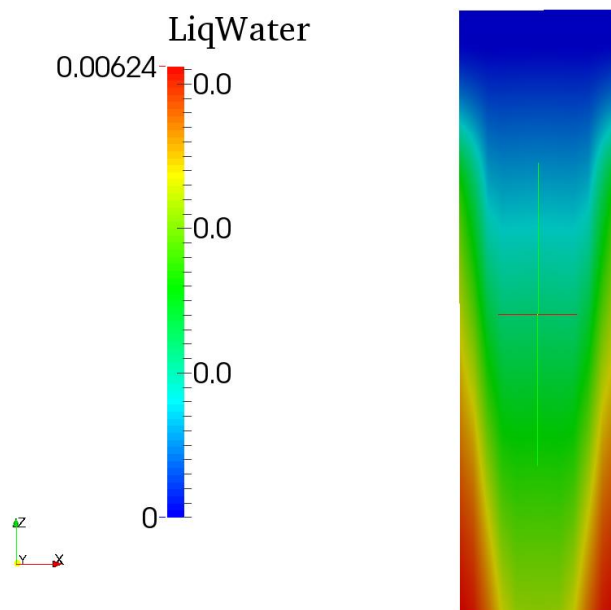


Figura 4.6: Sezione verticale al centro del canale contenuta specifico di acqua liquida espresso in kg/kg, simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria

Si nota come la condizione al contorno determini, attraverso la rugosità superficiale, un rallentamento del flusso lungo le pareti laterali. Scendendo lungo il canale, la temperatura del flusso d'aria diminuisce a causa della sottrazione di energia che parametrizza lo scambio di calore con le tubazioni del GNL, mentre aumenta in maniera sensibile il contenuto d'acqua liquida a causa dell'abbassamento della temperatura e il raggiungimento delle condizioni di saturazione che determinano condensazione del vapore presente in ingresso.

Le simulazioni non hanno lo scopo di determinare con estrema precisione l'andamento di queste variabili punto per punto, dato che non sono note le complesse caratteristiche geometriche di dettaglio delle tubazioni all'interno del vaporizzatore. Essendo però reale il dimensionamento delle variabili in gioco (portata complessiva del flusso d'aria interno e flusso di energia da sottrarre all'aria) è sufficiente raccogliere le variabili necessarie sulla sezione di uscita in basso, effettuandone una media lungo tutta la sezione, per ottenere le caratteristiche medie dell'aria uscente dal singolo vaporizzatore.

Tali caratteristiche si riassumono, per il caso in esame, in Tabella 4.2

Tabella 4.2: Riassunto delle principali grandezze meteorologiche in uscita dal singolo vaporizzatore simulate dal codice Code_Saturne

Velocità verticale media (m/s)	quantità specifica totale di acqua q_w (g/kg)	quantità specifica di acqua liquida q_l (g/kg)	temperatura dell'aria media all'uscita del vaporizzatore T_s ($^{\circ}$ C)	Pressione atmosferica p (hPa)
5	7.1	5.72	-10	1009

Sia in questo caso che in quello con flusso da terra, la quantità specifica totale di acqua presente in aria q_w , (caratterizzata dalla presenza di solo vapore in ingresso e da liquido + vapore in uscita) viene conservata. Il valore in ingresso è calcolato rispetto alle condizioni meteorologiche definite in Tabella 3.1.

Nella simulazione con il codice SPRAY, tali caratteristiche verranno considerate su un numero totale di 12 vaporizzatori, moltiplicando per tale fattore il flusso di umidità in uscita del singolo vaporizzatore, considerando la temperatura dell'aria perturbata all'uscita sull'area totale occupata dall'intero sistema.

4.2 CASO CON FLUSSO DA TERRA

Nel caso con flusso da terra, corrispondente alla situazione meteorologica relativa alle ore 01:00 del giorno 15/1/2018, la temperatura dell'aria entrante nel vaporizzatore forzata dai ventilatori è di 7.7 °C, caratterizzata da un'umidità relativa del 86%. La Figura 4.7, la Figura 4.8 e la Figura 4.9 riportano rispettivamente la sezione verticale della componente verticale della velocità dell'aria all'interno del canale, della temperatura dell'aria e del contenuto di acqua liquida espresso in kg/(kg aria umida) ottenute come soluzione stazionaria della simulazione con il modello Code_Saturne.

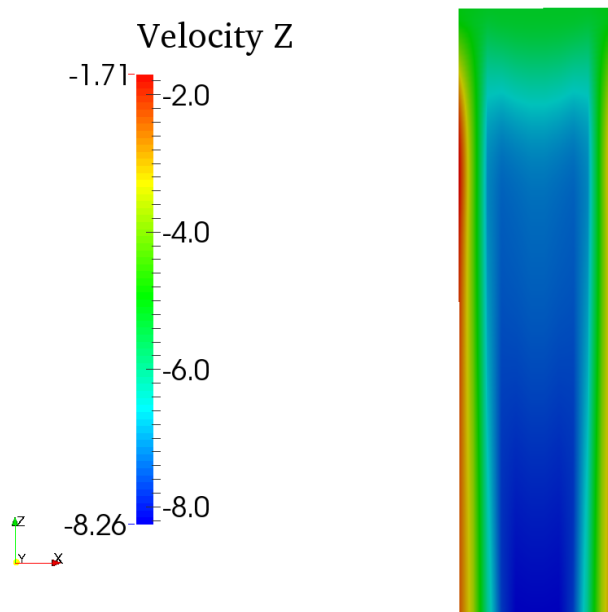


Figura 4.7: Sezione verticale al centro del canale della componente verticale della velocità dell'aria simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria. Valori in m/s secondo la scala a sinistra

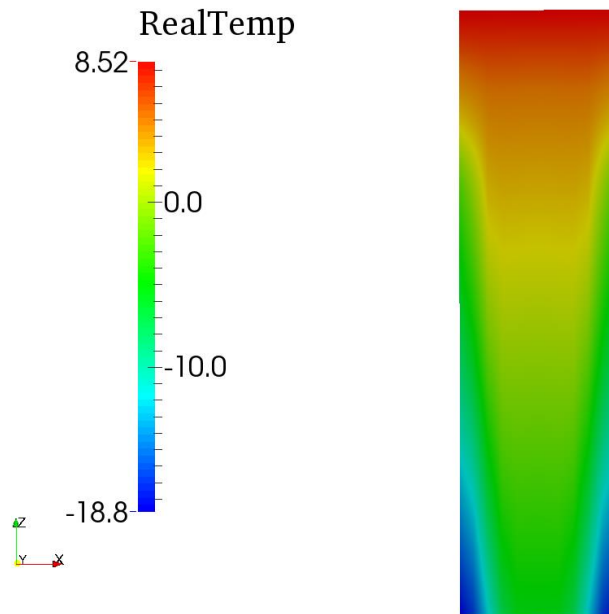


Figura 4.8: Sezione verticale al centro del canale della temperatura dell'aria simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria valori in °C secondo la scala colorata a sinistra

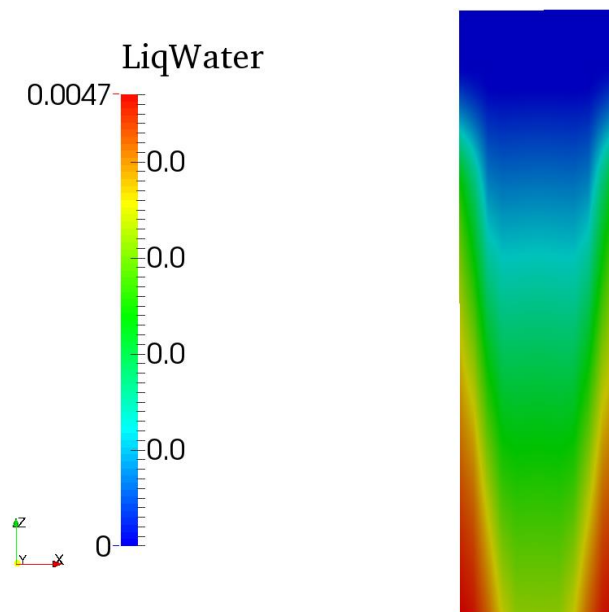


Figura 4.9: Sezione verticale al centro del canale contenuto specifico di acqua liquida espresso in kg/kg, simulata dal codice Code_Saturne all'interno del vaporizzatore ottenuta come soluzione stazionaria

Le caratteristiche medie dell'aria uscente dal singolo vaporizzatore sono riassunte in Tabella 4.3.

Tabella 4.3: Riassunto delle principali grandezze meteorologiche in uscita dal singolo vaporizzatore simulate dal codice Code_Saturne

Velocità verticale media (m/s)	quantità specifica totale di acqua q_w (g/kg)	quantità specifica di acqua liquida q_l (g/kg)	temperatura dell'aria media all'uscita del vaporizzatore T_s (°C)	Pressione atmosferica p (hPa)
4.9	5.32	4.31	-15.5	1008

5 DOMINI DI CALCOLO PER IL MODELLO SPRAY

Per la ricostruzione del trasporto e della dispersione del pennacchio umido in uscita dal rigassificatore, viene utilizzato il modello di dispersione Lagrangiano a particelle, descritto in Appendice B. Il modello necessita della ricostruzione del campo meteorologico.

5.1 CASO CON FLUSSO DA MARE

Il dominio di calcolo della simulazione meteorologica nel caso con flusso da mare ha una estensione orizzontale di $6 \times 4 \text{ km}^2$ e coordinate del punto a Sud-Ovest 461500 m, 4411500 m nel sistema di proiezione UTM WGS84, fuso 32N. La risoluzione orizzontale utilizzata per descrivere i campi meteorologici è di 100 m. L'estensione verticale del dominio della simulazione meteorologica è di 5000 m, con i seguenti 14 livelli di calcolo sopra l'orografia (espressi in metri): 0, 10, 20, 65, 125, 210, 325, 480, 690, 975, 1360, 2580, 3525, 5000.

In Figura 5.1 è illustrato il dominio di calcolo delle simulazioni meteorologiche. I livelli orografici sono rappresentati mediante iso-linee. In aggiunta, è rappresentato l'uso del suolo ad una risoluzione orizzontale di 100 m. I codici di uso suolo sono definiti secondo una classificazione a 21 classi ricavata da quella standard europea CORINE a 44 classi (EEA Data Service), mediante accorpamento di alcune categorie, secondo la didascalia riportata in figura. Il dominio è prevalentemente caratterizzato dalle acque dello Stagno di Santa Giusta, e da estese aree industriali (in grigio scuro). Il tessuto urbano del Comune di Santa Giusta è evidenziato in arancione ad Ovest dello Stagno.

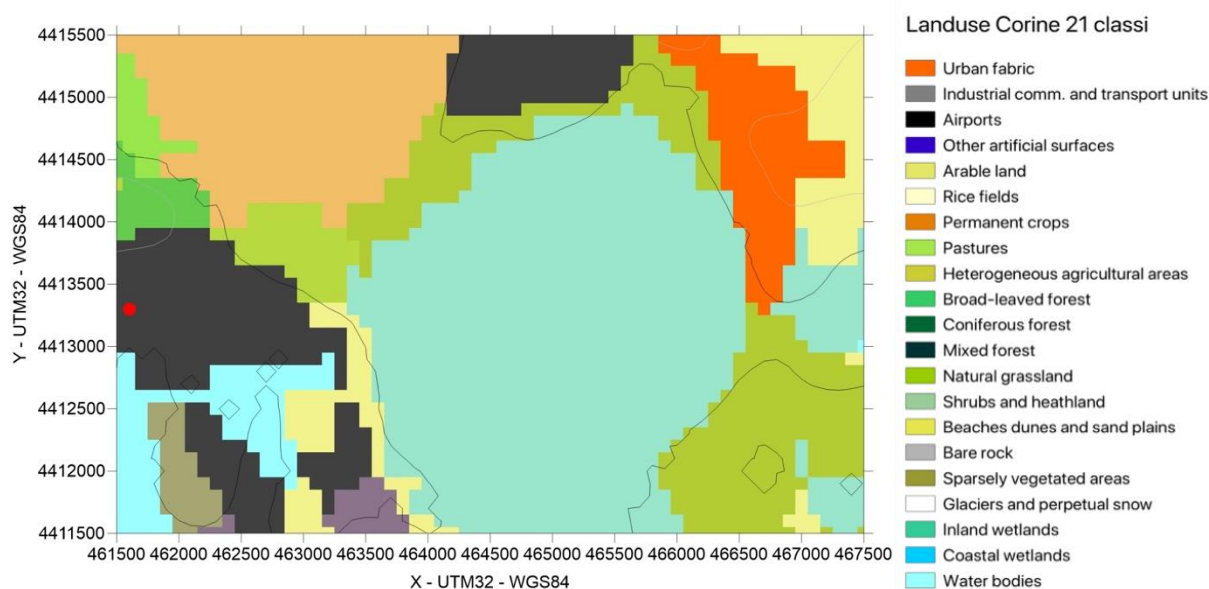


Figura 5.1: Dominio di calcolo con uso del suolo CORINE 21 classi a 100 m di risoluzione e iso-linee dei livelli orografici, nel caso con flusso da mare. Il punto rosso indica la posizione della sorgente (vaporizzatori GNL)

La simulazione di dispersione con il modello SPRAY nel caso con flusso da mare è stata realizzata in un dominio più piccolo innestato nel precedente, ad una elevata risoluzione orizzontale e verticale, adatta a descrivere adeguatamente i fenomeni locali associati alla formazione della nebbia dall'impianto di rigassificazione. Il dominio della simulazione di dispersione è rappresentato da un quadrato con dimensione di 2 km e coordinate del vertice Sud-Ovest 461500 m, 4412500 m nel sistema di proiezione UTM WGS84, fuso 32N. La risoluzione orizzontale della griglia regolare è di 10 m ed è caratterizzata quindi da 200 celle in entrambe le direzioni principali.

L'estensione verticale del dominio di simulazione di dispersione è di 500 m, con i seguenti 50 livelli di calcolo sopra l'orografia (espressi in metri): 0.00, 1.00, 1.50, 2.14, 2.95, 3.93, 5.11, 6.51, 8.14, 10.02, 12.18, 14.62, 17.37, 20.44, 23.86, 27.63, 31.79, 36.34, 41.31, 46.71, 52.56, 58.88, 65.69, 73.01, 80.84, 89.22, 98.17, 107.68, 117.80, 128.53, 139.89, 151.90, 164.58, 177.95, 192.02, 206.81, 222.35, 238.65, 255.72, 273.59, 292.27, 311.78, 332.14, 353.38, 375.49, 398.51, 422.46, 447.34, 473.18, 500.00.

La posizione del dominio di dispersione innestato dentro quello della simulazione meteorologica è mostrata in Figura 5.2 e Figura 5.3.

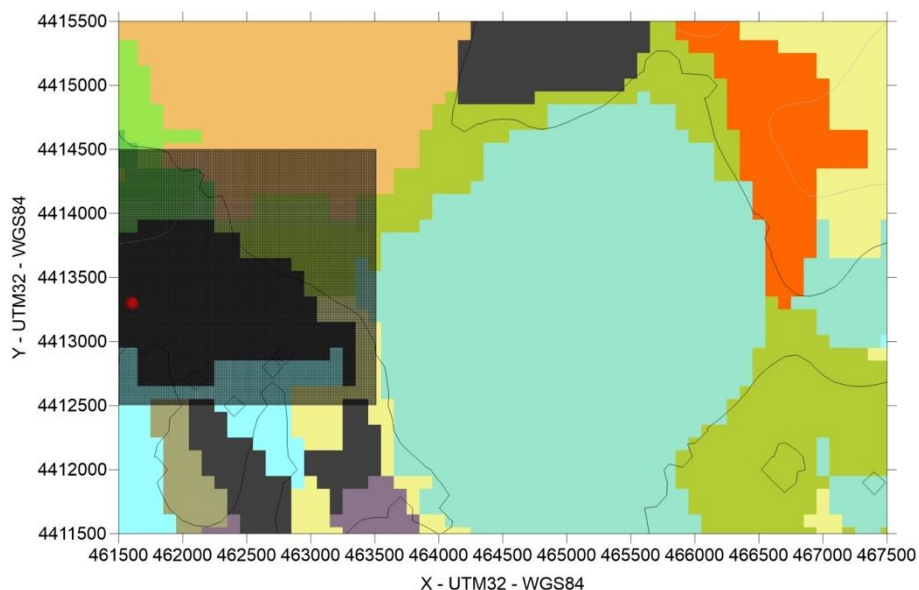


Figura 5.2: Grigliato orizzontale del dominio innestato della simulazione di dispersione rispetto al dominio della simulazione meteorologica, nel caso con flusso da mare. Il punto rosso indica la posizione della sorgente (vaporizzatori GNL)



Figura 5.3: Grigliato orizzontale del dominio della simulazione di dispersione, nel caso con flusso da mare. Il punto rosso indica la posizione del centro geometrico della sorgente (vaporizzatori GNL)

5.2 CASO CON FLUSSO DA TERRA

Il dominio di calcolo della simulazione meteorologica nel caso con flusso da terra ha una estensione orizzontale di 6 x 4 km² e coordinate del punto a Sud-Ovest 457000 m, 4410900 m nel sistema di proiezione UTM WGS84,

fuso 32N. La risoluzione orizzontale utilizzata per descrivere i campi meteorologici è di 100 m. L'estensione verticale del dominio della simulazione meteorologica è di 5000 m, con i seguenti 14 livelli di calcolo sopra l'orografia (espressi in metri): 0, 10, 20, 65, 125, 210, 325, 480, 690, 975, 1360, 2580, 3525, 5000.

In Figura 5.4 è illustrato il dominio di calcolo delle simulazioni meteorologiche. I livelli orografici sono rappresentati mediante iso-linee. In aggiunta, è rappresentato l'uso del suolo ad una risoluzione orizzontale di 100 m. I codici di uso suolo sono definiti secondo una classificazione a 21 classi ricavata da quella standard europea CORINE a 44 classi (EEA Data Service), mediante accorpamento di alcune categorie, secondo la didascalia riportata in figura. Il dominio è quasi totalmente sul mare, ad eccezione della porzione occidentali occupata dall'area industriale (in grigio scuro).

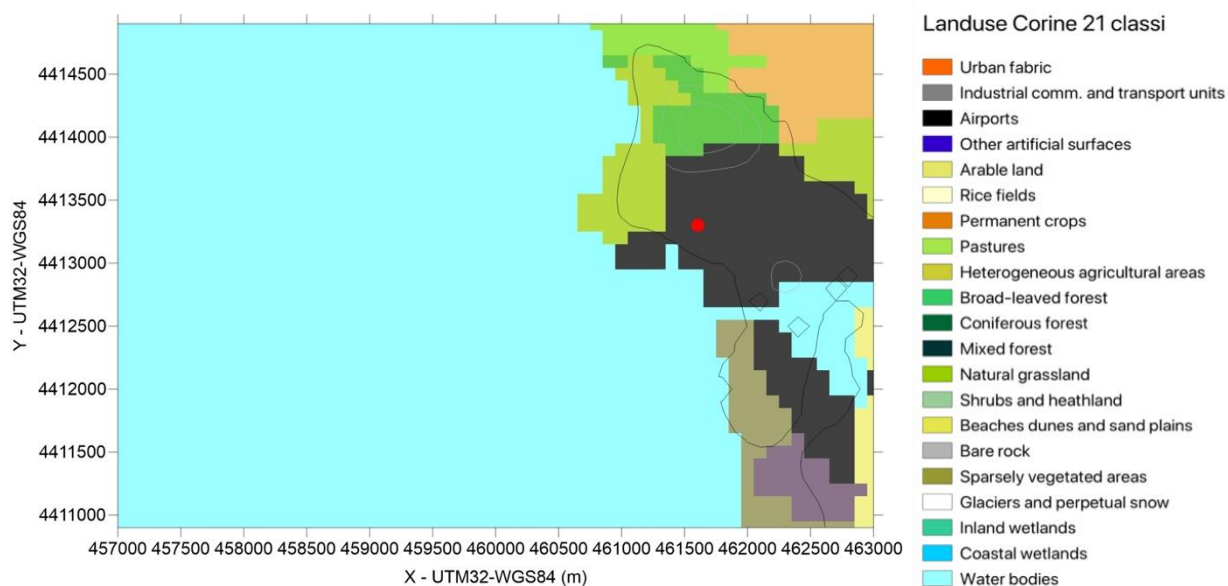


Figura 5.4: Dominio di calcolo con uso del suolo CORINE 21 classi a 100 m di risoluzione e iso-linee dei livelli orografici, nel caso con flusso da terra. Il punto rosso indica la posizione della sorgente

La simulazione di dispersione con il modello SPRAY nel caso con flusso da terra è stata realizzata in un dominio più piccolo innestato nel precedente, ad una elevata risoluzione orizzontale e verticale, adatta a descrivere adeguatamente i fenomeni locali associati alla formazione della nebbia dall'impianto di rigassificazione. Il dominio della simulazione di dispersione è rappresentato da un quadrato con dimensione di 2 km e coordinate del vertice Sud-Ovest 459700 m, 4412700 m nel sistema di proiezione UTM WGS84, fuso 32N. La risoluzione orizzontale della griglia regolare è di 10 m ed è caratterizzata quindi da 200 celle in entrambe le direzioni principali.

L'estensione verticale del dominio di simulazione di dispersione è di 500 m, con i seguenti 50 livelli di calcolo sopra l'orografia (espressi in metri): 0.00, 1.00, 1.50, 2.14, 2.95, 3.93, 5.11, 6.51, 8.14, 10.02, 12.18, 14.62, 17.37, 20.44, 23.86, 27.63, 31.79, 36.34, 41.31, 46.71, 52.56, 58.88, 65.69, 73.01, 80.84, 89.22, 98.17, 107.68, 117.80, 128.53, 139.89, 151.90, 164.58, 177.95, 192.02, 206.81, 222.35, 238.65, 255.72, 273.59, 292.27, 311.78, 332.14, 353.38, 375.49, 398.51, 422.46, 447.34, 473.18, 500.00.

La posizione del dominio di dispersione innestato dentro quello della simulazione meteorologica è mostrata in Figura 5.5 e Figura 5.6.

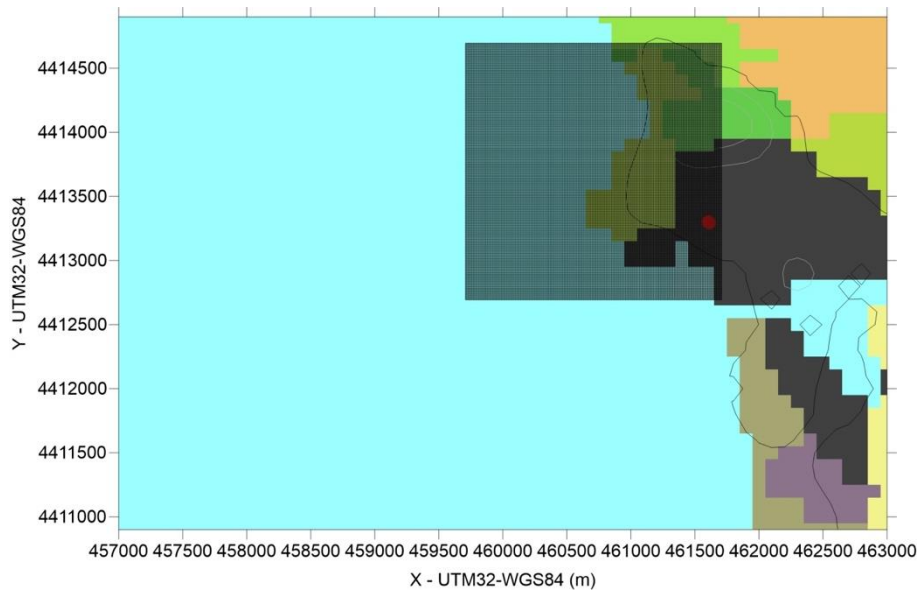


Figura 5.5: Grigliato orizzontale del dominio innestato della simulazione di dispersione rispetto al dominio della simulazione meteorologica, nel caso con flusso da terra. Il punto rosso indica la posizione della sorgente (vaporizzatori GNL)

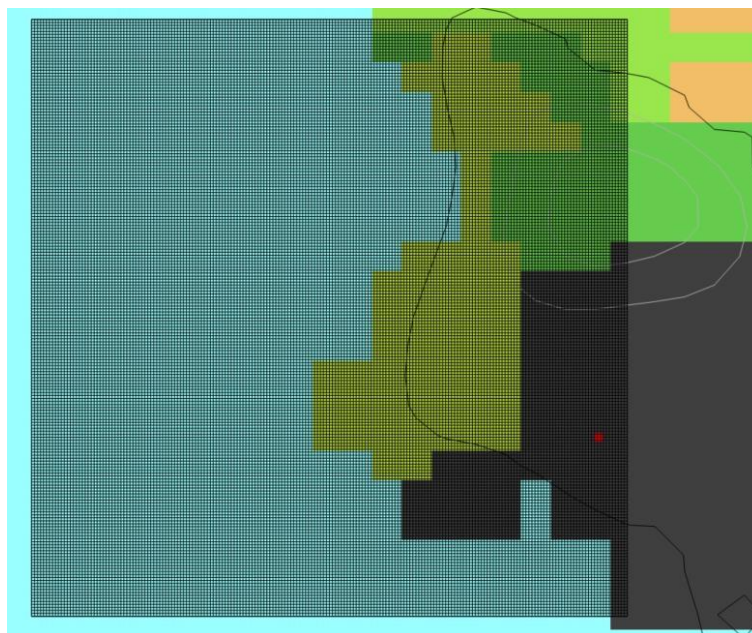


Figura 5.6: Grigliato orizzontale del dominio della simulazione di dispersione, nel caso con flusso da terra. Il punto rosso indica la posizione del centro geometrico della sorgente (vaporizzatori GNL)

6 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI CON MODELLO SPRAY

Le simulazioni di dispersione con il modello SPRAY sono pilotate da:

- ✓ schemi di equazioni differenziali stocastiche (Thomson, 1987) per definire le velocità turbolente delle particelle computazionali;
- ✓ campi tridimensionali di vento e temperatura a 100 m di risoluzione, forniti dal codice Swift;
- ✓ campi bidimensionali della rugosità superficiale z_0 , e delle variabili necessarie alla descrizione della turbolenza H_{mix} , u^* , L , w^* forniti dal codice SurfPro;
- ✓ dati di emissione, costituiti da una sequenza di informazioni sulla geometria della sorgente, la localizzazione spaziale, il flusso di massa di aria emessa dal sistema, la temperatura dell'aria e il quantitativo di particelle computazionali da emettere nell'unità di tempo.

Per completare la simulazione i modelli vengono richiamati in cascata su base semi-oraria. All'interno di ogni intervallo temporale, viene inserito nel dominio di calcolo un numero di particelle computazionali sufficienti per descrivere correttamente la diffusione dell'aria fredda in uscita dal rigassificatore e stimarne il riscaldamento dovuto al rimescolamento con l'aria ambientale circostante. Il modello SPRAY calcola quindi la temperatura T sia all'interno del pennacchio umido che in ogni altro punto del dominio di calcolo, attraverso il processo di idiluzione delle particelle computazionali. Ipotizzando che alla sorgente la temperatura dell'aria sia definita mediante il valore T_s all'uscita dal vaporizzatore, calcolata mediante il codice `code_Saturne`, in ogni punto del dominio la temperatura dell'aria T è calcolata come media pesata tra T_s e la temperatura dell'aria di background non modificata T_b (definite in Tabella 3.1, Tabella 4.2 e Tabella 4.3) utilizzando come peso il rapporto tra la concentrazione locale delle particelle e la concentrazione delle particelle alla sorgente (zona di uscita dal vaporizzatore).

La regione dello spazio dove le particelle vengono emesse risulta essere, conservativamente, quella occupata da 12 vaporizzatori come indicato in Figura 4.2, alle condizioni di temperatura e di contenuto di acqua liquida nell'aria indicate dai risultati in uscita delle simulazioni con il modello `Code_Saturne`. Questo coincide con l'aver considerato in funzione contemporaneamente i 12 vaporizzatori, ipotizzando quindi la formazione di nebbia per i 6 vaporizzatori in condizione di defrosting come se fossero in funzione per la rigassificazione del GNL.

In entrambi gli scenari meteorologici, la simulazione è stata condotta per la durata di 2 ore, sufficiente per raggiungere la stazionarietà del sistema. La distribuzione spaziale delle particelle computazionali e il campo di temperatura nella configurazione stazionaria sono usati per stimare la formazione di nebbia e dunque la visibilità del pennacchio emesso dai rigassificatori.

In particolare, il contenuto specifico di acqua totale (vapore acqueo e acqua liquida) è conservato nei cambiamenti di fase di condensazione ed evaporazione. Assumendo quindi che all'interno del dominio di calcolo il contenuto specifico di acqua totale sia costante, tale valore è fissato dalla scelta delle condizioni iniziali: nel caso con flusso da mare è $q_w = 7.10$ g/kg; nel caso con flusso da terra è $q_w = 5.32$ g/kg, valori calcolati all'uscita del vaporizzatore attraverso le simulazioni con il modello `code_Saturne`, specificati alla fine dei paragrafi 4.1 e 4.2. Con questa ipotesi, valida nei primi strati dell'atmosfera, è possibile calcolare per ogni cella del dominio il contenuto specifico di vapore d'acqua alla saturazione $q_s(T, p)$ alla temperatura locale (la pressione atmosferica è costante nel dominio). Questo valore rappresenta il massimo contenuto di acqua in fase gassosa che può essere contenuto nel volume d'aria considerato; eventuali eccedenze rispetto all'umidità specifica di saturazione sono quindi dovute alla presenza di fase liquida:

$$\begin{cases} q_l = q_w - q_s & \text{se } q_w \geq q_s \\ q_l = 0 & \text{se } q_w < q_s \end{cases}$$

ovvero, il contenuto di acqua liquida in aria risulta essere pari al surplus tra il contenuto totale di acqua (indipendentemente dal suo stato) e il contenuto massimo di acqua possibile in fase vapore nelle condizioni di pressione e temperatura simulate. Se il surplus risulta essere pari a 0 o negativo, significa che non è presente acqua allo stato liquido.

In letteratura, valori del contenuto specifico di acqua liquida $q_l > 0.05$ g/kg sono indicatori di visibilità del pennacchio di aria umida che definiscono presenza di nebbia, (si veda ad esempio Mousson-Genon, 1987). Attraverso la formula proposta in letteratura da Kunkel (Kunkel, 1983) è possibile anche stimare la distanza di visibilità all'interno della nube (espressa in m) in funzione di diversi valori di q_l . La formula calcola la distanza di visibilità come segue:

$$VIS(m) = -\frac{\ln(0.02)}{144.7(\rho_0 q_l)^{0.88}}$$

dove ρ_0 rappresenta la densità dell'aria. Seguendo le indicazioni di letteratura, per valori di q_l inferiori al limite di 0.05 g/kg la quantità di acqua liquida presente in atmosfera non si considera in grado di formare nebbia visibile. Per ciascuno dei casi simulati, vengono visualizzate sulla cartografia locale le isolinee di visibilità calcolate secondo questa formula.

Per stimare gli effetti sull'ambiente sono state calcolate anche l'umidità relativa e la temperatura dell'aria all'interno del dominio di calcolo.

6.1 CASO CON FLUSSO DA MARE

Nella Figura 6.1 è rappresentata l'estensione tridimensionale della nube di aria umida (nebbia) visibile in termini di isosuperficie con $q_l = 0.05$ g/kg. In Figura 6.2 sono riportate le curve di isolivello del contenuto specifico di acqua liquida al suolo fino al valore limite inferiore precedente.

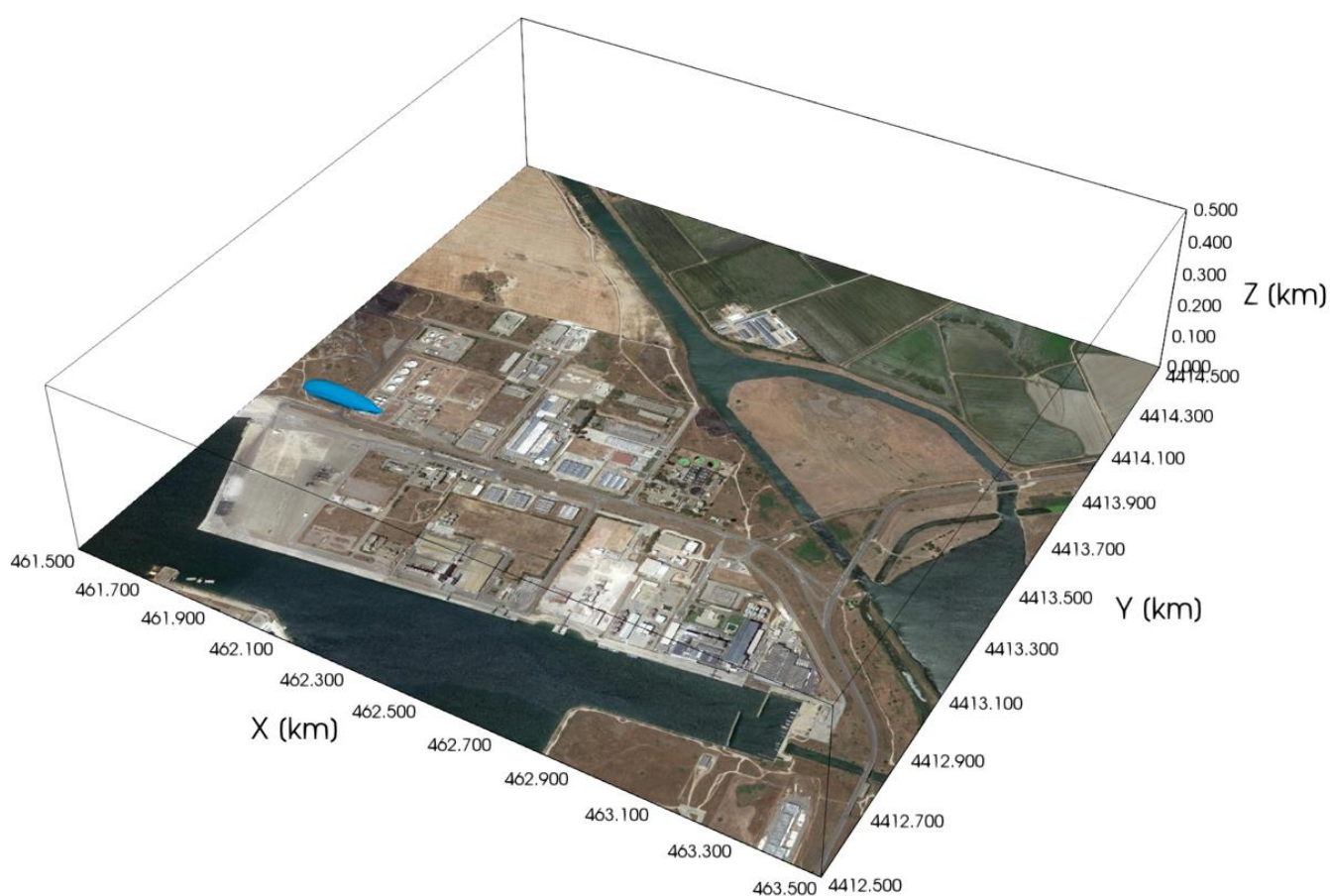


Figura 6.1: Rappresentazione tridimensionale della nube di aria umida visibile nel caso di flusso da mare, in termini di contenuto specifico di acqua liquida pari a 0.05 g/kg

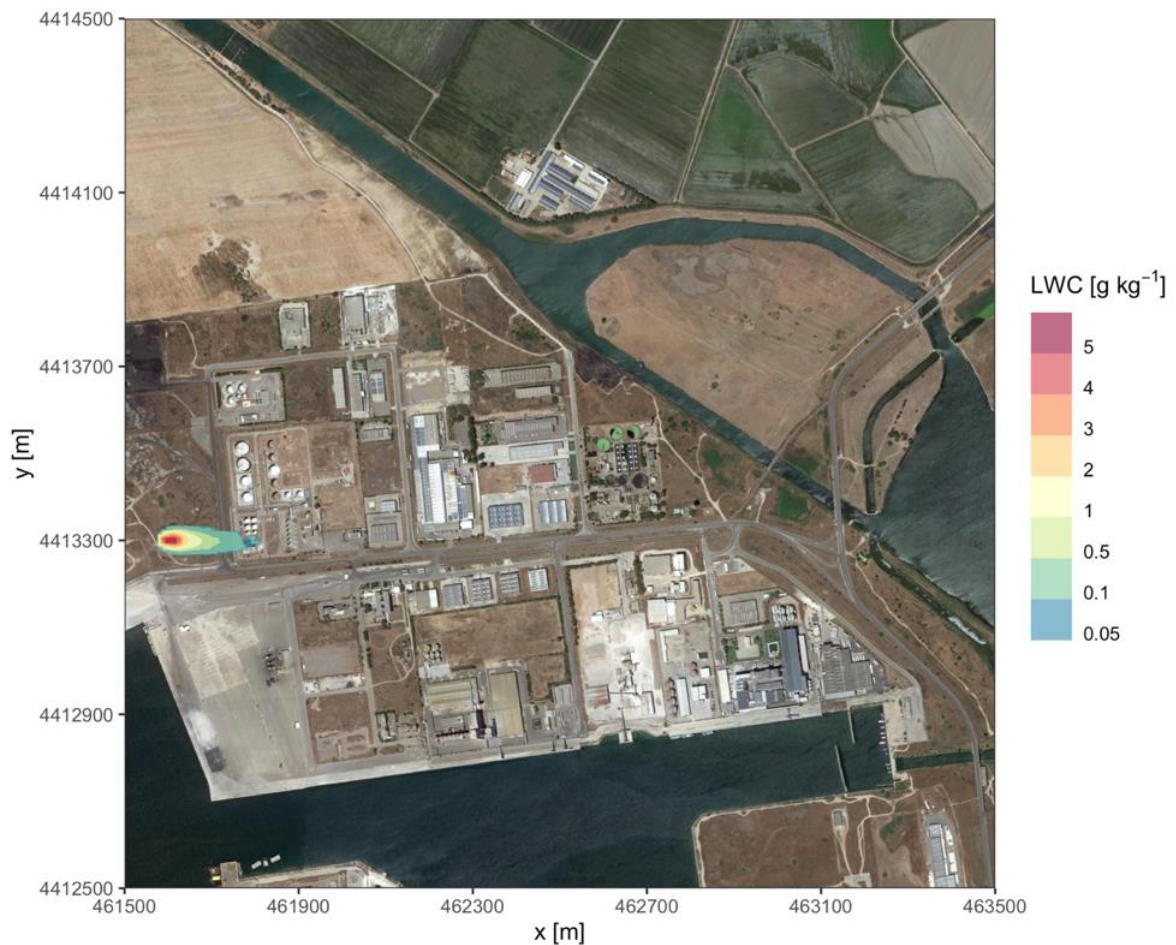


Figura 6.2: Contenuto specifico di acqua liquida al suolo q_l nel caso con flusso da mare. Valori in g/kg.

La nube ha una forma allungata lungo la direzione di trasporto del vento con una estensione orizzontale massima, nella direzione Est-Ovest, che raggiunge circa i 240 m mentre l'estensione trasversale è di circa 70 m. Infine la nube visibile raggiunge una altezza di circa 20 m.

Per valutare l'impatto dell'impianto sull'ambiente circostante, in Figura 6.3 e Figura 6.4 sono rappresentate rispettivamente l'umidità relativa al suolo (in %) e la temperatura dell'aria al suolo (in gradi Celsius) nel dominio di calcolo.

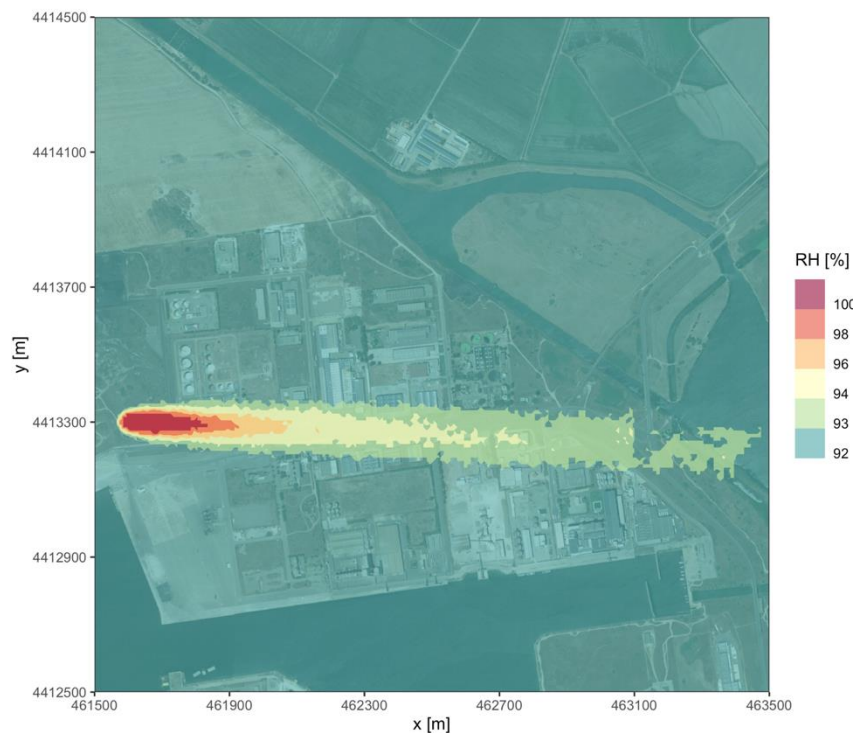


Figura 6.3: Umidità relativa nel caso con flusso di mare. Valori in %



Figura 6.4: Isolinee di temperatura nel caso con flusso di mare. Valori in gradi Celsius

Come atteso, l'umidità relativa è al 100% in prossimità dell'impianto e scende fino al valore ambientale di fondo pari al 92 % allontanandosi dalla nube di aria fredda emessa. A circa 1 km dalla sorgente in direzione Est – Ovest, l'umidità relativa è superiore solo di 1 % rispetto al fondo. Nella direzione trasversale (Nord – Sud) l'effetto dell'impianto di rigassificazione è limitato a poche decine di metri.

La temperatura dell'aria, fissata a -10°C in corrispondenza dell'impianto di rigassificazione, sale rapidamente fino al valore di fondo pari a 10.2°C per effetto del rimescolamento con l'aria circostante: a circa 300 m a Est della sorgente la temperatura è inferiore di meno di 1°C rispetto all'ambiente circostante. Anche in questo caso, nella direzione trasversale Nord – Sud l'impatto dell'aria fredda in uscita dall'impianto è limitato a poche decine di metri.

L'estensione della perturbazione, sia per l'umidità relativa, sia per la temperatura dell'aria al suolo, si estende fino a lambire lo Stagno di Santa Giusta, dove i valori dei rispettivi parametri meteorologici sono quelli dell'aria imperturbata che entra nell'impianto di rigassificazione, senza estendersi oltre.

La Figura 6.5 mostra il dettaglio delle isosuperfici della distanza di visibilità in prossimità del suolo, ottenute attraverso l'applicazione della formula di Kunkel. Nella figura, sono evidenziate in bianco le strade della viabilità interna. Nella zona più prossima al sistema di vaporizzazione, dove il contenuto di acqua liquida è più elevato e la nebbia più densa, la visibilità risulta essere ridotta. Sul tratto di strada che in figura scorre in direzione verticale ad Est dell'impianto, la visibilità può essere dell'ordine di 5 m. Ad una distanza di circa 200-250 m ad Est dell'impianto la visibilità torna ad essere rapidamente ripristinata a valori che non determinano problemi per la circolazione.

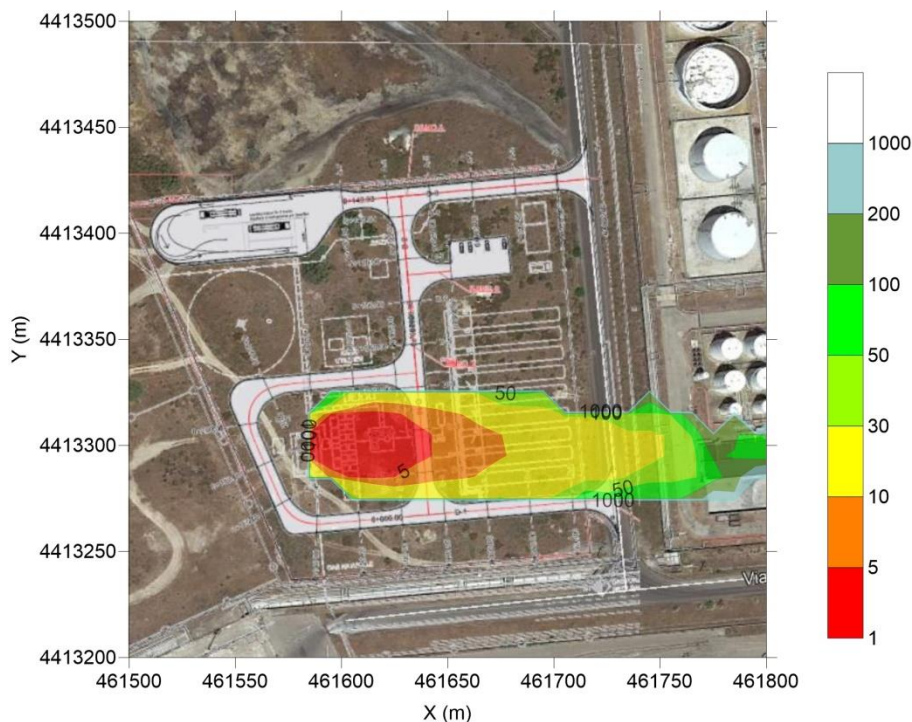


Figura 6.5: Isosuperfici della lunghezza di visibilità in prossimità del suolo espressa in m (scala colorata a destra), calcolate secondo la formula di Kunkel

6.2 CASO CON FLUSSO DA TERRA

In Figura 6.6 è rappresentata l'estensione tridimensionale della nube di nebbia visibile nel caso con flusso da terra, in termini di superficie di contenuto specifico di acqua liquida $q_l = 0.05$ g/kg. Il dettaglio delle curve di livello del contenuto specifico di acqua liquida al suolo è illustrato in Figura 6.7.

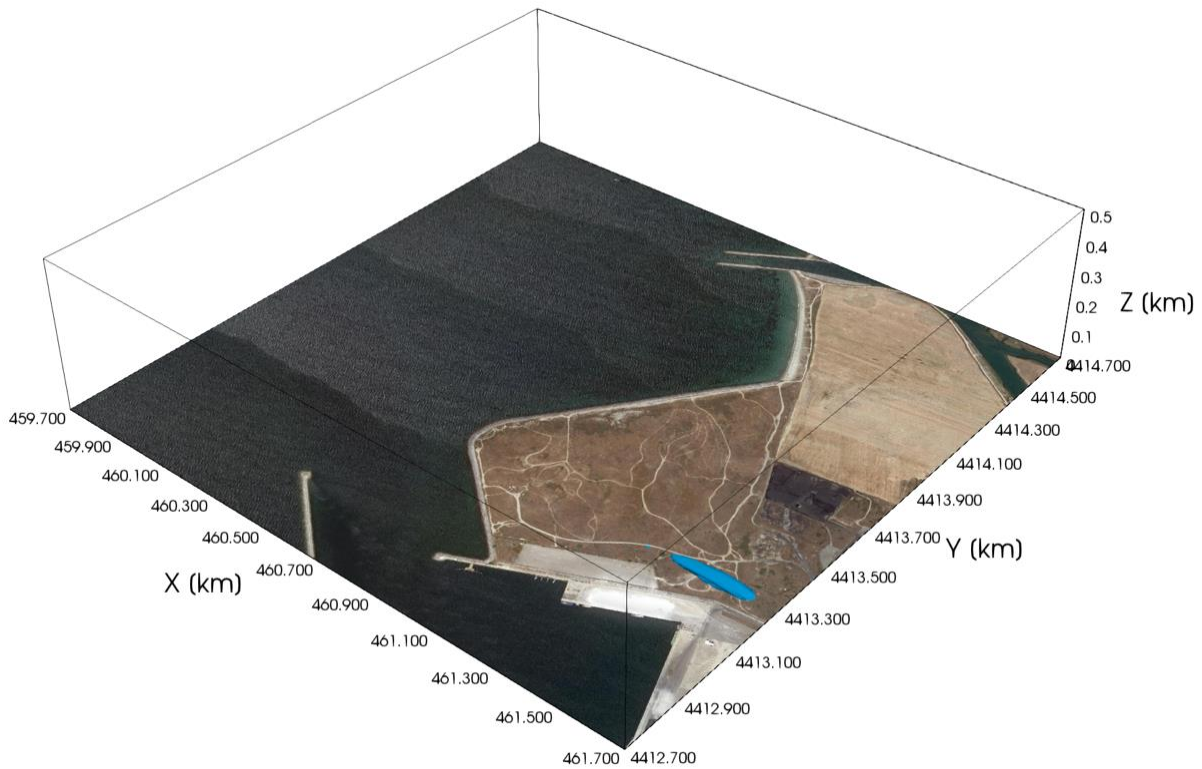


Figura 6.6: Rappresentazione tridimensionale della nube di aria umida visibile nel caso di flusso da terra, in termini di contenuto specifico di acqua liquida pari a 0.05 g/kg

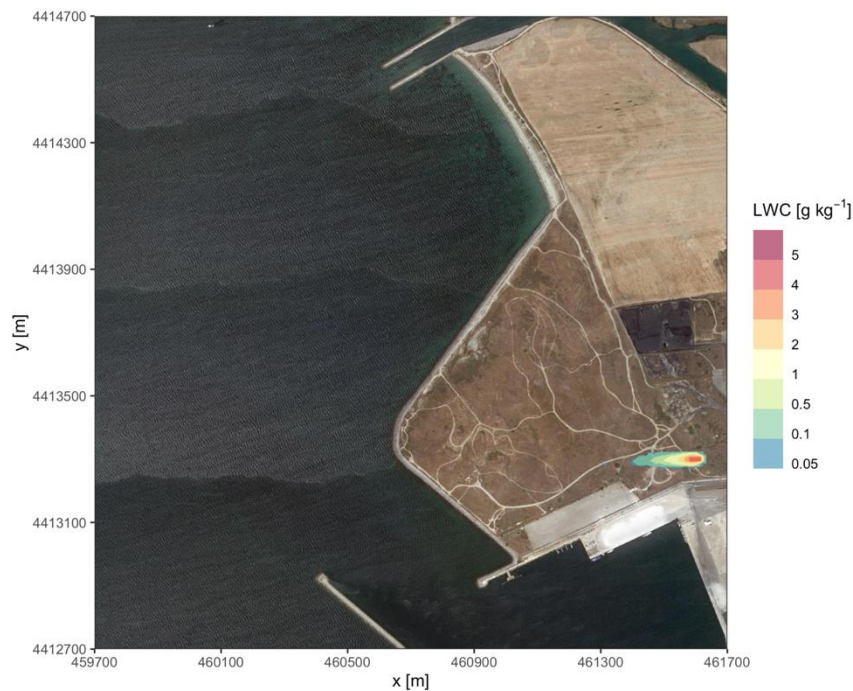


Figura 6.7: Contenuto specifico di acqua liquida al suolo q_l nel caso con flusso da terra. Valori in g/kg

Come nel caso di flusso da mare, la nube ha una forma allungata verso Ovest lungo la direzione del vento. Le dimensioni sono analoghe a quelle del caso precedente, con una estensione longitudinale di circa 240 m e una trasversale di circa 60 m. L'estensione verticale della nube visibile è lievemente inferiore al caso precedente, pari a 15 m nel punto di massima altezza.

Anche in questo caso l'impatto sull'ambiente circostante è valutato in termini di umidità relativa e temperatura dell'aria, Figura 6.8 e Figura 6.9. In questo caso l'estensione delle zone modificate risulta essere evidentemente verso il mare.

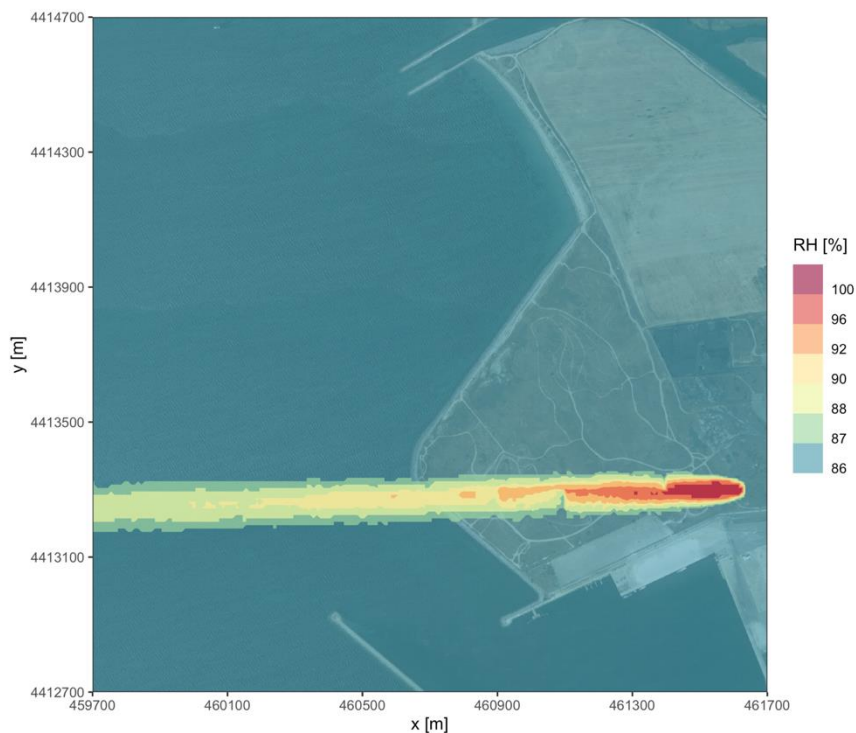


Figura 6.8: Umidità relativa nel caso con flusso di terra. Valori in %

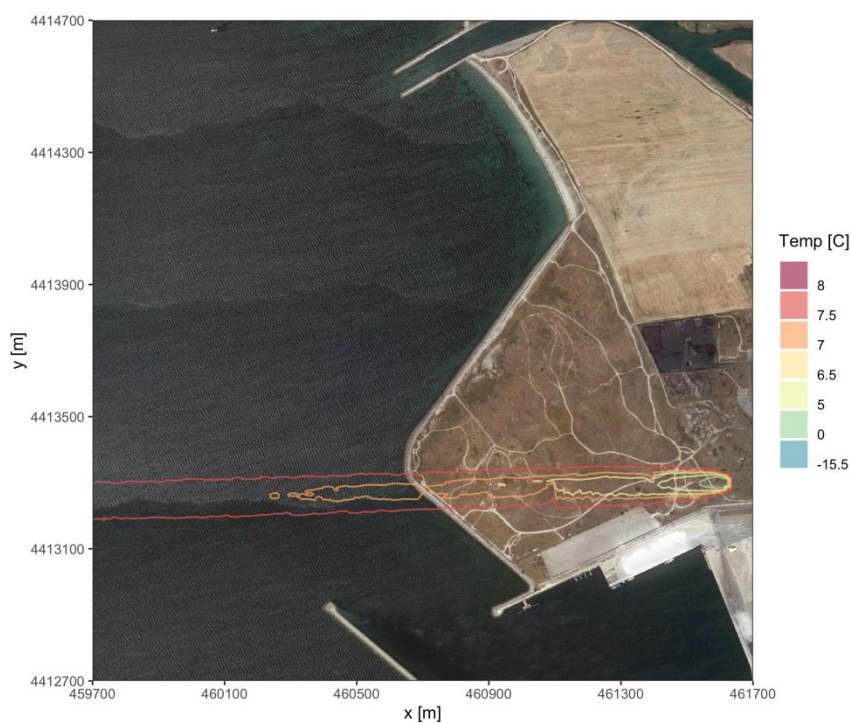


Figura 6.9: Isolinee di temperatura nel caso con flusso di terra. Valori in gradi Celsius

L'umidità relativa dell'ambiente non perturbato è in questo caso pari all'86 %. I valori all'interno della nube di aria emessa dall'impianto di rigassificazione scendono rapidamente dal 100% a valori inferiori al 90 % dopo poche centinaia di metri. Al limite orientale del dominio, all'interno dell'area perturbata dall'emissione dell'impianto, l'umidità relativa è superiore al valore di fondo circa il 2 %.

La temperatura dell'aria alla sorgente, come visto precedentemente, è pari a -15.5 C. Per effetto del rimescolamento con l'aria circostante la temperatura della nube emessa cresce rapidamente: a 600 m dall'impianto è circa pari a 6.5 C per tendere al valore imperturbato di 7.7 C. Lungo la scia dell'emissione, al limite orientale del dominio la temperatura dell'aria è inferiore rispetto al valore di fondo di pochi decimi di grado.

La Figura 6.10 mostra il dettaglio delle isosuperfici della lunghezza di visibilità in prossimità del suolo, ottenute attraverso l'applicazione della formula di Kunkel. Anche in questo caso nella zona più prossima al sistema di vaporizzazione, dove il contenuto di acqua liquida è più elevato e la nebbia più densa, la visibilità risulta essere ridotta e sul tratto di strada che in figura scorre in direzione verticale ad Ovest dell'impianto la visibilità può essere dell'ordine qualche metro. Ad una distanza di circa 200 m ad Ovest dell'impianto, inferiore quindi a quella di attracco delle navi nel porto, la visibilità torna ad essere rapidamente ripristinata a valori che non determinano problemi per la circolazione navale.

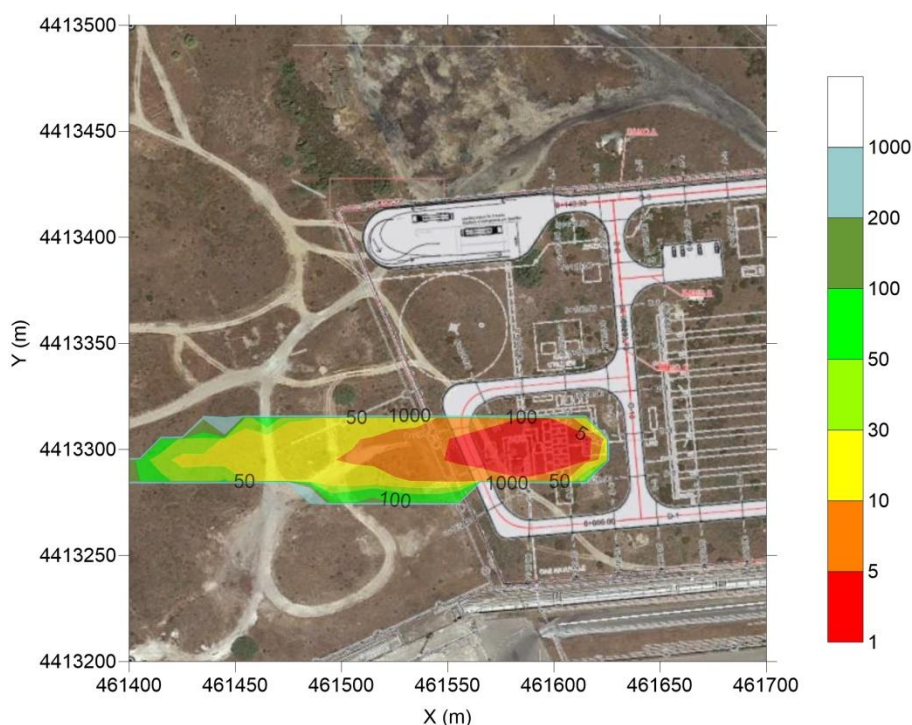


Figura 6.10: Isosuperfici della lunghezza di visibilità in prossimità del suolo espressa in m (scala colorata a destra), calcolate secondo la formula di Kunkel

7 CONCLUSIONI

Scopo del presente rapporto è stata la realizzazione di simulazioni modellistiche in grado di ricostruire la formazione e il trasporto di nebbia che si viene in conseguenza del funzionamento del sistema di vaporizzazione ad aria forzata previsto per l'impianto di stoccaggio, rigassificazione e distribuzione GNL nel Porto di Oristano-Santa Giusta. Le simulazioni hanno considerato due distinte situazioni di formazione e trasporto della nebbia, ipotizzando due situazioni di flusso atmosferico verso potenziali ricettori, ovvero con direzione verso lo Stagno di Santa Giusta oppure verso il mare.

Attraverso i risultati delle simulazioni è stato possibile valutare l'estensione spaziale della nebbia e degli effetti di visibilità al suo interno, nonché della regione dello spazio intorno all'impianto all'interno della quale le condizioni atmosferiche di temperatura ed umidità risultano modificate rispetto a quelle che sarebbero presenti in assenza del sistema di vaporizzazione.

La scelta delle due situazioni meteorologiche è stata guidata dalla ricerca di condizioni ampiamente conservative rispetto alle situazioni di interesse. In tal senso sono state identificate, mediante l'analisi della serie temporale di dati meteorologici disponibili su base annuale per l'anno 2018, due situazioni con flusso in un caso verso il mare e nell'altro verso l'entroterra e lo Stagno di Santa Giusta, in condizioni di elevata umidità relativa, flusso atmosferico debole e temperatura dell'aria al di sotto dei limiti richiesti per il buon funzionamento del sistema di vaporizzazione ad aria forzata. I due casi scelti identificano quindi condizioni tra le peggiori e di conseguenza maggiormente conservative per la formazione e la propagazione delle nebbie.

In aggiunta, rispetto all'effettivo regime di funzionamento del sistema di vaporizzazione che prevede l'uso in parallelo di 6 vaporizzatori per il processo di rigassificazione e 6 in fase di defrosting (durante il quale la formazione di nebbia ha un impatto più difficilmente descrivibile, anche se più limitato o nullo), sono stati ipotizzati in funzione contemporaneamente 12 vaporizzatori per la rigassificazione, definendo in questo una situazione ancora più conservativa.

I risultati mostrano che, in entrambe le situazioni meteorologiche considerate, le variazioni di umidità e temperatura dell'aria introdotte dal sistema di vaporizzazione sull'atmosfera preesistente sono poco significative. Nel caso con flusso verso l'entroterra, l'effetto sul microclima dal punto di vista dell'umidità relativa è assente già a circa 1 km ad Est della sorgente, in quanto l'umidità relativa è superiore solo di 1 % rispetto a quella del fondo, mentre nella direzione trasversale (Nord – Sud) l'effetto dell'impianto di rigassificazione è limitato a poche decine di metri. Per quanto riguarda la temperatura dell'aria, a circa 300 m ad Est dell'impianto la variazione rispetto al valore di fondo esistente risulta essere già inferiore a 1°C. Ciò indica che nessun effetto significativo sul microclima è prevedibile sul Sito Natura 2000 "Stagno di Santa Giusta" che si trova a distanze superiori, a partire da circa 1.5 km ad Est dell'impianto di rigassificazione.

Per quanto riguarda l'estensione della nebbia, per entrambi i casi simulati la massima elongazione al suolo risulta essere di circa 240 m dall'area dei vaporizzatori GNL nella direzione del flusso e circa 60-70 m nella direzione trasversale. La dimensione verticale risulta essere compresa tra i 15 e i 20 m. In queste condizioni, il plume della nebbia non avrà verosimilmente alcun effetto sulla navigazione dato che la zona portuale di attracco si trova a oltre 200 m dall'impianto e potrebbe essere lambita solo dalla parte terminale del pennacchio umido, dove la visibilità risulta essere già sensibilmente superiore.

Il calcolo della lunghezza di visibilità all'interno del plume della nebbia, mostra che esso può interferire esclusivamente sulla viabilità interna alla zona dell'impianto. La strada provinciale n. 49 che corre ad Est dell'impianto e localizzata a circa 1500 m da quest'ultimo non viene infatti interessata dall'eventuale nebbia. Per quanto riguarda la viabilità interna, limitatamente alle condizioni meteorologiche prese in considerazione è possibile un'interferenza solo sulle strade immediatamente limitrofe all'impianto ed intorno ad esso, fino ad una distanza di circa 200 metri dal quest'ultimo, distanza alla quale la visibilità è compresa tra 50 e 100 metri. Occorre comunque ricordare che le condizioni meteorologiche che sono state considerate, scelte per la loro massima criticità rispetto alla formazione e al trasporto della nebbia, per quanto dedotte da dati realistici non risultano essere particolarmente ricorrenti su base annuale. Le condizioni di scarsa visibilità che si vengono quindi a creare rispetto alla viabilità interna riguardano un numero potenzialmente molto limitato di eventi nell'anno.

REFERENZE

- Aria Technologies (2010): Swift General Design Manual. ARIA Report, March 2010, Aria Technologies 2001.
- ARIANET (2015) SURFPro3 (SURrface-atmosphere interFace PROcessor, Version 3) Reference guide. <http://95.228.102.186/trac/SURFPro>.
- Chahine, A., P. Matharan, D. Wendum, L. Musson-Genon, R. Bresson, and B. Carissimo (2015). Modelling atmospheric effects on performance and plume dispersal from natural draft wet cooling towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 136, 151–164.
- Demaël, E. and Carissimo, B. (2008). Comparative evaluation of an eulerian cfd and gaussian plume models based on prairie grass dispersion experiment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3):888–900.
- Kunkel, B. A. (1983) Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. *J. Appl. Meteor.*, 23, 34-41.
- Makké, L., L. Musson-Genon, B. Carissimo, P. Plion, M. Milliez, and A. Douce (2016). A new method for fast computation of three-dimensional atmospheric infrared radiative transfer in a nonscattering medium, with an application to dynamical simulation of radiation fog in a built environment. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73 (10), 4137–4149.
- Milliez, M. and Carissimo, B. (2007). Numerical simulations of pollutant dispersion in an idealized urban area, for different meteorological conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 122(2):321–342.
- Milliez, M. and Carissimo, B. (2008). Computational fluid dynamical modelling of concentration fluctuations in an idealized urban area. *Boundary-layer meteorology*, 127(2):241–259.
- Musson-Genon L. (1987). Numerical simulation of a fog event with a one-dimensional boundary layer model. *Mon. Wea. Rev.*, 115(2), 592-607..
- Pielke R.A., Cotton W.R., Walko R.L., Tremback C.J., Lyons W.A., Grasso L.D., Nicholls M.E., Moran M.D., Wesley D.A., Lee T.J. and Copeland J.H. (1992) A Comprehensive Meteorological Modeling System – RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.
- Qu, Y., Milliez, M., Musson-Genon, L., and Carissimo, B. (2011). Micrometeorological modeling of radiative and convective effects with a building resolving code. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50:1713–1724.
- Qu, Y., Milliez, M., Musson-Genon, L., and Carissimo, B. (2012). Numerical study of the thermal effects of buildings on low-speed airflow taking into account 3d atmospheric radiation in urban canopy. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104:474–483.
- Silibello C. (2006) "SURFPRO (SURrface-atmosphere interFace PROcessor) User's guide", Rapporto ARIANET R2006.06.
- Thomson D.J. (1984) "Random walk modelling of diffusion in inhomogeneous turbulence", *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 110, 1107-1120.
- Thomson D.J. (1987) "Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows". *J. Fluid Mech.*, 180, 529-556.
- Tinarelli G., Anfossi D., Brusasca G., Ferrero E., Giostra U., Morselli M.G., Moussafir J., Tampieri F., Trombetti F., (1994) "Lagrangian particle simulation of tracer dispersion in the lee of a schematic two-dimensional hill", *Journal of Applied Meteorology*, 33, N. 6, 744-756.
- Tinarelli G., D.Anfossi, M. Bider, E.Ferrero, S. Trini Castelli (1999): "A new high performance version of the Lagrangian particle dispersion model SPRAY, some case studies". *Air Pollution Modelling and its Applications XIII*, S.E. Gryning and E. Batchvarova eds., Kluwer Academic / Plenum Press, New York, 499-507.
- Zaidi, H., Dupont, E., Milliez, M., musson Genon, L., and Carissimo, B. (2013). Numerical simulations of the microscale heterogeneities of turbulence observed on a complex site. *Boundary-Layer Meteorology*, 147:237–259.
- Wei, X., E. Dupont, E. Gilbert, L. Musson-Genon, and B. Carissimo (2016). Experimental and numerical study of wind and turbulence in a near-field dispersion campaign at an inhomogeneous site. *Boundary- Layer Meteorology*, 160 (3), 475–499.

Appendice A

Descrizione del codice Code_Saturne

Doc. No. P0012790-5-H4 Rev.0 - Agosto 2019



La parte dello studio che coinvolge simulazioni con un codice CFD è stata effettuata con l'ausilio del modello di Calcolo CFD Code_Saturne. Il codice è stato sviluppato dal servizio R&D (Recherche et Développement, originariamente DER) di EDF - Électricité de France ed è stato reso disponibile sotto la licenza GNU GPL nel marzo 2007. In particolare la parte atmosferica di Code_Saturne è stata sviluppata congiuntamente da EDF e CERE (Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique) a partire dalla versione precedente del codice denominata Mercure..

Il codice è basato su un approccio a volumi finiti in grado di ospitare griglie di calcolo (mesh) di tutti i tipi: strutturati, strutturati per blocchi, non strutturati, ibridi, lineari, non lineari, e qualsiasi tipo di elemento : tetraedro, esaedro, piramide, qualsiasi poliedro.

Il modello è in generale in grado di risolvere il sistema delle equazioni fluidodinamiche di Navier-Stokes per flussi 2D, 3D asimmetrici e 3D, stazionari e non-stazionari, laminari o turbolenti, incompressibili o debolmente-dilatabili, isotermi o non-isotermi con possibilità di integrare, come nel caso in esame, equazioni per flussi bifase. Il modello contiene inoltre un consistente numero di modelli fisici al suo interno, ad esempio per la combustione di gas, carbone o olio pesante o per la parametrizzazione dello strato limite atmosferico ed è capace di gestire flussi a diverse scale sia neutri che stratificati, che ne permettono l'applicazione nel campo della dispersione di inquinanti, produzione di energia eolica e canopy urbano (<https://code-saturne.org/>).

Diversi studi relativi all'utilizzo di Code Saturne e del modulo atmosferico sono stati pubblicati negli ultimi anni e testimoniano il vasto campo di applicazioni del codice nel contesto atmosferico. Ad esempio Demael and Carissimo, 2008 hanno confrontato il comportamento del modello con i dati dell'esperimento Prairie Grass e i risultati di altri modelli di dispersione, mentre Milliez e Carissimo, 2007, Milliez e Carissimo, 2008 hanno verificato le capacità del modello di ricostruire il flusso e la dispersione a micro-scala confrontandosi con i risultati dell'esperimento MUST. Qu et al., 2011, Qu et al., 2012 hanno invece valutato gli effetti termici degli edifici sui flussi atmosferici locali utilizzando un modello accoppiato radiazione-dinamica. Zaidi et al., 2013 hanno invece simulato il flusso su terreno complesso semi-urbano verificando i risultati di un modello specifico di canopy per simulare gli effetti di una foresta. Chahine et al., 2015 hanno invece verificato le performance di una torre di raffreddamento, modellando mediante il codice la formazione della nube e la sua dispersione in condizioni realistiche. Wei et al., 2016 hanno realizzato uno studio numerico su vento e turbolenza confrontandosi con i risultati della campagna di misura SIRTA, ponendo l'attenzione sull'impatto generato dalla stabilità atmosferica e le disomogeneità del terreno. Makké et al., 2016 hanno invece integrato e verificato un nuovo modello tridimensionale radiativo, applicandolo in simulazioni dinamiche sulla formazione di nebbia radiative in presenza di edifici.

Appendice B

Descrizione dei codici Swift, SurfPro e Spray

Doc. No. P0012790-5-H4 Rev.0 - Agosto 2019



Per le simulazioni del trasporto della nebbia e del pennacchio umido formato dal sistema di rigassificazione è stata utilizzata la suite di programmi *ARIA Impact 3D*, costituita dal codice Swift per la ricostruzione diagnostica dei campi di vento su terreno complesso, dal codice SurfPro 3.1 per la ricostruzione dei campi di turbolenza e dal modello di dispersione lagrangiano a particelle Spray 3.1.13. L'insieme dei programmi citati consente di tenere conto in maniera diretta dell'orografia che di eventuali disomogeneità del terreno (come ad esempio la presenza di interfaccia terra-mare).

Nei paragrafi successivi è contenuta una descrizione più dettagliata di ognuno dei codici e delle loro principali funzionalità.

Il modello Swift sviluppato da EDF e ARIA Technologies S.A. (Aria Technologies, 2010, Finardi et al. 1998) è un codice "mass-consistent" di tipo diagnostico in grado di ricostruire i campi tridimensionali di vento e temperatura.

Per la ricostruzione del campo di vento, il modello opera essenzialmente in due fasi:

- ✓ nella prima effettua l'interpolazione sul dominio di calcolo tridimensionale dei dati di vento forniti in input;
- ✓ nella seconda, detta di analisi oggettiva, applica il principio fluidodinamico di conservazione della massa ad ogni cella del dominio e produce un campo di vento definito aggiustato.

La fase di aggiustamento consiste nella soppressione della divergenza presente nel campo interpolato, attraverso la minimizzazione del seguente funzionale:

$$I(u, v, w, \lambda) = \int_V (u - u_0)^2 + (v - v_0)^2 + \alpha(w - w_0)^2 + \lambda \nabla \cdot \underline{u} \, dV$$

con: u_0, v_0, w_0 componenti cartesiane del campo interpolato;

u, v, w componenti cartesiane del campo aggiustato;

λ è il moltiplicatore di Lagrange;

$\nabla \cdot \underline{u}$ è la divergenza del vettore vento $\underline{u} = (u, v, w)$.

Il parametro α consente di pesare diversamente l'aggiustamento delle componenti orizzontali e verticali della velocità del vento: con $\alpha=1$ non c'è differenza nel grado di aggiustamento, mentre valori più piccoli/grandi di α fanno sì che l'aggiustamento sia operante principalmente sulla componente orizzontale/verticale del campo di vento. Inoltre, poiché da α dipende la parte di flusso che aggira l'ostacolo orografico in rapporto a quella che lo oltrepassa verticalmente, il suo valore è usato spesso per tenere conto della stabilità atmosferica sul flusso.

La componente verticale del campo di vento (w) normalmente non viene considerata durante la fase di interpolazione, in quanto non si dispone di una rete tridimensionale di misura per tale parametro, quindi si considera $w_0=0$ per ogni cella del dominio e, di fatto, w viene generata dal modello durante la fase di aggiustamento.

Per costruzione, i modelli di tipo "mass-consistent" hanno la caratteristica di produrre il migliore campo di vento a divergenza nulla che minimizza lo scostamento complessivo dall'iniziale interpolazione grezza delle misure. Per questo motivo, la prima fase di interpolazione delle misure di vento riveste grande importanza nel processo di ricostruzione del campo di vento finale. Inoltre il campo interpolato che si ottiene dipende spesso dalla configurazione spaziale delle postazioni di misura, oltre che dalle quote di misura dei profili verticali.

Swift consente di scegliere tra diversi metodi di interpolazione: propone l'interpolazione di Cressman pesata sull'inverso del quadrato della distanza, che può essere effettuata separatamente per i diversi strati verticali (Cressman 2D) o in maniera tridimensionale (Cressman 3D), e il metodo non isotropo di triangolazione delle misure al suolo associato ad un'interpolazione tridimensionale delle misure in quota (profili verticali). L'interpolazione dei dati di vento viene eseguita indipendentemente per ognuna delle componenti cartesiane del vettore vento.

Più esplicitamente, il metodo Cressman 2D consiste dapprima nell'interpolare linearmente sugli strati verticali del reticolo i profili di vento, quindi nel calcolare, per ogni strato, le componenti del vento nei punti di coordinate (x,y) della maglia, secondo le equazioni:

$$U_i(x, y, k) = \frac{\sum_{n=1}^{NMSUR} [U_i(x_n, y_n) P_n(x, y)]}{\sum_{n=1}^{NMSUR} P_n(x, y)} \quad i = 1, 2$$

- ✓ con: $U_1 = u_0$ e $U_2 = v_0$, componenti orizzontali del campo interpolato;

NMSUR, numero di stazioni dello strato:

- ✓ per il primo strato sopra il suolo ($k=2$), NMSUR è il numero delle misure al suolo utilizzate;
- ✓ per gli strati sovrastanti, NMSUR è pari al numero delle misure interpolate a partire dai profili considerati;

$P_n(x, y)$ il peso associato alla postazione di misura ed espresso dalla funzione:

$$P_n(x, y) = \frac{1}{r_n^2}$$

dove:

- ✓ $r_n = \frac{R_n}{P_h}$;
- ✓ $R_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2}$, distanza del punto maglia (x, y) dalla stazione di coordinate (x_n, y_n) ;
- ✓ P_h il parametro di portata orizzontale, calcolato automaticamente da Swift, in funzione della distanza tra le stazioni e del passo della maglia orizzontale.

Al termine di questa inizializzazione del campo tridimensionale, mediante una funzione esponenziale può essere eseguito un raccordo tra il campo alla superficie $U_i(x, y, 2)$, relativo al primo strato della maglia, e quello in quota $U_i(x, y, k)$, riguardante i restanti strati del reticolo. Tutto ciò in modo da attenuare le discontinuità che possono insorgere per il fatto che, per il livello superficiale vengono utilizzate solo le misure delle postazioni al suolo, mentre per i livelli sovrastanti vengono usate solo le misure dei profili di vento.

Nella interpolazione di tipo Cressman 3D, il peso $P_n(x, y, z)$ è funzione della distanza tridimensionale e le componenti orizzontali di ogni cella del grigliato, $U_i(x, y, k)$, sono calcolate tenendo conto non solo della distanza in senso orizzontale ma anche della quota a cui è stata effettuata la misura. In questo modo si ha una ricostruzione più continua dei profili di ogni cella.

Il codice SurfPro sviluppato da ARIANET S.r.l. (Silibello, 2006, ARIANET, 2015), è un preprocessore meteorologico in grado di ricostruire le principali variabili che descrivono la turbolenza atmosferica su terreno complesso, necessarie in input a modelli di dispersione. Il codice riceve in input i campi tridimensionali di vento e temperatura generati dal codice Swift, eventuali variabili meteorologiche disponibili sul territorio in esame (quali ad esempio la nuvolosità ora per ora disponibile dai campi provenienti da un modello prognostico) e la matrice di dati di uso del suolo, su un grigliato orizzontale corrispondente a quello dei dati di vento, in grado di descrivere la non omogeneità orizzontale del terreno nella risposta alla forzante radiativa solare e la conseguente disomogeneità nei campi di turbolenza che si vengono a determinare. Utilizzando diversi schemi di parametrizzazione della turbolenza consolidati in letteratura, il codice ricostruisce campi bidimensionali delle seguenti variabili:

- ✓ altezza di rugosità z_0 ;
- ✓ altezza dello strato limite notturno o dello strato limite convettivo diurno H_{mix} ;
- ✓ velocità di frizione u_* ;
- ✓ altezza di Monin-Obukhov L ;
- ✓ velocità convettiva di scala w .

Il programma tiene inoltre conto sia dell'inclinazione dei pendii rispetto a quella dei raggi solari che degli effetti d'ombra presenti a causa dell'eventuale mascheramento provocato dall'orografia.

Spray 3.1 sviluppato da ARIANET S.r.l. e ARIA Technologies S.A. (Tinarelli et al., 1994, 1999, 2007) è un modello tridimensionale per la simulazione della dispersione di inquinanti in atmosfera in grado di tenere conto delle variazioni del flusso e della turbolenza atmosferica sia nello spazio (condizioni disomogenee) che nel tempo (condizioni non stazionarie). È in grado di ricostruire campi di concentrazione determinati da sorgenti puntiformi, lineari, areali o volumetriche. L'inquinante è simulato da "particelle virtuali" il cui movimento è definito sia dal vento medio locale che da velocità casuali che riproducono le caratteristiche statistiche della turbolenza atmosferica. In questo modo, differenti parti del pennacchio emesso possono "vedere" differenti condizioni atmosferiche, permettendo simulazioni più realistiche in condizioni difficili da riprodurre con modelli tradizionali (calma di vento, inversione di temperatura con la quota, impatto con orografia complessa, dispersione in siti con forti discontinuità spaziali tipo terra-mare o città-campagna).

Il moto di ogni particella viene ricostruito utilizzando le equazioni:

$$\begin{aligned}x(t + \Delta t) &= x(t) + u_x(t) \cdot \Delta t \quad ; \quad u_x(t) = \overline{U_x}(t) + u'_x(t) \\y(t + \Delta t) &= y(t) + u_y(t) \cdot \Delta t \quad ; \quad u_y(t) = \overline{U_y}(t) + u'_y(t) \\z(t + \Delta t) &= z(t) + u_z(t) \cdot \Delta t \quad ; \quad u_z(t) = \overline{U_z}(t) + u'_z(t)\end{aligned}$$

dove x, y, z rappresentano le coordinate cartesiane di ogni singola particella nel dominio tridimensionale e u_x, u_y, u_z le componenti delle velocità, suddivise in parte media e fluttuazione turbolenta. La parte media, responsabile del trasporto degli inquinanti, è ottenuta dal modello Swift nel sistema di riferimento *terrain-following* x, y, s , in cui la coordinata verticale s è definita come:

$$s = \frac{z - z_g}{z_{top} - z_g}$$

dove z è la coordinata geometrica verticale, z_{top} l'altezza del dominio di calcolo e $z_g(x, y)$ l'altezza dell'orografia. Le particelle interpolano linearmente il valore del vento nel punto x, y, z in cui si trovano utilizzando i valori di tali matrici. SPRAY 3.1 consente di simulare condizioni non stazionarie interpolando linearmente nel tempo il valore tra quelli di due matrici successive.

Le fluttuazioni turbolente u'_x, u'_y e u'_z , responsabili della diffusione, sono determinate risolvendo le equazioni differenziali stocastiche di Langevin:

$$u'_i(t + \Delta t) = a_i(\vec{x}, \vec{u}(t), t) + b_i(\vec{x}, \vec{u}(t), t) \Delta \xi \quad ; \quad i = x, y, z$$

dove a e b sono funzioni della posizione e della velocità di ogni particella e dipendono dalle caratteristiche della turbolenza e dallo schema risolutivo utilizzato. SPRAY 3.1 implementa gli schemi indicati da Thomson (1984, 1987).

Per pilotare una simulazione di dispersione che tenga anche conto dei fenomeni di deposizione secca e umida, il modello Spray 3.1 utilizza principalmente:

- ✓ campi tridimensionali di vento e temperatura, forniti dal codice Swift;
- ✓ campi bidimensionali di turbolenza $z_0, H_{mix}, u^*, L, w^*$ forniti dal codice SurfPro;
- ✓ dati di emissione, costituiti da una sequenza di informazioni sulla loro geometria e localizzazione spaziale, sulle quantità in massa emesse per ciascuna delle specie inquinanti prese in considerazione nella simulazione e sul numero di particelle da utilizzare. Ad ogni particella viene attribuita una massa per ogni specie, dipendente dalle caratteristiche della sorgente nel momento in cui viene emessa, potendo simulare in questo modo condizioni non stazionarie.

A partire dalla versione 3.1.13, utilizzata nel presente lavoro, il codice è in grado di calcolare, in condizioni di flusso ed emissioni stazionarie e in ogni punto del dominio di calcolo, la temperatura all'interno di un pennacchio emesso note:

- ✓ la temperatura all'emissione T_s
- ✓ la temperatura atmosferica di background dell'aria T_b
- ✓ Il modello determina la temperatura attraverso il rapporto tra la concentrazione delle particelle all'emissione e la concentrazione in ogni punto del dominio. La temperatura T viene calcolata secondo la formula:

$$T = T_s D + T_b (1-D) \quad \text{dove}$$

$D = C / C_s$ è il rapporto di diluizione con:

- ✓ C = concentrazione in particelle in ogni punto del dominio
- ✓ C_s = concentrazione in particelle all'emissione



RINA Consulting S.p.A. | Società soggetta a direzione e coordinamento amministrativo e finanziario del socio unico RINA S.p.A.
Via San Nazaro, 19 - 16145 GENOVA | P. +39 010 31961 | rinaconsulting@rina.org | www.rina.org
C.F./P. IVA/R.I. Genova N. 03476550102 | Cap. Soc. € 20.000.000,00 i.v.