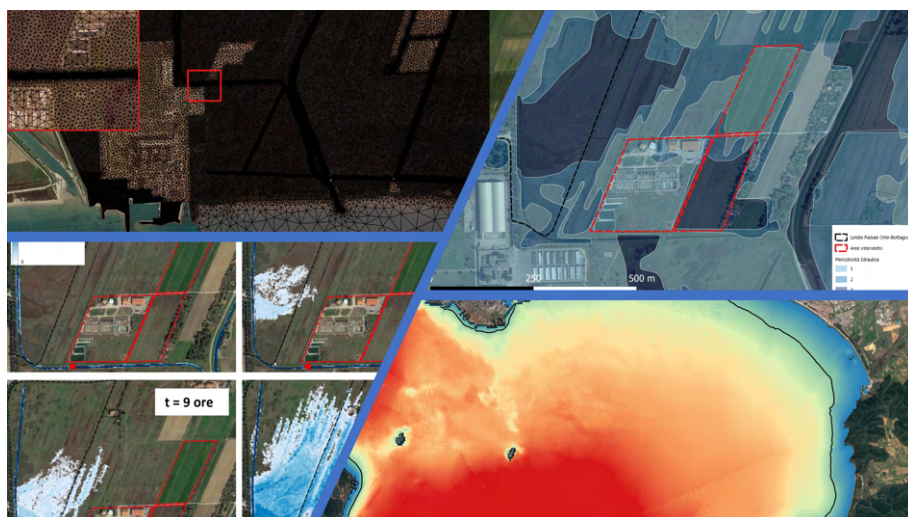


Contratto di Ricerca LIAM CT-44

**Approfondimenti specialistici idrologico-idraulici nell'area  
dell'impianto di itticoltura in località "Vignarca"**

*Relazione Tecnica*



**LIAM**

LABORATORIO DI IDRAULICA AMBIENTALE E MARITTIMA , DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ARCHITETTURA E AMBIENTALE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI L' AQUILA

[HTTP://ING.UNIVAO.IT/LIAM](http://ing.univao.it/liam)

## Gruppo di Lavoro

---

**Coordinatore Scientifico:** Ing. Davide Pasquali, Ph.D.

**Supporto al coordinamento:** Ing. Danile Celli, Ph.D.

**Collaboratori:** Ing. Carmine Di Nucci, Ph.D.  
Ing. Nino Minicucci  
Ing. Ludovico Cipollone  
Ing. Valerio Gianforte



---

<i>Revisione</i>	<i>Data</i>	<i>Note</i>
R01	28/11/2023	-
R02	29/11/2023	-



## Indice

<b>1</b>	<b>Premesse</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Obiettivi e approccio metodologico</b>	<b>7</b>
2.1	Finalità dello studio	7
2.2	Analisi idrologica	8
2.3	Analisi meteomarina	9
2.4	Analisi anemometrica	9
2.4.1	L'analisi dei livelli del mare	9
2.4.2	La componente astronomica	9
2.4.3	La componente meteorologica	10
2.4.4	Il sovrizzo indotto dal moto ondoso frangente	12
2.5	Il modello numerico per la modellazione idraulica	13
2.6	Valutazione dei fenomeni di diffusione e dispersione	16
2.7	Valutazione degli effetti relativi all'emungimento da pozzi	16
<b>3</b>	<b>Approfondimento Idrologico-Idraulico</b>	<b>20</b>
3.1	Inquadramento territoriale	20
3.2	Inquadramento idrologico-idraulico	21
3.3	Dati di riferimento	24
3.4	Condizioni al contorno	25
3.4.1	Definizione delle forzanti meteomarine e sovrizzo atteso	26
3.4.2	Stima della condizione al contorno alla foce	33
3.4.3	Modellazione dello scarico all'interno del Fosso Vignarca	35
3.5	Implementazione delle griglie di calcolo	35
3.6	Scenari di simulazione	37
3.7	Risultati	37
3.7.1	Validazione dei risultati numerici	45
<b>4</b>	<b>Fenomeni di diffusione e dispersione</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>Effetti relativi all'emungimento da pozzi</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>Osservazioni conclusive</b>	<b>68</b>



## Elenco delle figure

3-1	Immagine satellitare dell'area. La linea tratteggiata in rosso indica la localizzazione dell'area di intervento. . . . .	20
3-2	Reticolo idrografico dell'area oggetto di studio . . . . .	21
3-3	Dettaglio della connessione idraulica tra il Fosso Vignarca e l'Area ricadente nella Padule Orti-Bottagone. . . . .	22
3-4	Perimetrazione delle aree a diversa pericolosità idraulica così come riportato nel PGRA . . . . .	23
3-5	Dettaglio della posizione in cui sono stati acquisiti i dati meteomarini. Il punto (Posizione 42.25°N, 11.00°E) è da considerarsi coincidente con quello della boa ondometrica di Giannutri. . . . .	25
3-6	Dettaglio della posizione dello scarico delle acque nel Fosso Vignarca (cerchio rosso) . . . . .	35
3-7	Griglia di calcolo. In alto a sinistra si riporta dettaglio della zona subito a valle della curva del Fosso Vignarca. . . . .	36
3-8	Tabella riassuntiva degli scenari simulati. . . . .	37
3-9	Risultati scenario S11 . . . . .	38
3-10	Risultati scenario S12 . . . . .	39
3-11	Risultati scenario S13 . . . . .	41
3-12	Risultati scenario S14 . . . . .	42
3-13	Risultati scenario S21 . . . . .	43
3-14	Risultati scenario S22 . . . . .	44
3-15	Rilievo fotografico del 22/11/2023. . . . .	45
3-16	Rilievo fotografico del 24/11/2023. . . . .	46
4-1	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 1 . . . . .	49
4-2	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 2 . . . . .	50
4-3	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 3 . . . . .	51
4-4	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 4 . . . . .	52
4-5	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 5 . . . . .	53
4-6	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 1 . . . . .	54
4-7	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 2 . . . . .	55
4-8	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 3 . . . . .	56
4-9	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 4 . . . . .	57
4-10	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 5 . . . . .	58
4-11	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 1 . . . . .	59
4-12	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 2 . . . . .	60
4-13	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 3 . . . . .	61

4-14	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 4 . . . . .	62
4-15	Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 5 . . . . .	63
5-1	Sezione stratigrafica della fascia costiera fra Piombino e Follonica proposta da ghezzi et al, 1995. . . . .	65
5-2	Andamento della quota piezometrica al variare della distanza dal pozzo per spessori della falda variabili nel caso di strato permeabile di ghiaia. . . . .	66

## Elenco delle tabelle

3-1	Valori caratteristici della componente astronomica in corrispondenza della stazione mareografica di Marina di Campo. . . . .	26
3-2	Valori dei livelli di ritorno della componente meteorologica della marea al variare del tempo di ritorno. . . . .	27
3-3	Risultato dell'adattamento statistico sugli estremi della componente meteorologica della marea utilizzando la funzione di ripartizione della distribuzione generalizzata di Pareto . . . . .	27
3-4	Grafici Diagnostici relativi ai quantili osservati e stimati (pannello di sinistra) e in termini di probabilità osservata e stimata (pannello di destra). La linea tratteggiata rappresenta la retta di perfetto accordo . . . . .	28
3-5	Rappresentazione polare del clima annuale medio del moto ondoso. Risultati dell'analisi ondometrica a largo. Analisi media annuale. Rappresentazione polare della frequenza di apparizione (lunghezza delle barre) degli stati di mare in funzione dell'altezza d'onda significativa (colori) e della direzione di provenienza. Le calme sono costituite dagli stati di mare con altezza d'onda significativa strettamente inferiore a 0.50 m. . . . .	29
3-6	Confronto tra i valori Era5 e quelli acquisiti dalla boa di Giannutri. La linea nera indica la retta di miglior accordo mentre quella rossa la correlazione tra altezza d'onda significativa misurata e ricostruita . . . . .	30
3-7	Valori dei livelli di ritorno delle onde estreme al variare del tempo di ritorno. . . . .	31
3-8	Risultato dell'adattamento statistico sul campione di estremi di moto ondoso utilizzando la funzione di ripartizione della distribuzione generalizzata di Pareto . . . . .	31
3-9	Grafici Diagnostici relativi ai quantili osservati e stimati (pannello di sinistra) e in termini di probabilità osservata e stimata (pannello di destra). La linea tratteggiata rappresenta la retta di perfetto accordo . . . . .	32
3-10	Profilo batimetrico dell'area di interesse e posizione della linea batimetrica alla meno dieci metri (linea nera) . . . . .	33
3-11	Schema riassuntivo dei valori utilizzati per il calcolo della condizione al contorno sulla foce. . . . .	34
3-12	Schematizzazione della condizione al contorno di valle nella configurazione con $z_{max}=0.8$ m . . . . .	34
3-13	Valori del coefficiente di scabrezza e della dimensione massima degli elementi per le differenti aree. . . . .	36

---

## 1 Premesse

---

Il presente documento illustra i risultati dello studio idrologico-idraulico effettuato dal Laboratorio di Idraulica Ambientale e Marittima del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale dell'Università degli Studi dell'Aquila (LIAM) relativo alla valutazione dettagliata delle condizioni idrologiche-idrauliche nell'area dell'impianto di itticoltura in località "Vignarca".

Lo studio è stato effettuato su richiesta della società IGF srl.

In particolare, nell'ambito del progetto di "riqualificazione e ampliamento dell'attività esistente di itticoltura" si è palesata la necessità di approfondire le caratteristiche del deflusso delle acque nel fosso Vignarca a seguito dello sversamento di acque salmastre provenienti dall'impianto in progetto. In particolare il deflusso è stato caratterizzato considerando l'influenza della risalita delle acque marine per effetto dell'incremento dei livelli nell'area di sbocco del fosso. Inoltre, sono state indagate le caratteristiche di dispersione delle acque salmastre provenienti dall'impianto. Sono inoltre stati valutati gli effetti dell'emungimento di acqua dalla falda profonda a seguito della realizzazione di pozzi (prevista e non ancora oggetto di progettazione).

Il documento è organizzato come segue:

- il capitolo 2 illustra gli obiettivi dello studio e dettaglia l'approccio metodologico;
- il capitolo 3 illustra l'approfondimento idrologico idraulico;
- il capitolo 4 mostra i fenomeni di diffusione e dispersione dell'acqua in uscita dallo scarico previsto all'interno del Fosso Vignarca.
- il capitolo 5 analizza, con formulazioni semplificate gli effetti relativi all'emungimento da pozzi;
- il capitolo 6 traccia alcune osservazioni conclusive.

---

## 2 Obiettivi e approccio metodologico

---

### 2.1 Finalità dello studio

Gli scopi dello studio, sono legati ad approfondimenti specialistici idrologico-idraulici finalizzati a fornire una valutazione dettagliata delle condizioni idrologiche-idrauliche nell'area dell'impianto di itticultura in località "Vignarca".

La necessità di approfondimento è legata al progetto di "riqualificazione e ampliamento dell'attività esistente di itticultura" in località Vignarca, nel Comune di Piombino. In particolare, il progetto prevede lo scarico di acque (preventivamente ed opportunamente trattate) provenienti dall'impianto (in progetto) nel fosso Vignarca. Pertanto lo studio è rivolto principalmente alla caratterizzazione del deflusso delle acque nel fosso a seguito dello scarico contemplando l'influenza delle variazioni dei livelli idrici nell'area di sbocco sul deflusso stesso. Inoltre, vengono studiate le caratteristiche di dispersione delle acque in uscita dall'impianto, al fine di caratterizzarne la dispersione nel corpo idrico ricevente.

Nel progetto, sebbene non ancora oggetto di progettazione viene prevista la realizzazione di due pozzi. In tal caso viene effettuato un studio parametrico rispetto all'influenza che i previsti emungimenti possano avere sulla falda freatica.

In particolare, il presente studio si propone i seguenti obiettivi:

- valutare l'influenza dei livelli del mare, dei venti e delle condizioni meteo-marine sui livelli idrici che si instaurano all'interno fosso del Vignarca in condizioni ordinarie e di magra;
- valutare fenomeni di diffusione e dispersione causati dallo scarico di acque salmastre a carico delle acque del Fosso Maestro del Vignarca;
- valutazione quantitativa dell'effetto dell'emungimento dei pozzi sulla falda profonda;

Nel rispetto delle finalità lo studio comprende:

- l'identificazione (tramite verifica/aggiornamento delle informazioni plano-altimetriche) della configurazione dello stato di fatto dell'area oggetto di studio;
- l'identificazione di tutti gli elementi singolari di interesse per la scala di dettaglio con il quale si ricostruisce il processo di esondazione (es. aree a forte pendenza, esistenza di manufatti, assi viari, etc...);
- l'identificazione delle caratteristiche di scabrezza idraulica di ogni area;
- definizione delle condizioni al contorno (in termini di portata e livelli) e dell'estensione del dominio di calcolo;
- stima delle caratteristiche dell'idrodinamica (velocità della corrente e profondità) per diversi tempi di ritorno;
- stima dell'estensione e della configurazione delle aree a diversa pericolosità idraulica.

Nel rispetto delle finalità esplicitate nel paragrafo precedente, lo studio comprende:

1. l'identificazione della configurazione dell'area oggetto di studio;
2. l'identificazione di tutti gli elementi singolari di interesse per lo studio idrologico-idraulico che influiscono sul deflusso delle acque nel fosso Vignarca ;
3. l'identificazione delle condizioni al contorno allo sbocco del Fosso Maestro del Vignarca;
4. la riproduzione numerica dell'idrodinamica nel dominio di interesse;
5. la stima delle caratteristiche dell'idrodinamica del Fosso Maestro del Vignarca;
6. la stima delle caratteristiche relative alla qualità delle acque a seguito di fenomeni di diffusione delle acque salmastre;
7. la stima degli effetti dell'emungimento di acqua dalla falda profonda.

## 2.2 Analisi idrologica

Nell'ambito dell'analisi del deflusso delle acque all'interno di corsi d'acqua e/o canalizzazioni risulta opportuna una caratterizzazione idrologica dell'area che ne tracci le caratteristiche salienti.

In relazione allo scopo dello studio è importante analizzare i corsi d'acqua che interessano il dominio di interesse inquadrandoli all'interno del reticolo idrografico della regione di appartenenza.

In secondo luogo, è necessario far riferimento alla normativa vigente in materia di gestione del rischio alluvioni e da eventuali approfondimenti specialistici e/o aggiornamenti operati da enti privati e pubblici che interessando l'area oggetto di studio e che forniscano elementi utili alla definizione dell'idrologia del sito.

### 2.3 Analisi meteomarina

Nel caso in cui lo studio del deflusso delle acque appartenenti a corsi d'acqua e/o canalizzazioni si riferisca alle aree di foce, è opportuno valutare l'influenza delle forzanti meteomarine sul naturale deflusso delle acque. Come noto, infatti, il livello del mare non è costante, ma subisce variazioni legate alle maree e all'effetto del moto ondoso. In estrema sintesi le perturbazioni atmosferiche (e quindi l'azione del vento e la variazione della pressione atmosferica) agiscono sulla superficie marina generando il moto ondoso (onde di vento) e amplificando il segnale di marea. Quest'ultimo, sovrapposto al sovrizzo dovuto al moto ondoso frangente, genera localmente un valore del livello del mare che differisce dal livello medio e che influisce sul normale deflusso delle acque che provengono dai corsi d'acqua. La quantificazione di tali effetti è subordinata ad uno studio dettagliato del moto ondoso e della componente marea-ale. Di seguito vengono riportati i dettagli delle analisi volte alla quantificazione del sovrizzo nella zona della fascia costiera.

### 2.4 Analisi anemometrica

Dall'analisi dello studio meteomarino del nuovo piano regolatore portuale del porto di Piombino (studio relativo all'anno 2008) emerge che gli effetti del solo vento sotto costa risultano essere trascurabili. Pertanto, nel presente lavoro, finalizzato alla stima delle condizioni che influiscono sull'aumento dei livelli in corrispondenza della foce del Fosso Acquaviva (in cui confluisce il Fosso Vignarca), l'analisi del vento non viene effettuata direttamente, ma se ne tiene conto in modo indiretto nella stima del contributo meteorologico della marea e nel sovrizzo indotto dal moto ondoso frangente (che dipende anche dall'azione del vento)

#### 2.4.1 L'analisi dei livelli del mare

Il livello del mare può essere considerato come la sovrapposizione di tre componenti: la marea astronomica (componente armonica), il residuo meteorologico (noto anche come residuo o con il termine anglofono *storm surge*) e il livello medio.

Nel presente studio sia la componente armonica e quella meteorologia sono state caratterizzate statisticamente.

Nei paragrafi che seguono vengono illustrate le tecniche utili alla caratterizzazione delle due componenti.

#### 2.4.2 La componente astronomica

La componente astronomica è di natura deterministica, è nota in qualsiasi punto del globo e dipende fondamentalmente dalla mutua interazione tra Sole, Terra e Luna e può essere calcolata con estrema precisione in ogni parte del globo. Tale componente può essere

ricavata dal segnale misurato nel mareografo applicando la tecnica standard dell'analisi armonica (Codiga, 2011<sup>1</sup>). Secondo tale metodologia, la componente armonica è il risultato della sovrapposizione di componenti sinusoidali di ampiezza e fase nota (legate all'attrazione gravitazionale di Terra, Sole e Luna). Pertanto è possibile sia ricostruire livelli di marea astronomica del passato, sia prevedere eventi futuri. Calcolata la componente astronomica, è possibile caratterizzare statisticamente i livelli del mare. In particolare è possibile identificare una serie di livelli caratteristici (valutati su base annuale):

- HAT - Highest Astronomical Tide (massima alta marea)
- MHWS - Mean High Water Spring (media delle alte maree sizigiali)
- MHWN - Mean High Water Neap (media delle alte maree di quadratura)
- MWL - Mean Water Level (l.m.m., livello medio marino)
- MLWN - Mean Low Water Neap (media delle basse maree di quadratura)
- MLWS - Mean Low Water Spring (media delle basse maree sizigiali)
- LAT - Lowest Astronomical Tide (massima bassa marea)

Il carattere deterministico della componente astronomica, fa sì che i livelli caratteristici non risentano di eventuali variazioni dovute a cambiamenti del clima o variazioni di lungo periodo. Ne consegue che sono dei livelli di riferimento del punto in cui viene effettuata l'analisi. Tali livelli, in assenza di perturbazioni atmosferiche, sono quindi da considerarsi come condizione al contorno di valle dei corsi d'acqua (il livello del mare influenza il deflusso fluviale in corrispondenza dell'area di foce).

Per quanto riguarda invece il livello medio del mare esso può essere ricavato effettuando una operazione di media sulla serie di livello misurata.

### 2.4.3 La componente meteorologica

La componente meteorologica si ottiene sottraendo la componente armonica (depurata o meno della media) al livello misurato dal mareografo (livello totale). Tale componente è dovuta alla interazione delle masse d'acqua con le perturbazioni atmosferiche; pertanto è di natura stocastica.

Nel Mar Mediterraneo questa componente è dovuta principalmente all'azione tangenziale del vento sullo specchio acqueo e alla pressione atmosferica. In relazione a quest'ultima, infatti, per un fenomeno fisico noto come "effetto barico inverso", ad una diminuzione di pressione corrisponde un aumento del livello del mare (circa 1 cm per ogni millibar di sottopressione

<sup>1</sup>Codiga, D. L. (2011). Unified tidal analysis and prediction using the UTide Matlab functions.



rispetto alla pressione atmosferica). Essendo di natura stocastica, il residuo meteorologico viene tipicamente caratterizzato mediante una analisi degli eventi estremi (Coles, S., 2001). L'analisi estrema viene effettuata su campione di dati statisticamente indipendenti ed omogenei. Tali proprietà vengono garantite applicando un metodo POT (Peaks Over Threshold) e controllando che gli estremi sopra soglia (estratti dalla serie misurata) siano separati da una distanza temporale dai 2 ai 5 giorni (in considerazione della durata tipica delle perturbazioni). Il valore della soglia, valutabile con metodologie proposte in letteratura (Coles, S., 2001), deve essere abbastanza alto in modo da garantire che il campione estratto rappresenti le code della distribuzione e assicurando una numerosità del campione che risulti statisticamente rappresentativa.

Il campione di eventi estremi estratto, è stato analizzato mediante un processo di inferenza statistica applicando la Distribuzione Generalizzata di Pareto (Generalized Pareto Distribution - GPD).

Nel dettaglio, il residuo meteorologico può essere considerato una variabile aleatoria per la quale è possibile definire la misura dell'eventualità che una sua realizzazione possa essere raggiunta o superata in un dato intervallo di tempo secondo la legge

$$P(x^*) = 1 - \frac{1}{1 - TR(x^*)} \quad (1)$$

dove  $TR(x^*)$  è il tempo di ritorno, ossia il tempo medio che bisogna attendere affinché un evento venga raggiunto o superato mentre  $P(x^*)$  è la funzione di ripartizione di probabilità.

Nel caso degli eventi estratti con metodo POT, come funzione di ripartizione viene spesso utilizzata la Distribuzione Generalizzata di Pareto che assume la forma

$$P(y) = 1 - \left(1 + \frac{\xi y}{\tilde{\sigma}}\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (2)$$

dove

$$\tilde{\sigma} = \sigma + \xi(u - \mu) \quad (3)$$

e  $y$  rappresenta l'eccesso rispetto alla soglia.

L'equazione (2) è una famiglia di distribuzioni che si specializza una volta definita la soglia  $u$  e stimati i parametri  $\xi$ ,  $\mu$  e  $\sigma$  mediante un processo di inferenza statistica.

La valutazione della concordanza tra la distribuzione empirica di un insieme di dati e una distribuzione teorica verrà valutata mediante il Q-Q plot (Quantile-Quantile plot) e i P-P plot (Probability-Probability plot). Il Q-Q plot confronta i quantili della distribuzione dei dati osservati con quelli di una distribuzione di probabilità teorica (e.g. la GPD), mentre il P-P plot confronta le probabilità cumulative dei dati osservati con quelle di una distribuzione di probabilità teorica.

Nota la funzione di ripartizione, stimati quindi i coefficienti  $\xi$ ,  $\mu$  e  $\sigma$  che specializzano la famiglia di curve descritta dall'equazione (2) per il campione considerato, è possibile, fissato un tempo di ritorno assegnato, stimare i relativi livelli di ritorno.

Nel presente approfondimento specialistico non sono stati calcolati tempi di ritorno superiori ai 100 anni in considerazione della lunghezza delle serie storiche disponibili e quindi all'attendibilità statistica delle analisi su tempi di ritorno più elevati.

#### 2.4.4 Il sovrалzo indotto dal moto ondoso frangente

Il modo ondoso, in estrema sintesi, viene generato dallo scambio di energia tra il vento e la superficie marina. Lo scambio di energia e quindi le caratteristiche delle onde, dipendono fondamentalmente dalla velocità del vento, dal tempo in cui il vento spira sulla superficie e dalla distanza sui cui spira (fetch). Tale energia viene dissipata in prossimità della costa. Nel propagarsi da largo verso riva, infatti, l'aumento della ripidità delle onde induce un processo noto come frangimento. Tale fenomeno è il principale responsabile di un aumento del livello del mare che quindi va a sommarsi alla componente astronomica e a quella meteorologica descritte nei paragrafi precedenti. Anche le onde, come visto precedentemente per i livelli, vengono caratterizzate da un punto di vista statistico. Nel caso delle onde tale caratterizzazione avviene su due scale temporali distinte, ossia quella a breve termine e quella a lungo termine. Nel primo caso si parla generalmente di definizione del clima di moto ondoso a largo, la classificazione degli eventi di moto ondoso in funzione dell'altezza e della direzione delle onde, nonché in funzione dell'altezza e del periodo delle stesse.

La classificazione degli eventi di moto ondoso in base all'altezza significativa  $H_s$  alla direzione dell'onda  $\theta$  consiste nel suddividere gli eventi di moto ondoso in base al valore dell'altezza d'onda significativa e alla direzione di provenienza al fine di individuare la frequenza di accadimento di ogni singola classe di eventi. Nel presente studio l'analisi è stata effettuata su tutti gli elementi della serie al fine di valutare il clima annuale medio individuando classi di altezza d'onda pari a 0.5 m (0.5 ÷ 1 m, 1, ÷ 2 m, 2 ÷ 3 m, 3 ÷ 4 m, 4 ÷ 5 m, 5 ÷ 6 m e maggiori di 6 m)

Per quanto riguarda invece la suddivisione degli eventi in base alla direzione di provenienza del moto ondoso si è scelto di considerare settori pari a  $10^\circ$ .

Inoltre, è stata determinata la correlazione tra il periodo di picco delle onde  $T_p$  e l'altezza d'onda significativa  $H_s$  al fine di avere un quadro completo rispetto alle caratteristiche del moto ondoso. In particolare, è stata individuata la legge di dipendenza tra le due variabili secondo una legge del tipo (Mathiesen et al., 1994):

$$T_p = aH_s^b \quad (4)$$

Sulla base del settore o dei settori da cui provengono più frequentemente le onde viene effettuata, successivamente, un'analisi degli eventi estremi (statistica a lungo termine). Anche in questo caso l'estrazione degli eventi estremi è stata effettuata mediante un metodo POT. In particolare, nel caso del moto ondoso vengono estratti i picchi al colmo della mareggiata, ossia i picchi che identificano una persistenza al di sopra della soglia pari al almeno 12 ore. Per assicurare l'indipendenza degli elementi del campione i picchi devono essere distanti non meno di 48 ore. In coerenza con quanto espresso precedentemente per l'analisi della componente astronomica, anche in questo caso il campione di eventi estremi estratto, è stato analizzato mediante un processo di inferenza statistica applicando una Distribuzione Generalizzata di Pareto.

Valutati i parametri relativi al moto ondoso a largo e caratterizzati da un punto di vista statistico (valutati i livelli di ritorno associati a tempi di ritorno assegnati) è possibile valutare il sovrалzo indotto dal moto ondoso a costa utilizzando formulazioni di letteratura.

Nel presente studio è stata utilizzata la formulazione proposta da Stockdon et al. (2006):

$$\eta_{onde} = 1.1 \left[ 0.35\beta_f \sqrt{(H_0 L_0)} \right] \quad (5)$$

dove  $H_0$  ed  $L_0$  sono rispettivamente l'altezza d'onda e la lunghezza d'onda a largo ( $L_0 = 1.56T_p^2$ ) mentre  $\beta_f$  è la pendenza trasversale della spiaggia nella zona dei frangenti (in questo caso valutata per semplicità rispetto alla profondità di riferimento a 10m).

## 2.5 Il modello numerico per la modellazione idraulica

Per la riproduzione delle caratteristiche idrodinamiche del deflusso del canale, è stato selezionato il modello numerico BASEplain, appartenente all'insieme di modelli denominato BASEMENT (*Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation*) sviluppato dal Laboratorio di Idraulica, Idrologia e Glaciologia (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie – VAW) del Politecnico Federale Svizzero (Eidgenössische Technische Hochschule – ETH) di Zurigo.

In estrema sintesi, BASEMENT è un insieme di modelli (BASEchain, BASEplain, BASEsub) votato alla riproduzione numerica del deflusso delle acque in regime stazionario (portata costante) o transitorio (idrogrammi di piena) e alla conseguente modifica morfodinamica dovuta al trasporto solido di fondo e in sospensione, sia con approccio monodimensionale, sia con approccio bidimensionale.

In ambito idrodinamico, il modulo numerico bidimensionale (BASEplain) risolve le equazioni non lineari delle acque basse. Pertanto, sono trascurate la deviazione delle distribuzioni della pressione da quella idrostatica e le componenti verticali delle velocità. Gli effetti della turbolenza possono essere riprodotti soltanto tramite la definizione di una viscosità cosid-

detta "di vortice" che ha l'obiettivo di introdurre un'ulteriore resistenza al moto indotta dalle fluttuazioni (turbolente).

Le equazioni risolte dal modello sono valide nel caso in cui le accelerazioni verticali siano ragionevolmente trascurabili (da cui dipende che la pressione è distribuita idrostaticamente e che il profilo verticale delle velocità orizzontale è ragionevolmente costante) e che la pendenza sia ragionevolmente piccola. A questo si aggiunge l'ipotesi che leggi di resistenza al moto valide per moto stazionario siano valide anche per moto transitorio.

Più nel dettaglio, il sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che governano il fenomeno sono le seguenti:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (Uh)}{\partial x} + \frac{\partial (Vh)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -g \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left\{ -\tau_{bx} + \frac{\partial [h (\tau_{xx} + D_{xx})]}{\partial x} + \frac{\partial [h (\tau_{xy} + D_{xy})]}{\partial y} \right\} \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = -g \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left\{ -\tau_{by} + \frac{\partial [h (\tau_{yx} + D_{yx})]}{\partial x} + \frac{\partial [h (\tau_{yy} + D_{yy})]}{\partial y} \right\} \quad (8)$$

L'equazione (6) costituisce l'equazione di conservazione della massa. Le equazioni (7)–(8) esprimono la conservazione della quantità di moto nel piano orizzontale. L'equazione della conservazione di quantità di moto lungo la direzione verticale è costituita dall'ipotesi di pressione dinamica distribuita idrostaticamente utilizzata per scrivere le (7)–(8).

Nel sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali (6)–(8) i simboli rappresentano le seguenti grandezze:

- $x, y$ : le coordinate spaziali ( $m$ );
- $t$ : il tempo ( $s$ );
- $U, V$ : le componenti del vettore locale di velocità mediata sulla profondità ( $m/s$ );
- $g$ : l'accelerazione di gravità ( $m/s^2$ );
- $h$ : la profondità idrica ( $m$ );
- $z_b$ : l'elevazione del fondo ( $m$ );
- $\rho$ : la densità dell'acqua ( $kg/m^3$ );
- $\tau_{bx}, \tau_{by}$ : le componenti del vettore locale di tensione tangenziale al fondo ( $N/m^2$ );

- $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy} (= \tau_{yx})$ : le componenti del tensore degli sforzi viscosi e turbolenti mediati sulla profondità ( $N/m^2$ );
- $D_{xx}, D_{yy}, D_{xy} (= D_{yx})$ : le componenti del tensore di trasferimento laterale di quantità di moto ( $N/m^2$ ).

La soluzione è costituita dalla distribuzione spazio-temporale del vettore locale di velocità mediata sulla profondità ( $U, V$ ) e della relativa profondità idrica ( $h$ ).

Al fine di poter risolvere (numericamente) il sistema (6)–(8), sono necessarie alcune ipotesi di chiusura volte alla quantificazione della tensione tangenziale al fondo, del tensore degli sforzi e di trasferimento di quantità di moto. La tensione tangenziale al fondo può essere espressa introducendo il coefficiente di resistenza  $c_f$ :

$$\vec{\tau}_b = \rho \frac{|\vec{v}|}{c_f^2} \vec{v} \quad (9)$$

nella quale  $\vec{v}$  è il vettore locale di velocità mediata sulla profondità di componenti  $\{U, V\}$ , e  $\vec{\tau}_b$  è il vettore di tensione tangenziale al fondo di componenti  $\{\tau_{bx}, \tau_{by}\}$ . Il coefficiente di resistenza  $c_f$  può essere espresso con una delle tante formulazioni di letteratura. A titolo di esempio, esso può essere espresso in funzione del coefficiente di Gauckler-Strickler (o, analogamente, di Manning).

Gli sforzi viscosi e turbolenti vengono espressi tramite i coefficienti di viscosità molecolare ( $\nu_m$ ) e di vortice ( $\nu_t$ ) che permettono di esplicitare le componenti del tensore degli sforzi:

$$\tau_{xx} = 2\rho\nu \frac{\partial U}{\partial x} \quad \tau_{yy} = 2\rho\nu \frac{\partial V}{\partial y} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \rho\nu \left( \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (10)$$

nella quale  $\nu = \nu_m + \nu_t$ .

Le condizioni al contorno (laterale) necessarie alla risoluzione del sistema di equazioni differenziali che governano il problema sono sostanzialmente finalizzate a riprodurre l'impermeabilità dei contorni oppure l'ingresso/uscita della portata nel/dal dominio di calcolo. La descrizione rigorosa delle condizioni al contorno va oltre la finalità di questo documento, rimandando a *Vetsch et al. (2018)* per i dettagli teorici.

Il sistema di equazioni che governano il problema è risolto utilizzando una griglia non strutturata. Essa, in linea generale, è costituita da elementi piani non sovrapposti, di forma triangolare, che permette di rappresentare l'intero dominio di interesse anche nel caso geometrie complesse. Ogni elemento è definito dalle coordinate dei nodi (tre nel caso di elementi triangolari) in corrispondenza dei quali è nota l'elevazione del terreno. In corrispondenza di un punto interno al singolo elemento (tipicamente il centro) è calcolata la soluzione; in corrispondenza dello spigolo in comune tra due elementi adiacenti sono definiti i flussi.

Da un punto di vista numerico, le equazioni (di conservazione della massa e della quantità di moto) sono risolte tramite il metodo dei volumi finiti: le equazioni sono integrate su ogni

elemento che costituisce la griglia, la soluzione è assunta di forma nota (per ogni elemento) e i valori nodali sono determinati imponendo che essi soddisfino l'equazione che governa il problema minimizzando l'errore (pesato) dovuto all'assunzione della forma della soluzione. Nel caso del metodo dei volumi finiti, l'errore viene pesato con una funzione unitaria (differentemente dal metodo degli "elementi finiti"). L'integrazione temporale è ottenuta con il metodo esplicito di Eulero, che permette di calcolare il valore futuro della soluzione sulla base della sola soluzione al tempo presente.

## 2.6 Valutazione dei fenomeni di diffusione e dispersione

Uno degli obiettivi del presente lavoro è relativo alla stima dei fenomeni di dispersione e diffusione di acqua in uscita dall'impianto oggetto di progettazione. Nello specifico il nuovo impianto sverserà acque preventivamente trattate all'interno di un fosso collegato a valle con il mare e a monte con una zona paludosa.

Nel presente lavoro per la modellazione del rilascio di acqua (con associato grado di salinità) nel fosso Vignarca è stato utilizzato un modello lagrangiano del tipo random walk. Questa classe di modelli permette di osservare l'evoluzione nel tempo di particelle immesse nel sistema (che in questo caso rappresentano lo scarico contenente acqua salata), ricostruendo in modo stocastico la traiettoria di ciascuna delle particelle immesse. Nello specifico, sulla base del campo idrodinamico ottenuto negli scenari modellati mediante in modello idrodinamico (descritto nel paragrafo precedente), il modello è in grado di simulare l'evoluzione di un tracciante passivo restituendone l'evoluzione nel tempo. La sorgente modellata è una di tipo puntuale, ossia localizzata nello spazio e assimilabile a uno scarico a fiume (es. canale di restituzione, tubazione etc.).

## 2.7 Valutazione degli effetti relativi all'emungimento da pozzi

L'emungimento da pozzi è una pratica che consiste nell'estrazione dell'acqua in falde sotterranee con scopi legati all'approvvigionamento idrico per uso domestico, agricolo o industriale. Questa pratica è stata storicamente essenziale per soddisfare le esigenze umane di acqua potabile e per l'irrigazione delle colture. La disponibilità di acqua nel sottosuolo è legata alla presenza delle falde acquifere. Tali formazioni vengono distinte in due grandi categorie, falde artesiane e freatiche in funzione di aspetti geomorfologici, ma soprattutto in relazione al comportamento idraulico (e.g. Citrini & Nosedà, 2009).<sup>2</sup> Le **falde freatiche** sono contenute in uno strato di terreno permeabile, si appoggiano su una superficie impermeabile (chiamato letto della falda) e sono delimitate superiormente da una superficie libera detta anche superficie freatica a pressione atmosferica. Per tale motivo la superficie superiore della falda freatica viene anche chiamata superficie piezometrica in quanto in un piezometro po-

<sup>2</sup>Citrini, D., & Nosedà, G. (2009). Idraulica. Casa Ed. Ambrosiana.

sto all'interno di essa l'acqua risalirebbe sino al livello della superficie stessa. Se la falda si trova in condizioni di quiete la superficie piezometrica è un piano orizzontale, mentre se è in movimento presenta una pendenza (e.g. Citrini & Nosedà, 2009). Le falde artesiane, invece, sono confinate tra due formazioni impermeabili, il letto della falda (quella inferiore) e il tetto della falda (quella superiore) e l'acqua all'interno è in pressione pertanto in un piezometro posto all'interno della falda il livello della superficie libera si porta ad una quota maggiore di quella del tetto (e.g. Citrini & Nosedà, 2009).

Emungendo una certa quantità di portata da una falda, sia essa confinata (artesiane) che non confinata (freatica), si va quindi a perturbare un sistema in equilibrio.

In particolare, da un punto di vista idraulico quello che si osserva è un abbassamento della quota piezometrica indisturbata della falda (ipotesi valida in caso di mezzo omogeneo e isotropo). Essendo i pozzi di forma circolare, tale abbassamento interessa un'area circolare attorno al pozzo formando un cono di depressione. L'abbassamento è massimo in corrispondenza dell'asse del pozzo si riduce all'aumentare della distanza da esso. La dimensione, ovvero il raggio di tale area in cui si risente dell'emungimento viene definito come raggio di influenza del pozzo.

Pertanto, da un punto di vista pratico, studiare l'effetto del prelievo di una certa portata da una falda a mezzo di un pozzo equivale a quantificare l'abbassamento della quota piezometrica e quindi del raggio di influenza.

Questo è possibile utilizzando l'approccio proposto da Darcy (1856) per studiare il sistema fluido-particelle che propone di ignorare la presenza dei nuclei solidi e considerare il campo di moto come se fosse completamente e esclusivamente occupato da un *fluido continuo equivalente* (e.g. Di Nucci, 2009<sup>3</sup>).

Sotto queste ipotesi, considerando un mezzo omogeneo e isotropo, e supponendo che l'emungimento della portata non sia costante durante il giorno (ad esempio si preleva per alcune ore al giorno in una o due fasi) il problema può essere studiato analiticamente risolvendo l'equazione differenziale:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (11)$$

dove  $h$  è il carico idraulico,  $r$  la variabile spaziale (che coincide con la distanza dall'asse del pozzo)  $T$  il coefficiente di trasmissività ed  $S$  il coefficiente di immagazzinamento della falda.

Nel presente studio, per motivazioni che verranno esposte nei paragrafi successivi, sono state considerate solo falde artesiane con spessore della falda (distanza tra il letto ed il tetto) considerato costante.

<sup>3</sup>Di Nucci, C. (2019). Quaderni d'idraulica. Libreria universitaria Benedetti



Considerando  $T$  ed  $S$  costanti, assumendo che il pozzo inizi ad emungere una portata  $Q$  al tempo  $t = t_0$  è possibile trovare una soluzione per l'equazione 11 (e.g. Bakker & Post, 2022<sup>4</sup>).

Per essere risolta l'equazione (11) deve essere corredata di opportune condizioni al contorno. La prima condizione al contorno può essere imposta sul pozzo

$$\lim_{r \rightarrow 0} -2\pi r Q_r = Q \quad t \geq t_0 \quad (12)$$

e descrive il fatto che la portata in corrispondenza del pozzo sia pari a  $Q$  (con  $Q_r$  portata radiale).

La seconda condizione da imporre, è una condizione iniziale, e descrive il fatto che la variazione di carico piezometrico nella falda a causa del regime transitorio sia uguale a zero all'istante  $t = t_0$

$$h|_{r,t=t_0} = 0 \quad (13)$$

mentre sia zero per distanze molto grandi dal pozzo

$$h|_{r=\infty,t} = 0 \quad (14)$$

Sotto queste condizioni la soluzione che rappresenta la variazione del carico piezometrico in funzione della distanza radiale  $r$  dal pozzo è nota come soluzione di Theis (1935):

$$h = -\frac{Q}{4\pi T} E(u) \quad t \geq t_0 \quad (15)$$

dove

$$u = \frac{Sr^2}{aT(t - t_0)} \quad (16)$$

e  $E$  rappresenta l'integrale:

$$E(u) = \int_u^{\infty} \frac{\exp(-s)}{s} ds \quad (17)$$

La soluzione 15 permette quindi di valutare l'abbassamento del carico piezometrico a partire dall'inizio della prova. Tale valore è nullo all'istante iniziale ( $t_0 = 0$ ) per poi diventare diverso da zero all'aumentare del tempo.

La soluzione di Theis è, come spesso accade per le soluzioni analitiche, una soluzione semplificata ( $b$ ,  $T$ ,  $S$  e  $k$  costanti). Tuttavia in questa fase preliminare di studio l'utilizzo di

<sup>4</sup>Bakker, M., & Post, V. (2022). Analytical Groundwater Modeling: Theory and Applications Using Python. CRC Press.



soluzioni semplificate permette, con un basso onere computazionale, di studiare un sistema che, seppur con delle approssimazioni, descrive le condizioni di progetto.

In particolare nota la portata da emungere, è possibile effettuare analisi parametriche in funzione dello spessore della falda, della permeabilità (e quindi della trasmissività) e del coefficiente di immagazzinamento sul raggio di influenza e valutare quindi possibili effetti negativi sulla falda stessa e sulle aree limitrofe.

### 3 Approfondimento Idrologico-Idraulico

#### 3.1 Inquadramento territoriale

L'area oggetto di studio (linea tratteggiata rossa in Figura 3-1 ), è localizzata all'interno del Comune di Piombino (LI) in località Vignarca in prossimità dell'area costiera (a meno di un chilometro dalla costa).



Figura 3-1: Immagine satellitare dell'area. La linea tratteggiata in rosso indica la localizzazione dell'area di intervento.

Nella zona Sud si trova l'ex centrale Enel "Tor del Sale", mentre a ovest si estende parte della Padule Orti-Bottagone (linea tratteggiata nera in Figura 3-1 ). Il territorio è pianeggiante, posto quasi completamente a livello del mare fatta eccezione per alcune aree più depresse.

Da un punto di vista idraulico l'area di interesse si sviluppa a sinistra idraulica del Fosso Cosimo e a destra del Fosso Acquaviva. Il Fiume Cornia, invece, si trova a più di un chilometro di distanza verso ovest.

Il reticolo idrografico (figura 3-2) si completa di fossi minori, senza toponimo, ma comunque compresi nel reticolo idrografico (ai sensi della LR 79/2012). Di questi è di particolare interesse per il presente studio il fosso denominato Vignarca, all'interno del quale il progetto prevede lo scarico di acque provenienti dall'impianto preventivamente e opportunamente trattate (si rimanda ai dettagli del progetto per le caratteristiche di trattamento delle acque in quanto esula dagli scopi del presente lavoro). Il fosso, come si evince dal reticolo idrografico, ha origine in corrispondenza della Strada "Via della Base Geodetica" (SP40), scende dritto deviando a 90° dove riceve la confluenza di un altro fosso (senza toponimo), proseguendo il linea retta riceve un'altra confluenza di un altro fosso senza toponimo per poi deviare verso sud, sud-est fino alla confluenza con il Fosso Acquaviva in prossimità della foce.



Figura 3-2: Reticolo idrografico dell'area oggetto di studio

Nella prima parte del suo corso, prima di deviare a 90° il Fosso Vignarca è connesso idraulicamente (in più punti) ad una zona depressa ricadente dei confini della Padule Orti-Bottagone. La figura 3-3 mostra il dettaglio di una delle connessioni.

### 3.2 Inquadramento idrologico-idraulico

L'area oggetto di studio è compresa nel dominio costiero del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA). Come si può osservare dalla figura 3-4, l'area è quasi totalmente compresa





Figura 3-3: Dettaglio della connessione idraulica tra il Fosso Vignarca e l'Area ricadente nella Padule Orti-Bottagone.

nella fascia di pericolosità P1, fatto salvo per alcune aree in pericolosità P2 e P3.

Da un punto di vista idraulico nell'area oggetto di studio l'unico corso d'acqua su siano stati effettuati degli studi idraulici è il Fosso Acquaviva <sup>5</sup>. Lo studio, effettuato nel 2020 dalla società Hydrogeo Ingegneria srl per conto dei Comuni di Piombino e Campiglia Marittima identifica il Fosso Acquaviva tra corsi d'acqua minori caratterizzandolo con tempi di ritorno a partire dai 30 anni, quindi al di sopra della scala di evento presa in considerazione nel presente studio. Non vengono riportate informazioni circa le variazioni delle portate durante l'anno, tuttavia la presenza di imbarcazioni nel tratto di foce del fosso, e le modalità di ormeggio delle stesse, suggeriscono le variazioni di livello all'interno del fosso nell'area prospiciente a quella di foce, siano influenzati dalle variazioni del livello del mare.

Per quanto attiene al Fosso Vignarca, invece, non vi sono dati o studi che ne permettano una caratterizzazione idrologico-idraulica.

Tuttavia, in considerazione del fatto che il reticolo idrografico evidenzia l'inizio del fosso in corrispondenza della Strada "Via della Base Geodetica" (SP40), e considerando che confluisce nel Fosso Acquaviva in corrispondenza della foce, si può supporre che il regime idraulico sia sostanzialmente forzato dalla componente mareale e più in generale dai livelli che si instaurano a costa (che influenzano anche il Fosso Acquaviva).

In coerenza con quanto esposto per il Fosso Vignarca, si può supporre che, almeno nell'area oggetto di studio, il livello dei fossi minori sia sostanzialmente influenzato dalla risalita

<sup>5</sup>Studio incaricato dai Comuni di Piombino e Campiglia Marittima nell'ambito della Variante Generale al Piano Strutturale



Figura 3-4: Perimetrazione delle aree a diversa pericolosità idraulica così come riportato nel PGRA

dell'acqua proveniente dal mare in quanto canalizzazioni afferenti al reticolo di bonifica con utilizzo prettamente agricolo e caratterizzate da pendenze molto basse <sup>6</sup>.

### 3.3 Dati di riferimento

Nell'ambito della modellazione del deflusso dei fossi in corrispondenza dell'area oggetto di studio si è resa necessaria l'acquisizione di una serie di informazioni relative alle caratteristiche dell'alveo fluviale, della morfologia del terreno, dell'utilizzo del suolo (per definire le resistenze idrauliche) nonché della presenza di opere sia civili che idrauliche che possono influire sul deflusso. Inoltre, al fine di caratterizzare le forzanti meteomarine e quindi i livelli che si instaurano in corrispondenza della foce, sono stati acquisiti anche i dati ondametrisi e dei livelli di marea.

Segue una sintesi dei dati acquisiti:

#### **Dati meteomarini**

- Onde:

Dati ricostruiti, database ECMWF-ERA5: Periodo 1959 – 2022 (Posizione 42.50°N, 10.50°E);

Dati ricostruiti, database ECMWF-ERA5: Periodo 2013 - 2019 (Posizione 42.25°N, 11.00°E). Tale database è stato utilizzato per validare la serie acquisita nel punto precedente rispetto ai valori della Boa di Giannutri (vedi punto successivo);

Dati misurati dalla Boa di Giannutri (Regione Toscana): periodo 2013 – 2019 (Posizione 42.235°N, 11.045°E);

- Livelli del mare:

Livelli di marea registrati dalla Rete Mareografica Nazionale nella stazione di Marina di Campo (Posizione 42.742°N, 10.238°E). Periodo 2011 - 2023;

#### **Dati del terreno e batimetrici**

- modello Digitale del Terreno (relativo al LIDAR fornito della Regione Toscana) con risoluzione variabile tra 1mx1m e 2mx2m;
- carta delle pendenze desunta dal DTM;
- rilievo batimetrico acquisito dalla Piattaforma EMODNET;
- documentazione fotografica relativa alle condizioni di deflusso delle acque in condizioni di perturbazione meteorologica e di alta pressione;

<sup>6</sup>Studio incaricato dai Comuni di Piombino e Campiglia Marittima nell'ambito della Variante Generale al Piano Strutturale



- misure puntuali dei tiranti idrici presenti nel Fosso Vignarca.

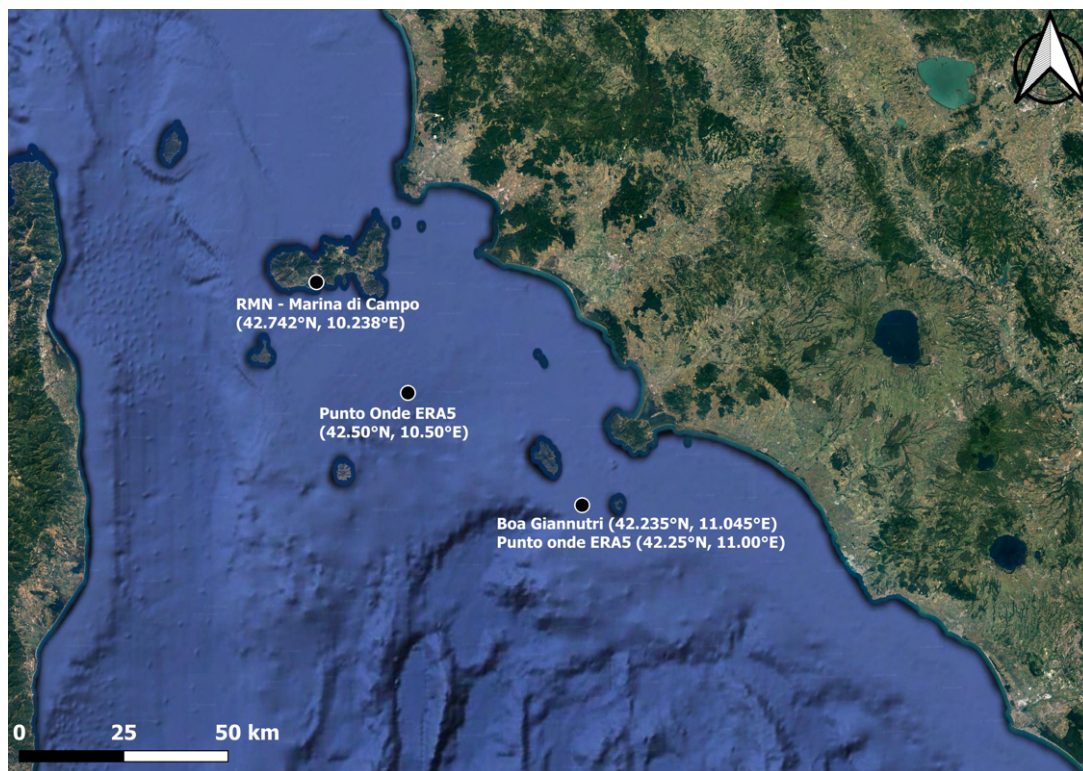


Figura 3-5: Dettaglio della posizione in cui sono stati acquisiti i dati meteomarini. Il punto (Posizione 42.25°N, 11.00°E) è da considerarsi coincidente con quello della boa ondometrica di Giannutri.

### 3.4 Condizioni al contorno

La definizione delle condizioni al contorno dell'area oggetto di studio riguardano la variazione dei livelli di marea in corrispondenza della foce del Fosso Acquaviva nella parte sud in corrispondenza della costa. Per quanto concerne il Fosso Acquaviva, in relazione a quanto riportato dal reticolo idrografico è stato considerato chiuso in corrispondenza della strada "Via della Base Geodetica" (SP40). Tale condizione, infatti risulta essere a favore di sicurezza per lo studio dell'idrodinamica dei fossi e per le caratteristiche di deflusso delle acque. Per quanto riguarda il Fosso Acquaviva è stata imposta la stessa condizione del Vignarca a seguito di un'analisi di sensitività iniziale.

Per quanto attiene alle portate defluenti, come evidenziato precedentemente non esiste una portata assegnata per il Fosso Vignarca, mentre per il Fosso Acquaviva esistono solo dati di portata con tempi di ritorno molto elevati e quindi poco rappresentativi di condizioni frequenti. Pertanto nelle analisi idrauliche, al fine di contemplare la presenza di acqua in condizioni di magra e ordinarie si è scelto di simulare i fossi sia vuoti che pieni, inserendo

una condizione di livello iniziale. I dettagli degli scenari di simulazione verranno illustrati nei paragrafi successivi.

### 3.4.1 Definizione delle forzanti meteomarine e sovrizzo atteso

#### Caratterizzazione statistica dei livelli

Al fine di caratterizzare i livelli che si instaurano a costa, come evidenziato precedentemente (vedi paragrafo 2) è necessario caratterizzare statisticamente i livelli di marea e le altezze d'onda a largo (queste ultime utilizzate per stimare il sovrizzo indotto dal moto ondoso).

Per quanto attiene alla componente mareale, le analisi dei dati acquisiti (vedi paragrafo 3.3) l'applicazione dell'analisi armonica (vedi paragrafo 2.4.1) ha permesso di caratterizzare sia la componente astronomica che quella meteorologica. Il residuo di marea (componente meteorologica) è stato ottenuto per sottrazione della componente astronomica (deterministica) al livello totale misurato.

In particolare per la componente astronomica è stato possibile identificare seguenti livelli caratteristici (Tabella 3-1):

- HAT - Highest Astronomical Tide (massima alta marea)
- MHWS - Mean High Water Spring (media delle alte maree sizigiali)
- MHWN - Mean High Water Neap (media delle alte maree di quadratura)
- MWL - Mean Water Level (l.m.m., livello medio marino)
- MLWN - Mean Low Water Neap (media delle basse maree di quadratura)
- MLWS - Mean Low Water Spring (media delle basse maree sizigiali)
- LAT - Lowest Astronomical Tide (massima bassa marea)

HAT (m)	MHWS (m)	MHWN (m)	MSL (m)	MLWN (m)	MLWS (m)	LAT (m)
0.261	0.166	0.110	0.026	-0.086	-0.161	-0.281

Tabella 3-1: Valori caratteristici della componente astronomica in corrispondenza della stazione mareografica di Marina di Campo.

Sul residuo è stata invece applicata un'analisi degli eventi estremi. Il campione è stato estratto mediante analisi POT con una soglia pari a 0.30m (non considerando i picchi a distanza minore di 5 giorni) in funzione dell'andamento della vita media residua (mean residual life plot) in funzione della variazione della soglia.



La tabella 3-2 mostra i valori dei livelli di ritorno associati ai tempi di ritorno pari a 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anni.

TR	Residuo
(anni)	(m)
2	0.43
5	0.48
10	0.51
25	0.54
50	0.56
100	0.57

Tabella 3-2: Valori dei livelli di ritorno della componente meteorologica della marea al variare del tempo di ritorno.

La figura 3-3 mostra i risultati dell'adattamento statistico, mentre la figura 3-4 i grafici diagnostici in termini di quantili osservati e stimati (pannello di sinistra) e in termini di probabilità osservata e stimata con la funzione di ripartizione della distribuzione generalizzata di Pareto (pannello di destra). In entrambi i casi si può osservare un ottimo accordo.

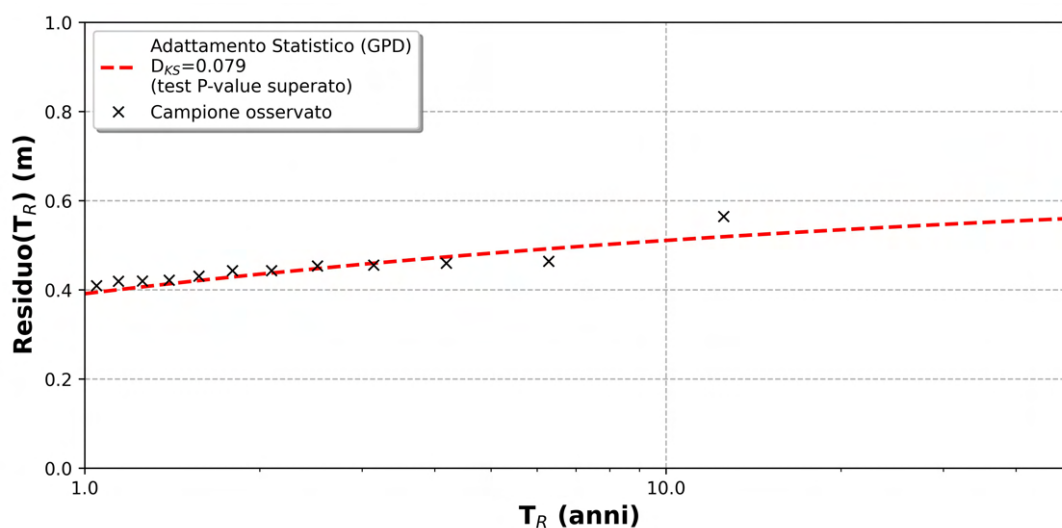


Tabella 3-3: Risultato dell'adattamento statistico sugli estremi della componente meteorologica della marea utilizzando la funzione di ripartizione della distribuzione generalizzata di Pareto

### Caratterizzazione statistica del moto ondoso

Per definire le caratteristiche del moto ondoso al largo di Piombino, sono stati consultati i dati storici sull'onda provenienti dalla serie temporale di ERA5, ottenuti attraverso il Centro meteorologico europeo (ECMWF). In particolare, ERA5 fornisce dati meteomarini (moto ondoso, vento e pressione atmosferica) ricostruiti mediante rianalisi nel periodo compreso

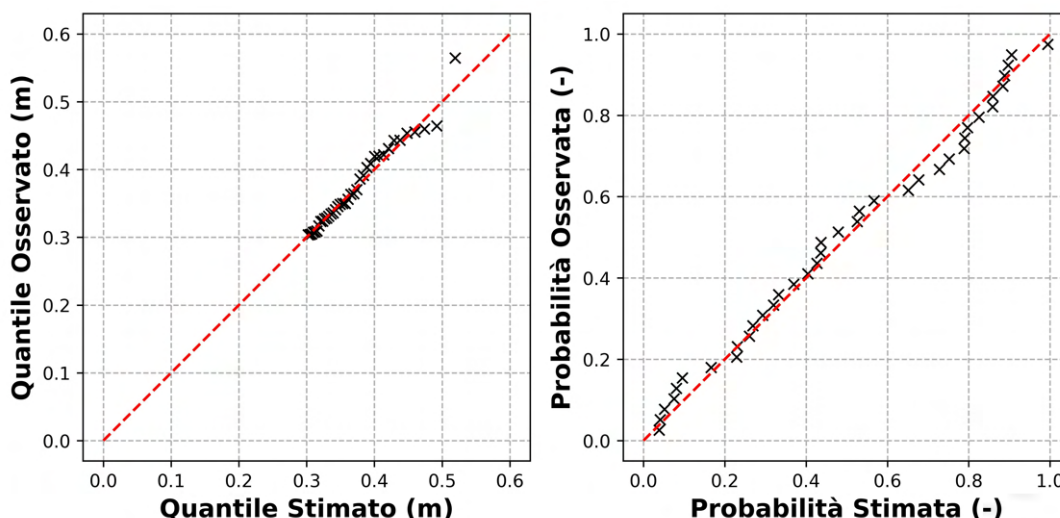


Tabella 3-4: Grafici Diagnostici relativi ai quantili osservati e stimati (pannello di sinistra) e in termini di probabilità osservata e stimata (pannello di destra). La linea tratteggiata rappresenta la retta di perfetto accordo

tra il 1959 e il 2021, con una risoluzione spaziale di  $0.25^\circ\text{N}$  in latitudine e longitudine e una frequenza temporale oraria.

La raccolta di questi dati è avvenuta nel punto di griglia specificato nella Figura 3-5, denominato ERA5 Piombino. Tale punto è stato selezionato con l'obiettivo di utilizzarlo come condizione al largo per il porto di Piombino.

In particolare è stato stimato il clima annuale medio del moto ondoso. La figura 3-5 mostra la rappresentazione polare relativa alla frequenza di apparizione (lunghezza delle barre) degli stati di mare in funzione dell'altezza d'onda significativa (scala cromatica colori) e della direzione di provenienza. Le calme sono costituite dagli stati di mare con altezza d'onda significativa strettamente inferiore a 0.50 m.

Si può osservare che a fronte di una percentuale delle calme (onde inferiori a 0.5m) si ottiene un settore di traversia tra i  $135^\circ\text{N}$  e i  $225^\circ\text{N}$  ovvero un settore da cui le onde, considerando il clima annuale medio, provengono con maggiore frequenza.

Per quanto riguarda i periodi, sono stati stimati correlandoli alle altezze d'onda significative utilizzando la formulazione riportata nel paragrafo 2.4.4 ottenendo una legge del tipo  $T_p = 5.13H_s^{0.28}$ .

Sulla base delle informazioni desunte dal clima annuale medio, il campione di eventi estremi è stato estratto nel settore sopra indicato ed è estraendo gli estremi mediante analisi POT. Come per i livelli la soglia è stata scelta pari a 3.2 m utilizzando il grafico relativo al mean residual life plot e considerando, in questo caso, solo i picchi al colmo della mareggiata (livello al di sopra della soglia per almeno 48 ore).

Come noto in letteratura, i dati ricostruiti in re-analisi possono avere degli scostamenti rispetto ai dati di campo. Da un'analisi qualitativa è emerso che il modello ERA5 non riesce

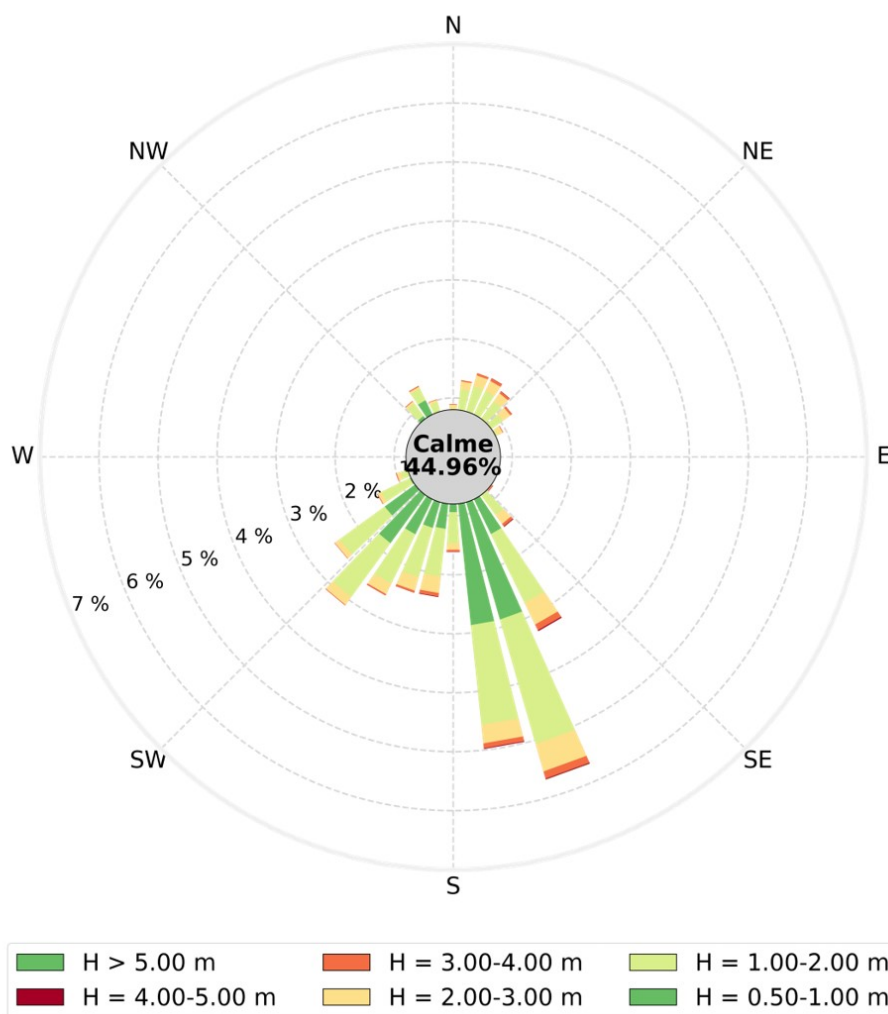


Tabella 3-5: Rappresentazione polare del clima annuale medio del moto ondoso. Risultati dell'analisi ondometrica a largo. Analisi media annuale. Rappresentazione polare della frequenza di apparizione (lunghezza delle barre) degli stati di mare in funzione dell'altezza d'onda significativa (colori) e della direzione di provenienza. Le calme sono costituite dagli stati di mare con altezza d'onda significativa strettamente inferiore a 0.50 m.

sempre a cogliere i valori massimi delle mareggiate; di contro risulta molto affidabile per l'analisi del clima medio.

Al fine di calibrare i soli estremi (estratti con la POT) è stato valutato un coefficiente di calibrazione confrontando (in modo sincrono) i dati acquisiti dalla boa di Giannutri con quelli ERA5 (in reanalisi) estratti in un punto coincidente con le coordinate di del punto in cui si dispone delle misure di campo (figura 3-5). La Figura 3-6 mostra il confronto sincrono tra la serie storica osservata e ricostruita (database ERA5) opportunamente calibrata.

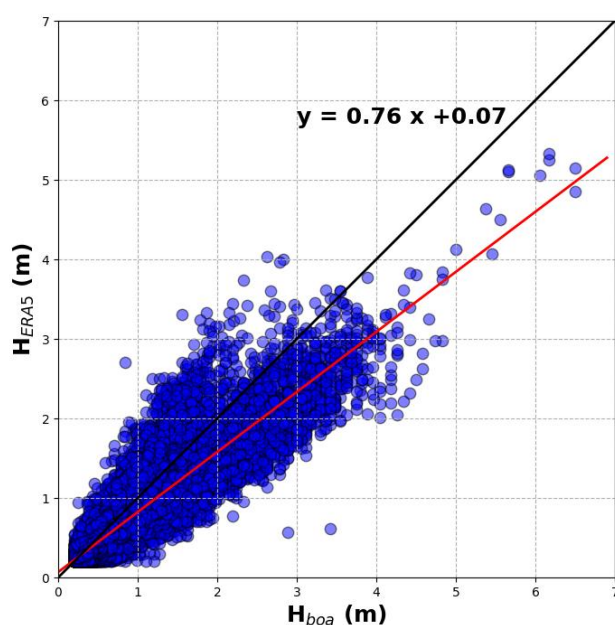


Tabella 3-6: Confronto tra i valori Era5 e quelli acquisiti dalla boa di Giannutri. La linea nera indica la retta di miglior accordo mentre quella rossa la correlazione tra altezza d'onda significativa misurata e ricostruita

In continuità con quanto effettuato per i livelli, anche in questo caso l'adattamento statistico è stato effettuato utilizzando una Distribuzione Generalizzata di Pareto (GPD).

La tabella 3-7 mostra i valori dei livelli di ritorno relativi al modo ondoso associati ai tempi di ritorno pari a 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anni.

La figura 3-8 mostra i risultati dell'adattamento statistico, mentre la figura 3-9 i grafici diagnostici in termini di quantili osservati e stimati (pannello di sinistra) e in termini di probabilità osservata e stimata con la funzione di ripartizione della distribuzione generalizzata di Pareto (pannello di destra). In entrambi i casi si può osservare un ottimo accordo.

#### **Stima del sovrizzo dovuto al moto ondoso frangente**

Nella parte introduttiva (vedi paragrafo 2.4.4) è stato evidenziato come il modo ondoso frangente possa generare un sovrizzo a costa. Sulla base della relazione di Stockdon et al.

	Metodo dei massimi sopra soglia (3.2 m): GPD
TR	Hs
(anni)	(m)
2	4.60
5	5.20
10	5.60
25	6.14
50	6.52
100	6.90

Tabella 3-7: Valori dei livelli di ritorno delle onde estreme al variare del tempo di ritorno.

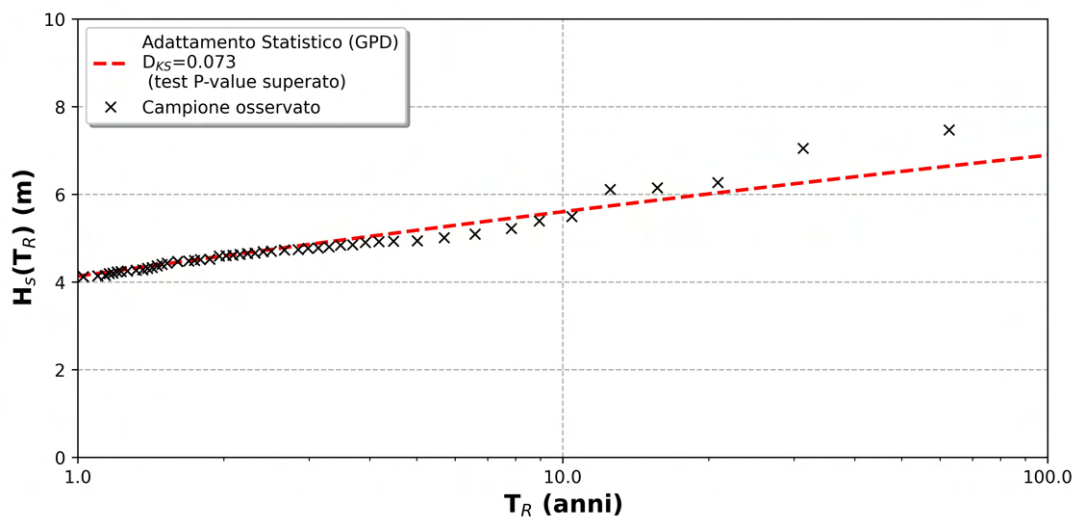


Tabella 3-8: Risultato dell'adattamento statistico sul campione di estremi di moto ondoso utilizzando la funzione di ripartizione della distribuzione generalizzata di Pareto

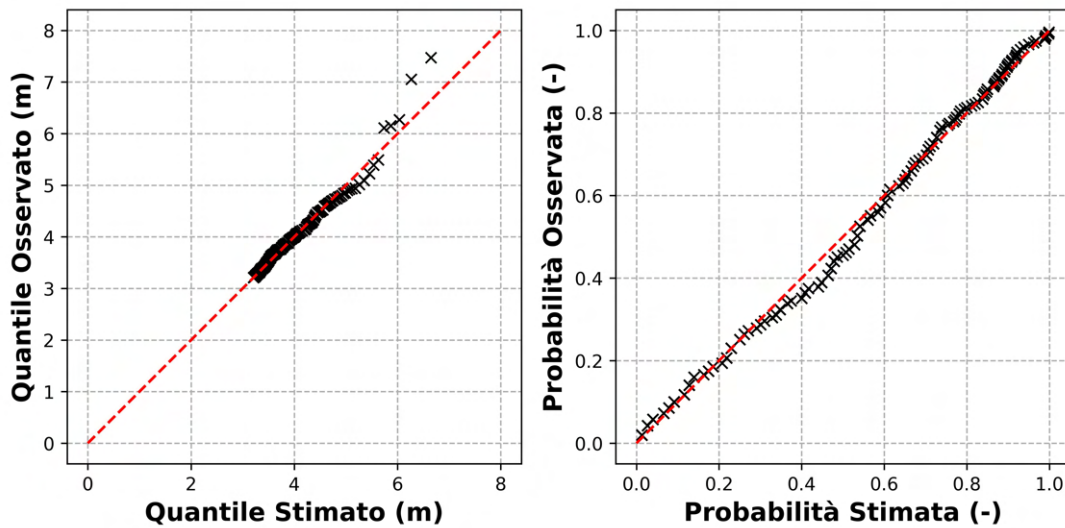


Tabella 3-9: Grafici Diagnostici relativi ai quantili osservati e stimati (pannello di sinistra) e in termini di probabilità osservata e stimata (pannello di destra). La linea tratteggiata rappresenta la retta di perfetto accordo

(2006), che si riporta per comodità nel seguito

$$\eta_{onde} = 1.1 \left[ 0.35 \beta_f \sqrt{(H_0 L_0)} \right] \quad (18)$$

è possibile stimare il sovrizzo indotto dal moto ondoso noti i parametri a largo relativi all'altezza d'onda e al periodo nonché la pendenza trasversale della spiaggia nella zona dei frangenti. Per quanto attiene alla scelta della coppia di valori  $(H_0, L_0)$  sono stati scelti sulla base delle caratterizzazioni statistiche effettuate sul moto ondoso.

In particolare, al fine di considerare eventi intensi, ma non rari, l'altezza d'onda al largo e l'associato periodo di picco (valutato con la relazione  $T_p = 5.13 H_s^{0.28}$ ) sono stati scelti con un tempo di ritorno pari a 5 anni.

La lunghezza d'onda a largo, è stata calcolata con la formula  $L_0 = 1.56 T_p^2$  valida all'interno della teoria lineare del moto ondoso e accettabile lontano dalla zona dei frangenti.

La pendenza della sezione trasversale della spiaggia, invece è stata stimata sulla base della conoscenza della distanza della costa dalla batimetria alla meno dieci metri (linea dei punti con profondità pari a 10 m) considerando come profilo trasversale della spiaggia quello di equilibrio suggerito da Dean (1991)

$$h(x) = A y^{2/3} \quad (19)$$

in cui  $h(x)$  rappresenta la profondità,  $y$  la distanza dalla costa ed  $A$  è un parametro che viene stimato in funzione delle caratteristiche della spiaggia.



La posizione batimetrica alla meno dieci metri è stata valutata mediante un sistema informativo geografico sulla base della batimetria estratta dal portale EMODNET (Figura 3-10)

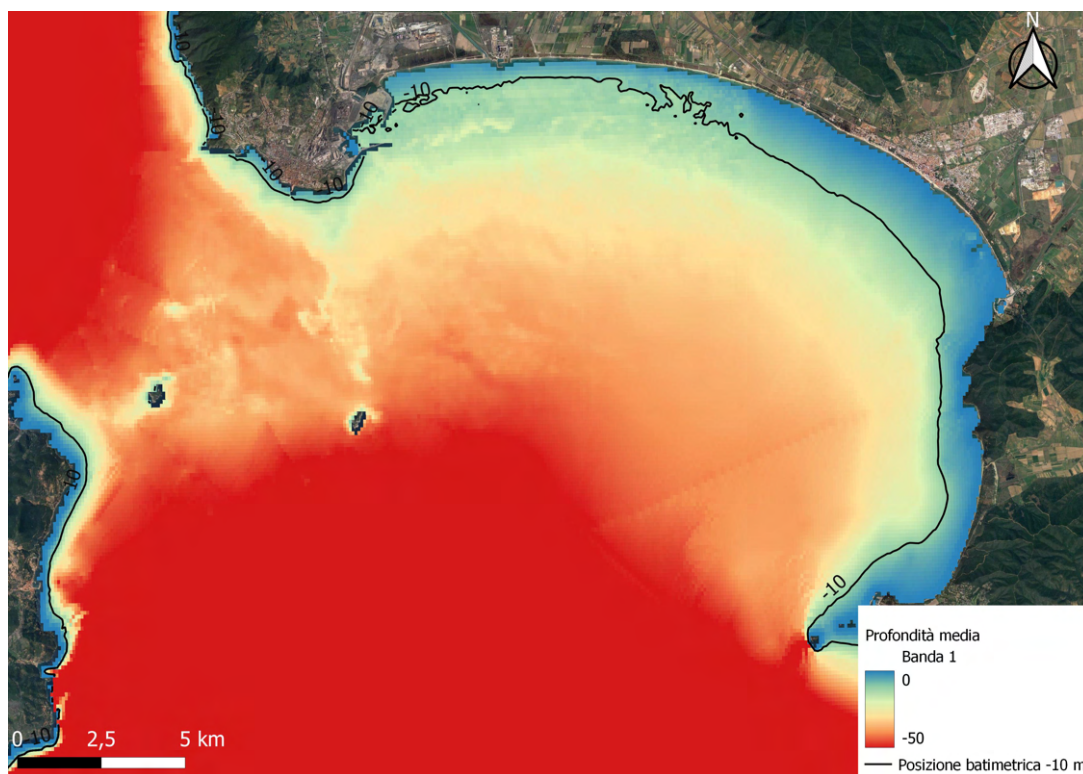


Tabella 3-10: Profilo batimetrico dell'area di interesse e posizione della linea batimetrica alla meno dieci metri (linea nera)

Per la configurazione in esame, considerando che nell'area della foce del Fosso Acquaviva la distanza dalla costa è di circa 600 metri la pendenza è stata valutata pari a 0.080, considerando un'altezza d'onda pari a 5.2 m (altezza con tempo di ritorno pari a 5 anni) il valore del sovrizzo del moto ondoso è stimabile in 0.20 m.

### 3.4.2 Stima della condizione al contorno alla foce

Per stimare la condizione al contorno con cui forzare il modello idraulico sono stati sommati la componente delle alte mare in quadrature (MHWN) e i sovrizzi dovuti al moto ondoso e del residuo di marea presi con tempo di ritorno pari a 5 anni. Non è stata utilizzata la massima alta marea astronomica (HAT) considerando che in generale è rara la contemporaneità tra sovrizzi astronomici e meteorologici. Tale assunzione è coerente con lo studio meteomarinò del nuovo piano regolatore portuale (studio redatto nel 2008). Inoltre in tale studio si stima un livello di marea comprendente la componente meteorologica e astronomica pari a 0.58 m, del tutto comparabile con il valore pari a 0.59 m stimato nel presente studio.

Il valore stimato per la condizione al contorno così valutata è di 0.77 m è stato approssimato per eccesso al valore di 0.80 m. La tabella 3-11 riassume i valori utilizzati per il calcolo della condizione al contorno sulla foce.

$\eta_{MHWN}$	$\eta_{residuo}$	$\eta_{set-up}$	$\eta_{TOT}$
(m)	(m)	(m)	(m)
0.11	0.48	0.18	0.77

Tabella 3-11: Schema riassuntivo dei valori utilizzati per il calcolo della condizione al contorno sulla foce.

Inoltre, al fine di simulare l'evento meteorologico che può indurre una tale condizione al contorno, la condizione non è stata imposta come fissa nel tempo, ma è stato simulato un evento di 48 ore in cui il livello cresce a partire da un livello pari a zero per circa 8 ore, rimane costante al valore 0.8 m per 32 ore per poi tornare ad un valore nullo.

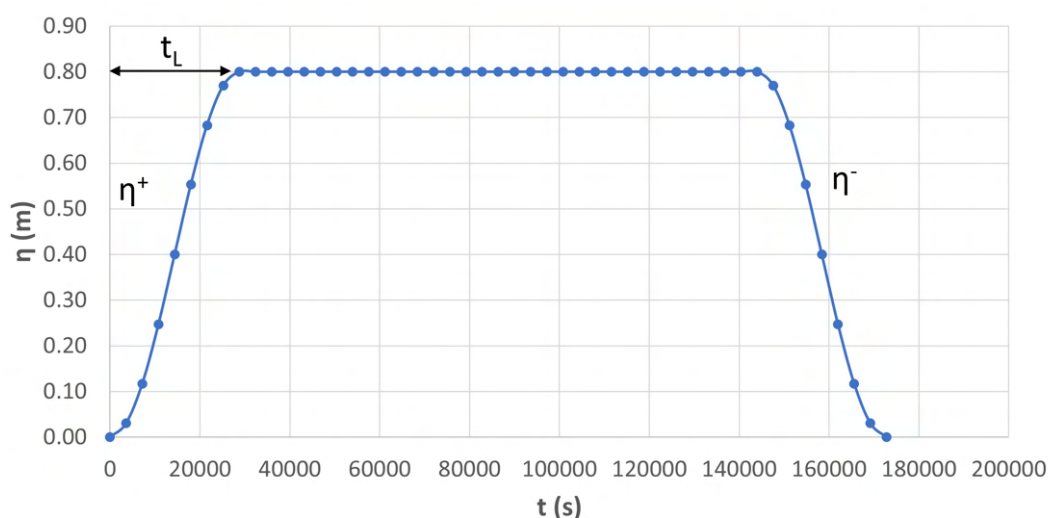


Tabella 3-12: Schematizzazione della condizione al contorno di valle nella configurazione con  $z_{max}=0.8$  m

Fissato in  $z_{max}$  in livello massimo raggiunto dal mare le leggi di crescita sono state rappresentate dalle seguenti relazioni

$$\eta^+ = \frac{z_{max}}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right] \quad (20)$$

$$\eta^- = \frac{z_{max}}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right] \quad (21)$$

con  $T = 2t_L$  e  $t_L$  pari a 8 ore.

Per tenere in conto anche condizioni meno intense è stata considerata anche una condizione al contorno con  $z_{max}$  pari a 0.25 m. In questo caso la condizione ha durata di 24 ore con la fase costante con livello pari a  $z_{max}$  che dura 12 ore ( $t_L$  pari a 6 ore).



### 3.4.3 Modellazione dello scarico all'interno del Fosso Vignarca

Il progetto "riqualificazione e ampliamento dell'attività esistente di itticoltura" prevede che parte delle acque provenienti dall'impianto, opportunamente trattate, vengano scaricate all'interno del Fosso Vignarca. Dal materiale relativo al progetto emerge che la portata scaricata sarà di circa 6'000'000 m<sup>3</sup> all'anno che equivale ad uno scarico continuo con una portata pari a 0.2 m<sup>3</sup>/s all'interno del fosso. Tale scarico avverrà subito dopo circa 100 m dalla curva a 90° del fosso (Figura 3-6).



Figura 3-6: Dettaglio della posizione dello scarico delle acque nel Fosso Vignarca (cerchio rosso)

Lo scarico è stato modellato come una sorgente interna che scarica la portata pari a 0.2 m<sup>3</sup>/s in modo costante.

### 3.5 Implementazione delle griglie di calcolo

La griglia computazionale è stata implementata mediante l'utilizzo del Sistema di Informazione Geografica Open Source QGIS.

Individuate le aree a differente uso del suolo ad ognuna viene assegnato un diverso valore del coefficiente di scabrezza idraulica, rappresentato dal coefficiente di Manning. A tali aree, inoltre, è associata una specifica risoluzione spaziale (tabella 3-13).

La griglia è, come precedentemente accennato, di tipo non strutturato a maglie triangolari e si basa sulla fotointerpretazione di immagini satellitari (per l'identificazione dell'uso del

Tipologia	Area massima ( $km^2$ )	Scabrezza ( $m^{-1/3s}$ )
Canale	2	0.02
Fosso	2	0.02
Scarico	2	0.02
Sponde	2	0.02
Aree pavimentate	20	0.06
Aree vegetate	40	0.06
Litorale	40	0.035
Mare	10000	0.035
Aree edificate	200	0.5

Tabella 3-13: Valori del coefficiente di scabrezza e della dimensione massima degli elementi per le differenti aree.

suolo e, quindi, per l'assegnazione della scabrezza idraulica) e sull'analisi della carta delle pendenze desunta dal DTM della Regione Toscana.

La figura 3-7 mostra un dettaglio della griglia computazionale in corrispondenza dell'area oggetto di studio.

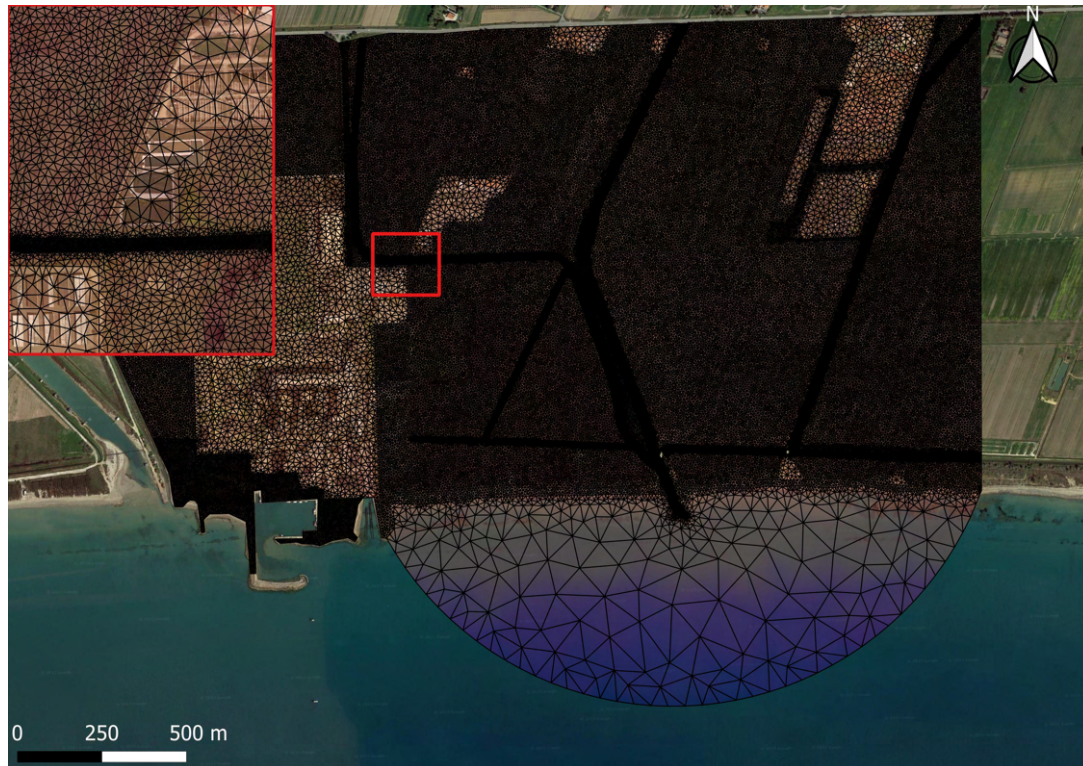


Figura 3-7: Griglia di calcolo. In alto a sinistra si riporta dettaglio della zona subito a valle della curva del Fosso Vignarca.

### 3.6 Scenari di simulazione

In relazione a quanto precedentemente esposto, il Fosso Vignarca è idraulicamente connesso alla foce del Fosso Acquaviva, pertanto si ritiene che le condizioni di tirante idrico all'interno dello stesso dipendano dalle oscillazioni di livello alla foce.

In mancanza di misure circa le portate e/o i tiranti idrici all'interno del Fosso Vignarca sono stati effettuati diversi scenari che si differenziano per le condizioni iniziali dei due fossi e per la presenza o meno della portata che si intende scaricare nel Fosso Vignarca.

La tabella 3-8 riassume gli scenari simulati.

	Q	Z <sub>max</sub>	Durata evento	Profondità iniziale di acqua nel Fosso Vignarca	Livello iniziale Fosso Acquaviva
	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(ore)	(m)	(m)
S11	0	0.8	48	0	0.5
S12	0.2	0.8	48	0	0.5
S13	0.2	0.8	48	0.3	0.5
S14	0.2	0.8	48	0.8	0.5
S21	0.2	0.25	24	0.10	0.5
S22	0.2	0.25	24	0.30	0.5

Figura 3-8: Tabella riassuntiva degli scenari simulati.

In particolare, il Fosso Acquaviva è stato considerato sempre con una condizione iniziale di elevazione della superficie libera pari a 0.50 m s.l.m., mentre il fosso Vignarca è stato considerato dapprima in condizioni di magra e poi con diversi valori iniziali di profondità idriche. Le simulazioni con Fosso Vignarca in magra con e senza portata proveniente dall'impianto (S11 ed S12) sono funzionali a stimare la capacità di risalita dell'acqua e l'incidenza della portata scaricata sul deflusso. Nei successivi scenari, S13 ed S14, viene considerato il fosso con due diverse condizioni iniziali di riempimento al fine di valutare la sensibilità della soluzione alla condizione iniziale. Gli ultimi due scenari sono invece relativi a valutare il deflusso del Fosso Vignarca nelle due configurazioni di riempimento iniziale forzando il sistema con una condizione al contorno relativa al livello del mare più bassa e di durata pari a 24 ore. Per i dettagli relativi alla condizione al contorno di valle si può far riferimento al paragrafo 3.4.2.

### 3.7 Risultati

I risultati vengono restituiti, per ogni scenario considerato, riportando le condizioni di deflusso in tempi differenti. In particolare nei primi due scenari il Fosso Vignarca è considerato in condizioni di magra, mentre il Fosso Acquaviva viene considerato inizialmente pieno con un valore della superficie libera pari a 0.50 metri sul livello del mare. Nello scenario S11 non viene considerata alcuna portata immessa all'interno del fosso, mentre nello scenario S12 viene immessa la portata pari a 0.2 m<sup>3</sup>/s.

Le figure 3-9, 3-10 mostrano il dettaglio dei risultati ottenuti.



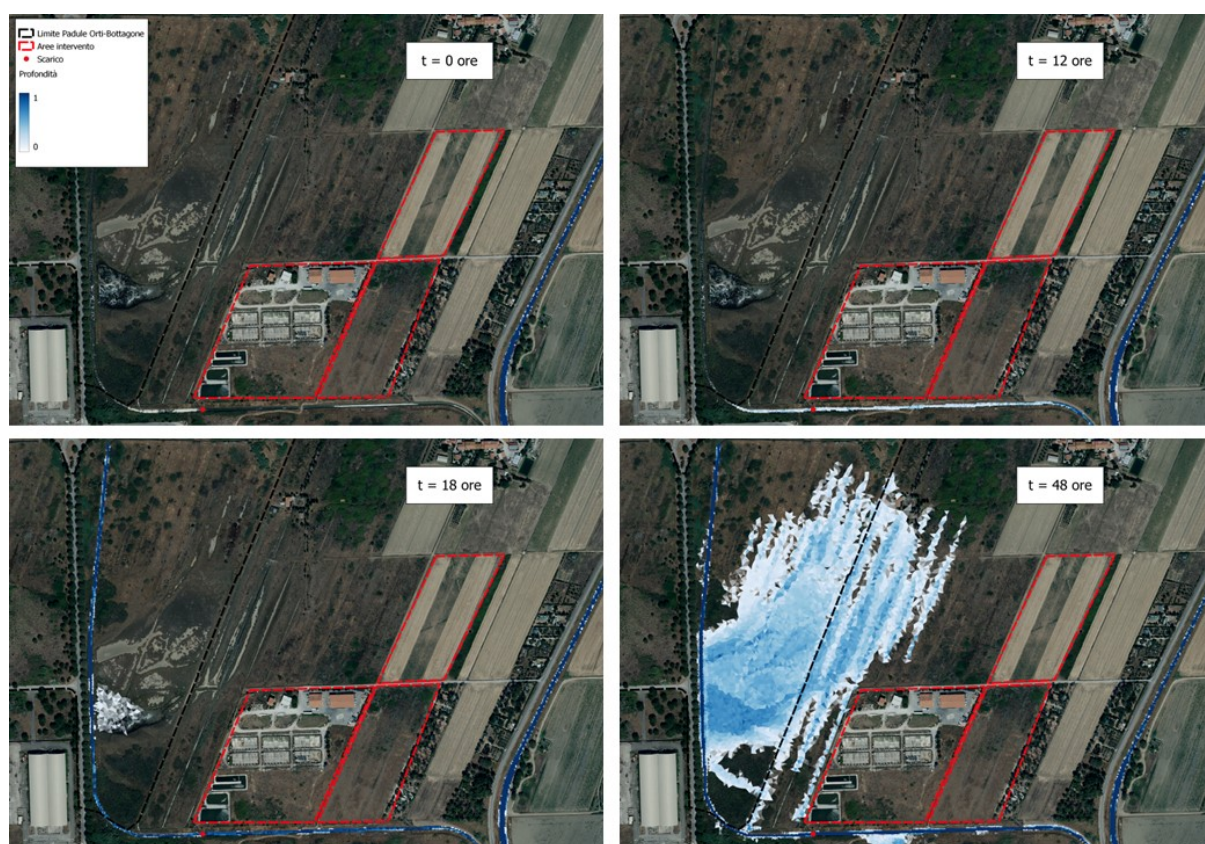


Figura 3-9: Risultati scenario S11

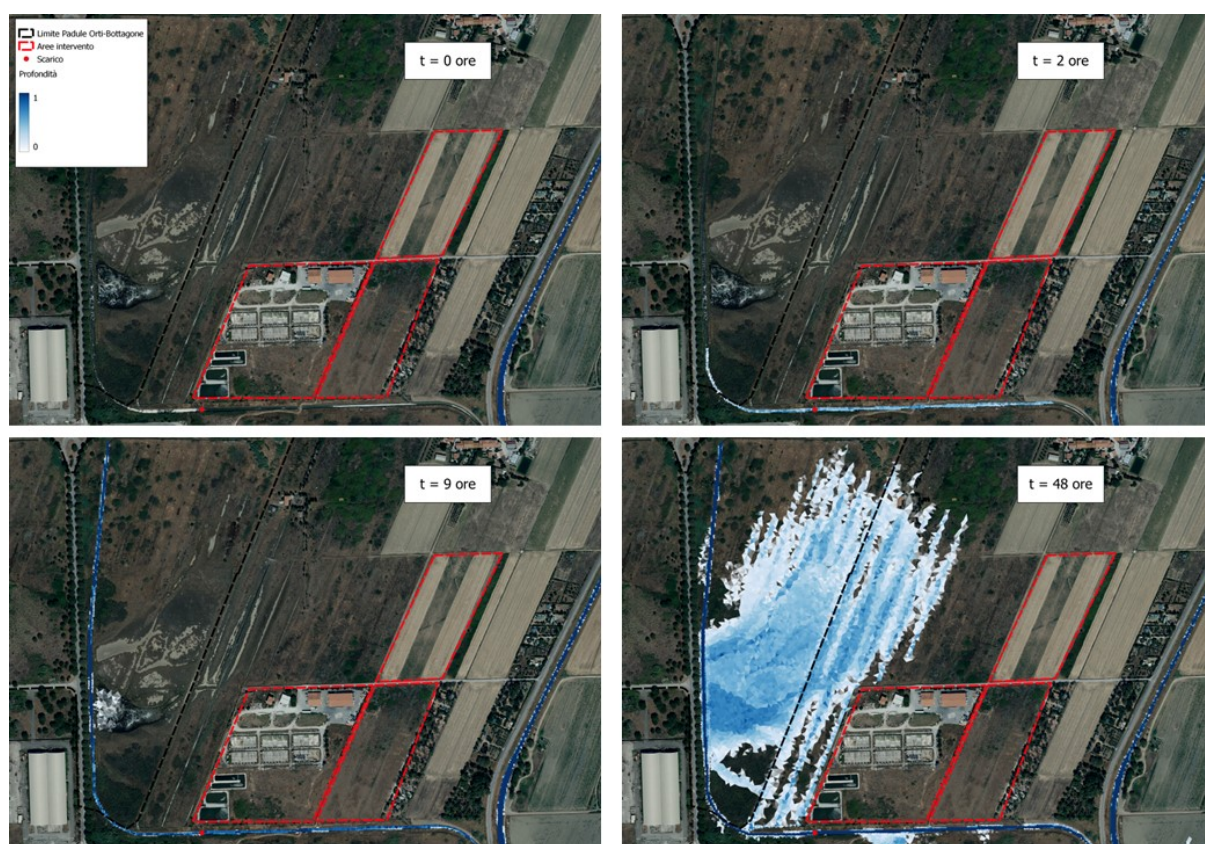


Figura 3-10: Risultati scenario S12

E' possibile notare che partendo da una condizione di magra del Fosso Vignarca, in assenza di altre portate immesse nel sistema, dopo circa 12 ore il canale è quasi totalmente pieno a causa della risalita di acqua dal mare, dopo circa 18 ore l'acqua inizia a penetrare all'interno della padule tramite la connessione idraulica mostrata in figura 3-3. Dalle 12 ore in poi l'area della padule allagata aumenta nel tempo fino ad arrivare alla condizione mostrata nel pannello in basso a sinistra. A partire dalle 40 ore, dall'inizio della fase di decrescita si nota un progressivo svuotamento del canale, tuttavia l'area bagnata della padule non subisce sostanziali variazioni. Osservando i risultati dello scenario S12, che differisce dal precedente solo per l'immissione di una portata aggiuntiva nel fosso (e prevista nel progetto) si nota come la portata immessa tenda a riempire il Fosso Vignarca, andando sia in direzione del mare che risalendo il canale e già dopo due ore la zona della padule è interessata dall'acqua. La dinamica prevalente risulta essere quella della risalita dell'acqua dal mare in quanto osservando l'area della padule allagata è del tutto paragonabile a quella in assenza di portata (figura 3-9). Una volta pieno, il Fosso Vignarca risente sia della presenza a valle della confluenza con Fosso Acquaviva sia della variazione indotta dal livello del mare e tende a svuotarsi lentamente. Le connessioni idrauliche (rilevate tramite immagini satellitari) tra il fosso e la padule favoriscono la laminazione delle acque che risalgono all'interno del fosso.

Negli scenari S13 ed S14, invece, viene sempre considerata la porta aggiuntiva pari a  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , ma il fosso viene considerato con due condizioni iniziali differenti di profondità idrica, rispettivamente pari 0.25 e 0.50 m.

Le figure 3-11, 3-12 mostrano il dettaglio dei risultati ottenuti.

In coerenza con lo scenario S12, al fine di offrire una valutazione comparativa, i risultati vengono riportati per gli istanti temporali iniziale, 2 ore, 9 ore e alla fine dell'evento (48 ore). Come si può notare i risultati non risentono particolarmente delle condizioni al contorno e quello che si osserva è che a fronte di una diminuzione del riempimento iniziale del canale, l'area allagata è del tutto comparabile tra i due scenari e anche con lo scenario S12. Ciò testimonia il fatto che l'idrodinamica del fosso è fortemente condizionata dalle condizioni al contorno offerte dal livello del mare e dal livello che si instaura nel Fosso Acquaviva.

Infine, per valutare condizioni meno intense rispetto ai livelli presenti alla foce, sono stati effettuati altri due scenari di simulazione in cui il Fosso Vignarca si trova sempre parzialmente pieno all'inizio della simulazione, mentre la condizione al contorno ha una durata di 24 ore (contro le 48 degli scenari precedenti) e ha un massimo pari a 0.25 m, ossia prossimo al valore della massima alta marea astronomica.

Le figure 3-13, 3-14 mostrano il dettaglio dei risultati ottenuti.

In questo caso, si osserva che i tiranti all'interno del Fosso Vignarca assumono valori più contenuti, ma in entrambi i casi si osserva la penetrazione di acqua all'interno della zona depressa della Padule Orti-Bottagone.



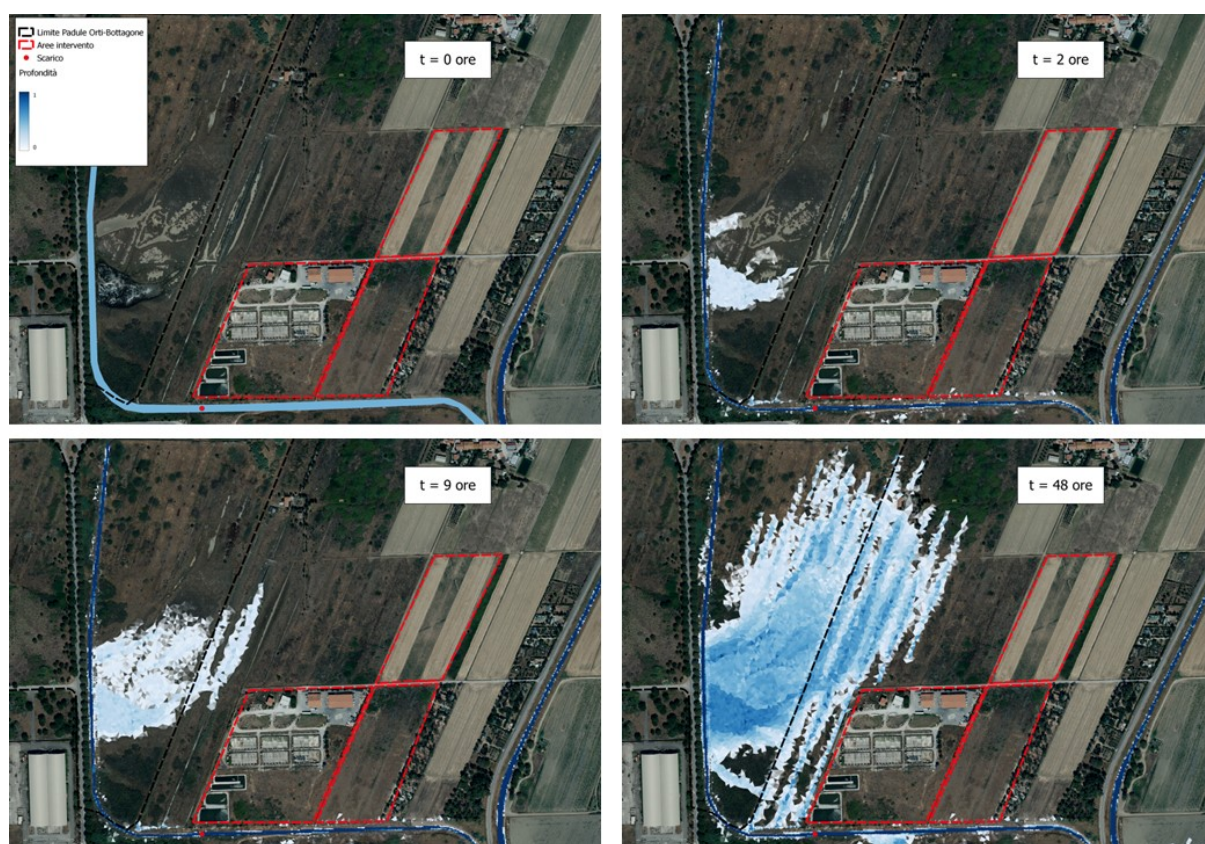


Figura 3-11: Risultati scenario S13

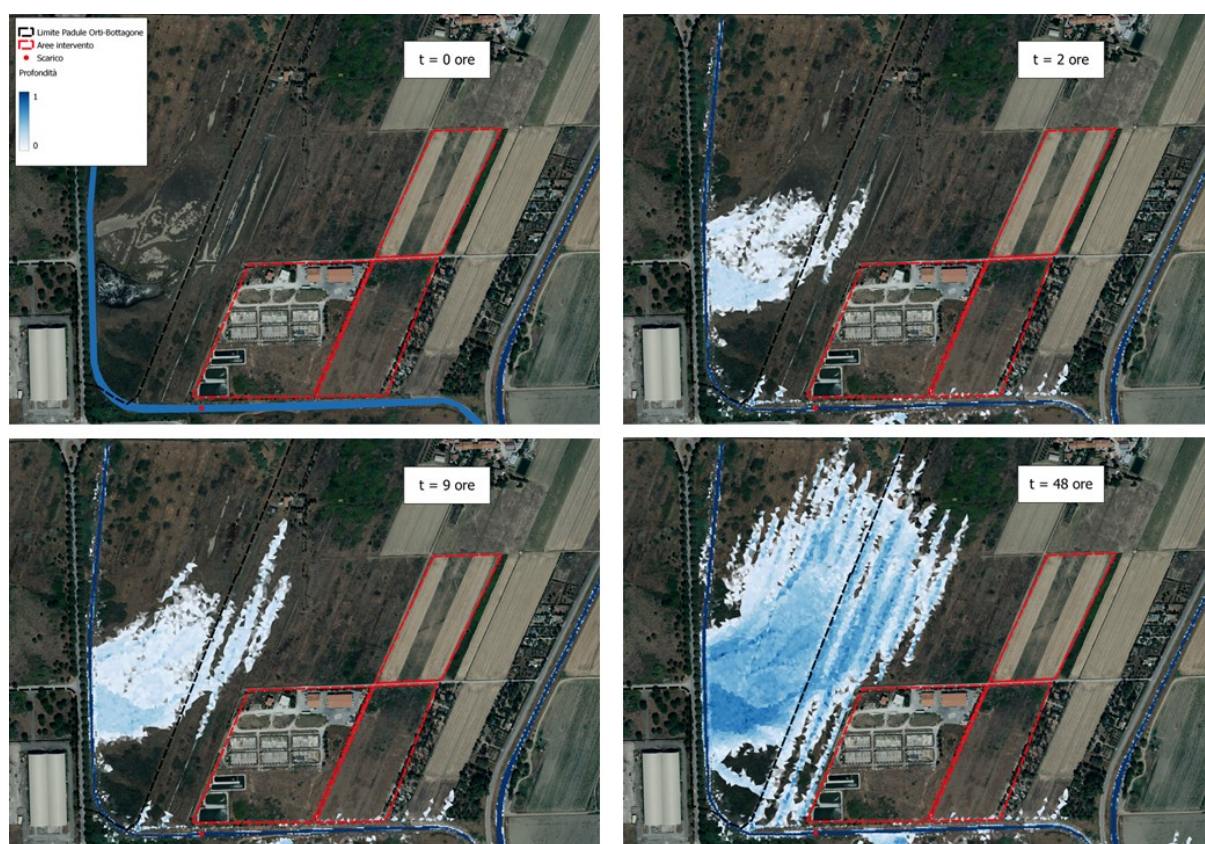


Figura 3-12: Risultati scenario S14





Figura 3-13: Risultati scenario S21

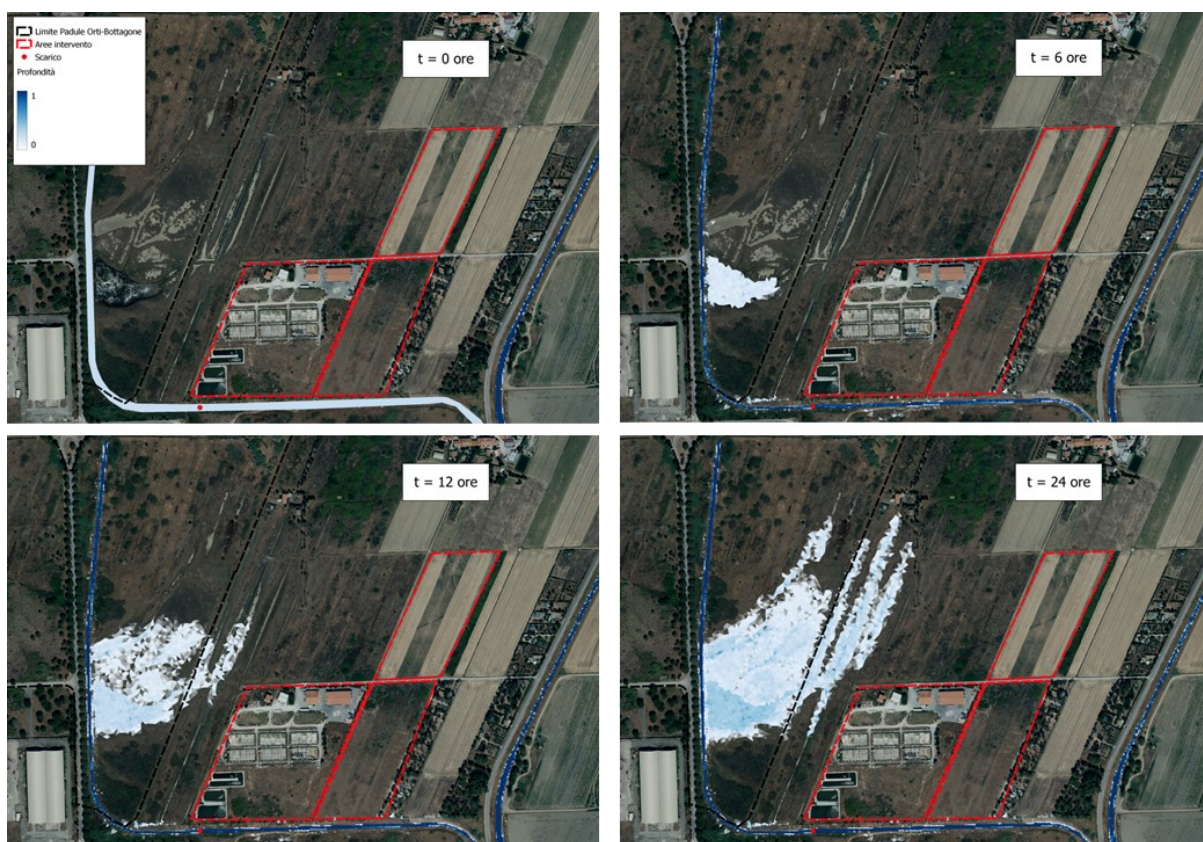


Figura 3-14: Risultati scenario S22



### 3.7.1 Validazione dei risultati numerici

Come noto, stante la capacità del modello di simulare correttamente l'idrodinamica dei fossi (più in generale dei corsi d'acqua), una validazione dei risultati ottenuti aiuta nell'interpretazione del fenomeno fisico e permette di validare le ipotesi fatte in relazione alle condizioni iniziali e al contorno scelte nei diversi scenari di simulazione.

Pertanto, sono stati richiesti due sopralluoghi sulle aree oggetto di studio in due condizioni meteorologiche differenti in particolare nei giorni 22/11/2023 e 24/11/2023. La figura 3-15 mostra i dettagli del sopralluogo effettuato il 22/11/2023 con l'indicazione delle posizioni in cui sono state scattate le fotografie.

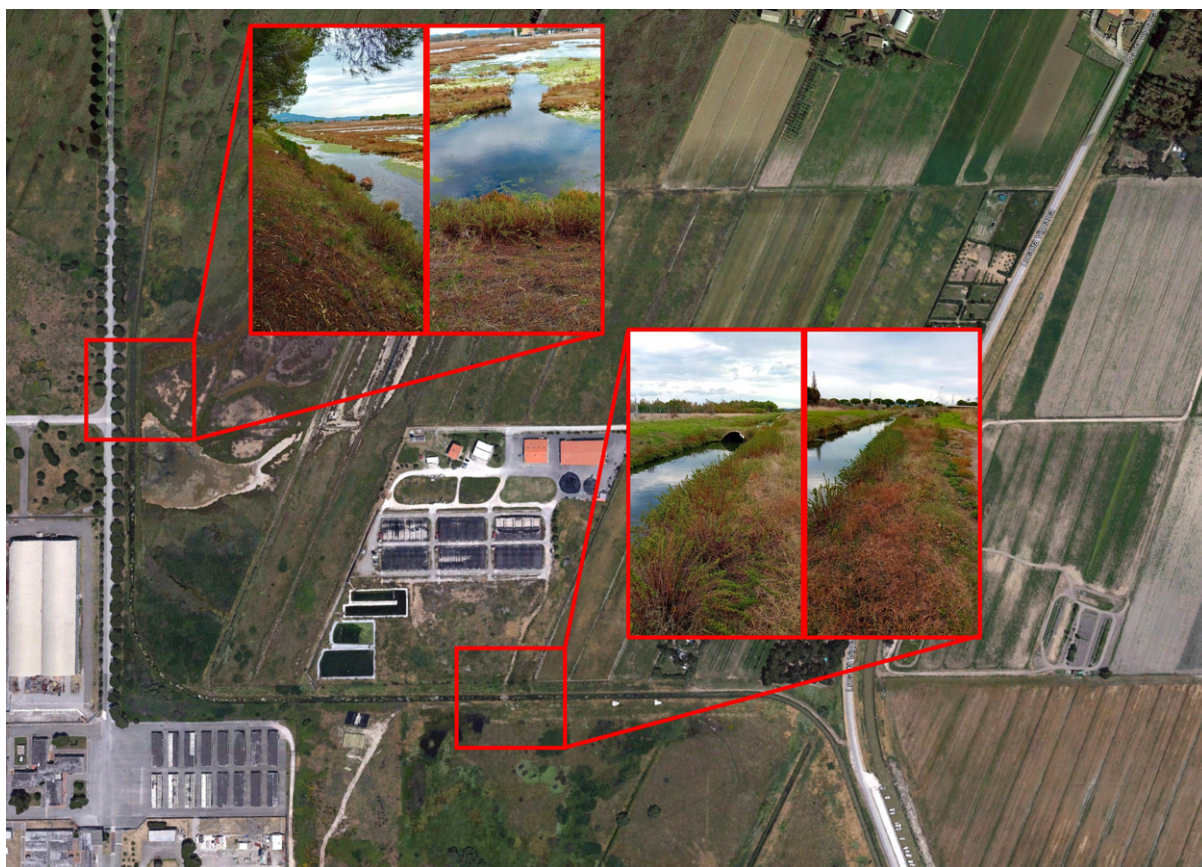


Figura 3-15: Rilievo fotografico del 22/11/2023.

Dalla documentazione fotografica, si evince chiaramente la connessione idraulica tra il Fosso Vignarca e la Padule Orti-Bottagone. Si nota come in condizioni di maltempo il fosso abbia un tirante idrico tale da allagare l'area depressa della padule. Un controllo delle condizioni relative al solo livello di marea misurate nella stazione di Marina di Campo hanno rivelato nell'orario in cui sono state scattate le foto un livello totale di marea di circa 0.30 m.

Il secondo sopralluogo, invece, è stato effettuato il 24/11/2023, con condizioni di alta pressione. Come si evince dalla documentazione fotografica (figura 3-16) anche in tali condi-

zioni il fosso ha un tirante idrico paragonabile a quello del 22/11/2023 e anche in questo caso l'area della Padule risulta essere allagata a causa delle connessioni idrauliche presenti con il Fosso Vignarca.



Figura 3-16: Rilievo fotografico del 24/11/2023.

Da un confronto con i dati del modello digitale del terreno si evince che l'area interessata da parte della Padule Orti-Bottagone è una zona depressa che favorisce naturalmente l'accumulo delle acque provenienti dal Fosso Vignarca.

Pertanto, sulla base del confronto tra le simulazioni e le osservazioni di campo si può constatare che il modello riesce a cogliere l'idrodinamica del Fosso Vignarca. Inoltre l'area che risulta essere allagata al termine di tutte le simulazioni effettuate è effettivamente in connessione con il fosso ed è interessata dalla risalita dell'acqua dalla foce fluviale.



---

## 4 Fenomeni di diffusione e dispersione

---

Per la valutazione degli effetti di diffusione e dispersione dello scarico di acque all'interno del Fosso Vignarca, come precedentemente descritto (paragrafo 4), sono state effettuate delle simulazioni mediante un modello lagrangiano di diffusione e dispersione del tipo random-walk. Sulla base dell'idrodinamica che si instaura all'interno del fosso, e desunta dalle simulazioni numeriche effettuate nell'ambito dell'approfondimento idrologico idraulico, è stata valutata l'evoluzione spazio-temporale di particelle di tracciante passivo, immesse nel dominio di calcolo, in corrispondenza del punto di immissione (figura 3-6).

In particolare il modello è stato applicato a tre dei cinque scenari in cui è presente una portata immessa nel Fosso Vignarca S12, S14 e S22 (vedi tabella 3-8), in quanto rappresentative di diverse condizioni iniziali (fosso vuoto, con profondità di acqua pari a 0.8 m e 0.30 m) del Fosso Vignarca e di due diverse condizioni al contorno sulla foce (evento con  $z_{max} = 0.8$  m e  $z_{max} = 0.25$  m).

Le figure 4-1 - 4-15 descrivono i risultati ottenuti. In particolare in ognuna delle figure relative ad un istante temporale, nel pannello centrale è rappresentata l'area oggetto di studio, nel pannello in basso a sinistra un ingrandimento dell'area nelle immediate vicinanze della sorgente mentre in quello in basso a destra un ingrandimento della zona intorno alla sorgente.

Nello scenario S1 (figure 4-1-4-5) che rappresenta le condizioni di magra del fosso, le particelle (quindi il soluto scaricato) tendono a migrare sia in direzione della curva che in direzione della foce. Il progressivo riempimento del canale ad opera della risalita dell'acqua nel canale tende a disperdere le particelle che rimangono confinate in un'area confinata intorno al punto di scarico. Al termine della fase di crescita della marea e della fase costante (vedi figura 3-12) con  $z_{max} = 0.8$  m (rappresentativa di una condizione estrema) si nota come le particelle (ovvero l'acqua scaricata nel fosso) tendono ad essere trasportate verso la foce per effetto della fase discendente della marea che torna, nelle 48 ore a valori prossimi al livello medio mare. Si può altresì osservare che nella zona della Padule Orti-Bottagone non si osservano particelle, ossia il soluto si disperde prevalentemente nella direzione della foce.

L'analisi dei risultati relativi allo scenario S14, in cui la condizione al contorno è la stessa del caso S12, ma il Fosso Vignarca ha una condizione iniziale di profondità idrica pari a 0.8 m, si può notare che l'evoluzione temporale delle particelle è sostanzialmente equivalente al caso precedente. Anche in questo caso le acque scaricate tendono a rimanere confinate nell'area di scarico nella fase di ingressione marina nel pozzo, mentre defluiscono verso la foce nella fase calante della marea. Anche in questo scenario l'area della Padule Orti-Bottagone non risente della presenza dello scarico.

L'ultimo scenario considerato è l'S22 che prevede il Fosso Vignarca con una profondità idrica iniziale pari a 0.30 m forzato da una condizione al contorno analoga a quella degli scenari S12 ed S14, ma con un valore di  $z_{max}$  pari a 0.25 m (a rappresentare condizioni non estreme). Come per i due scenari precedenti non si ravvisa la presenza di particelle all'interno della Padule, pertanto l'acqua scaricata rimane confinata nell'area attorno allo scarico. Inoltre, data la condizione al contorno più bassa in corrispondenza della foce, in questo caso l'effetto di defluimento delle acque dello scarico verso la foce è meno evidente.

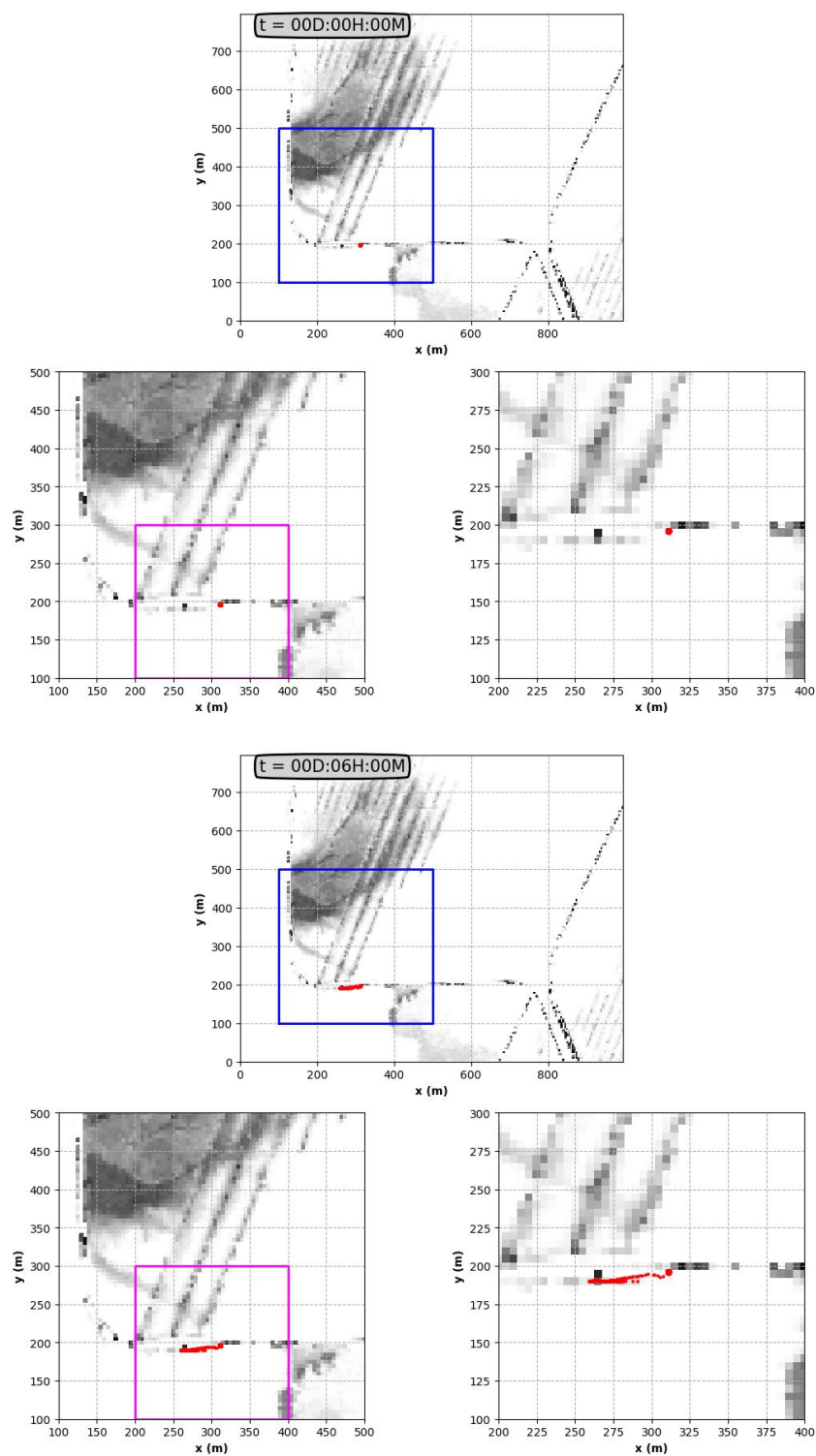


Figura 4-1: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 1

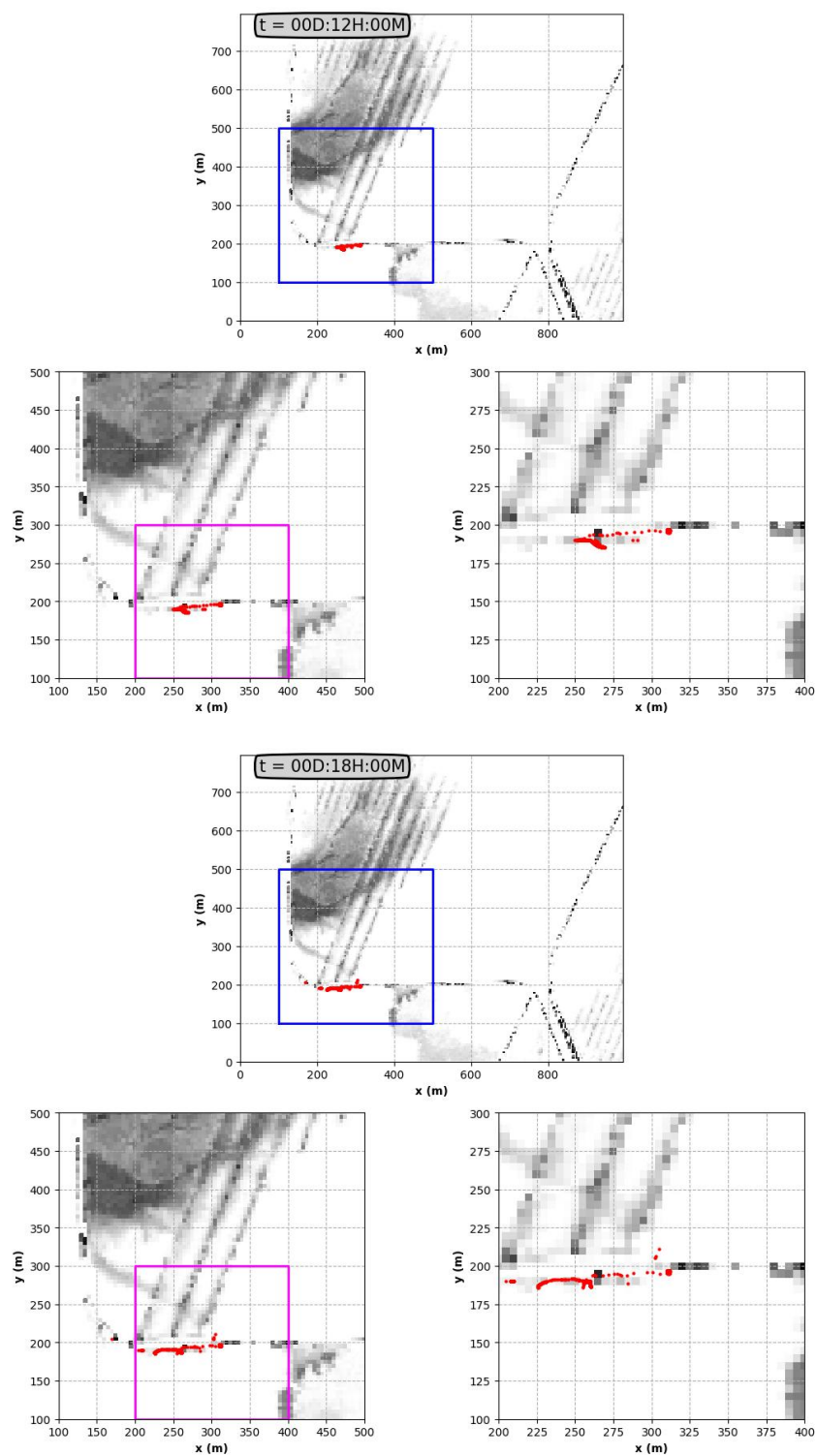


Figura 4-2: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 2



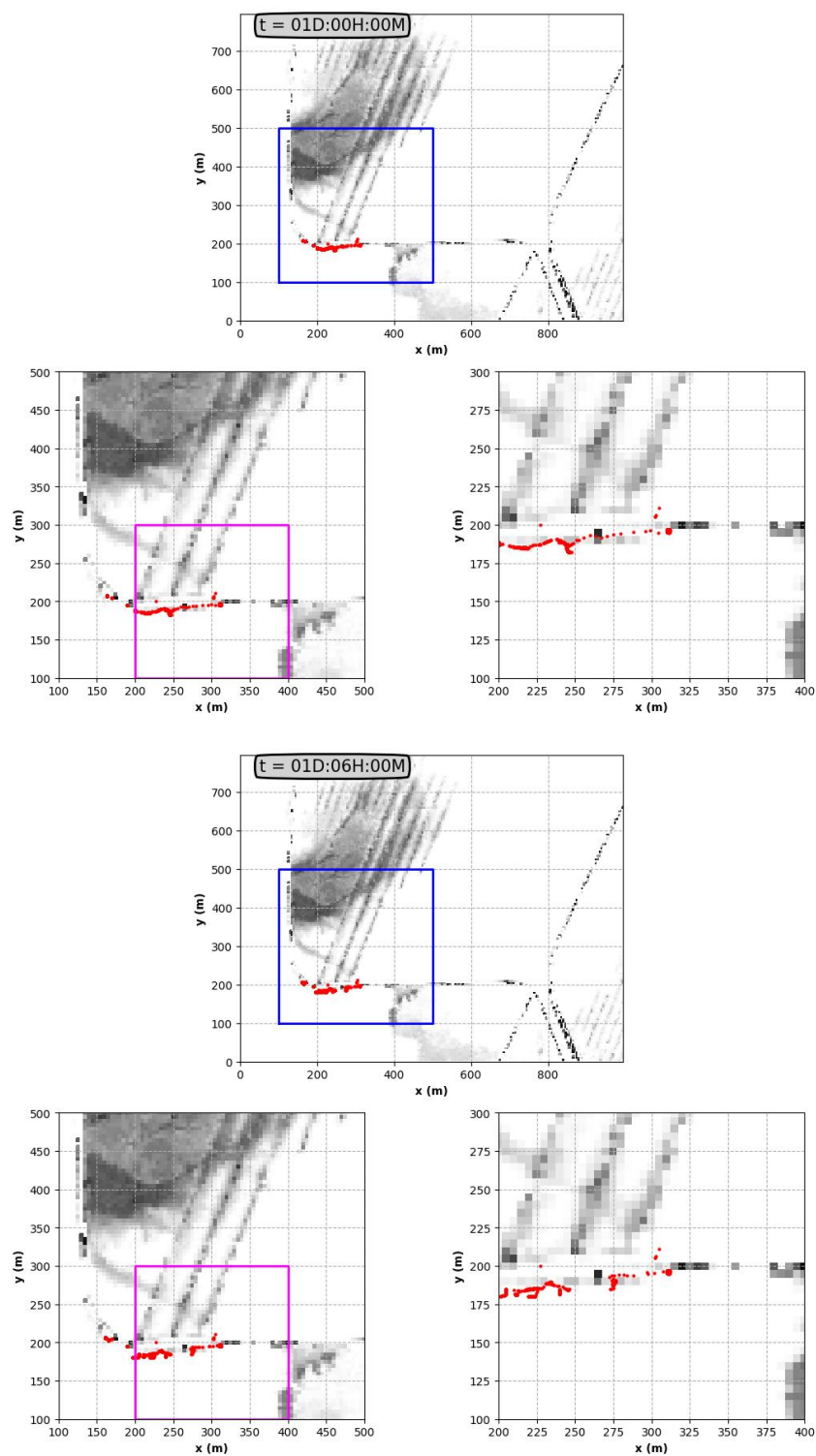


Figura 4-3: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 3

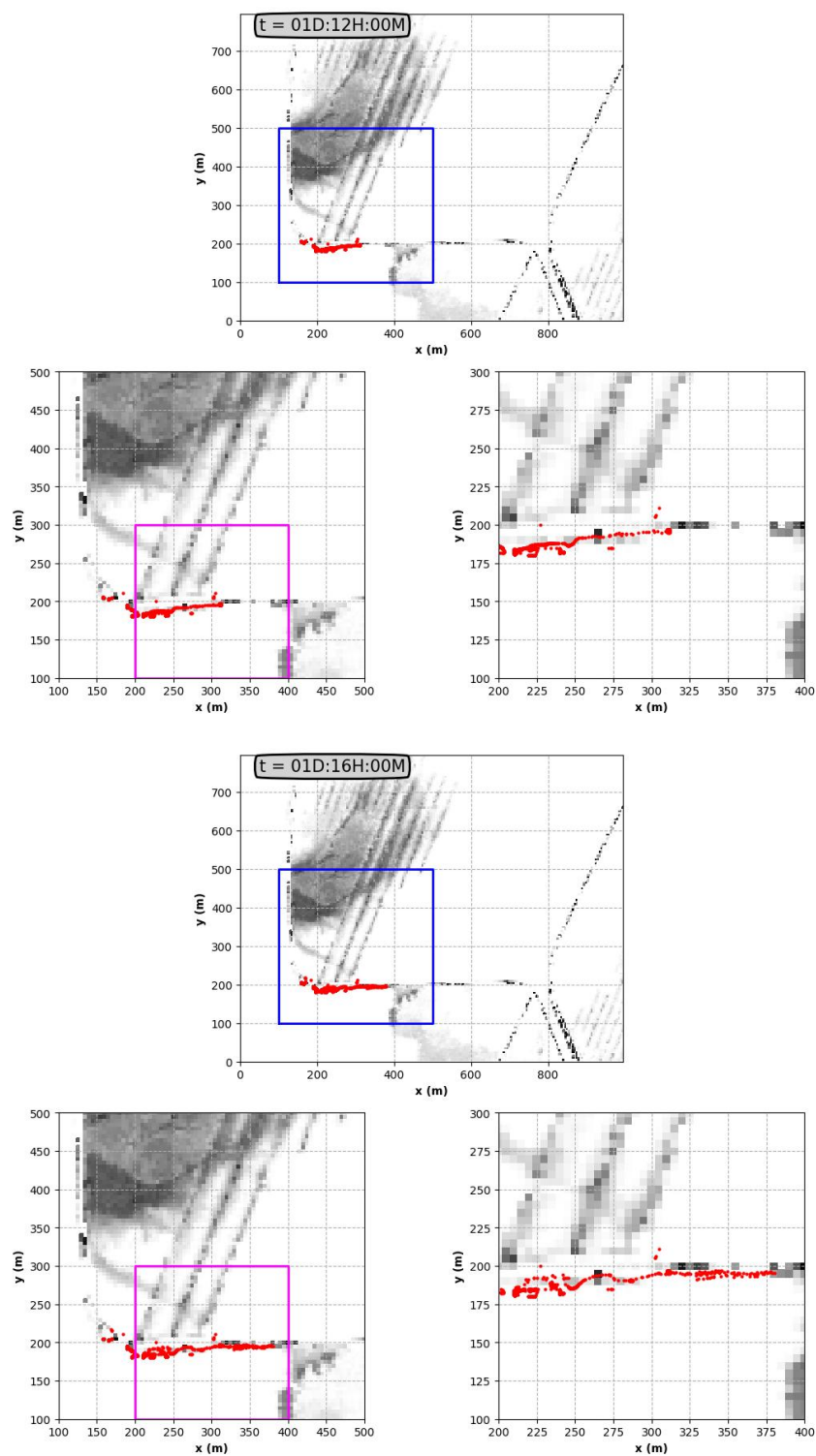


Figura 4-4: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 4

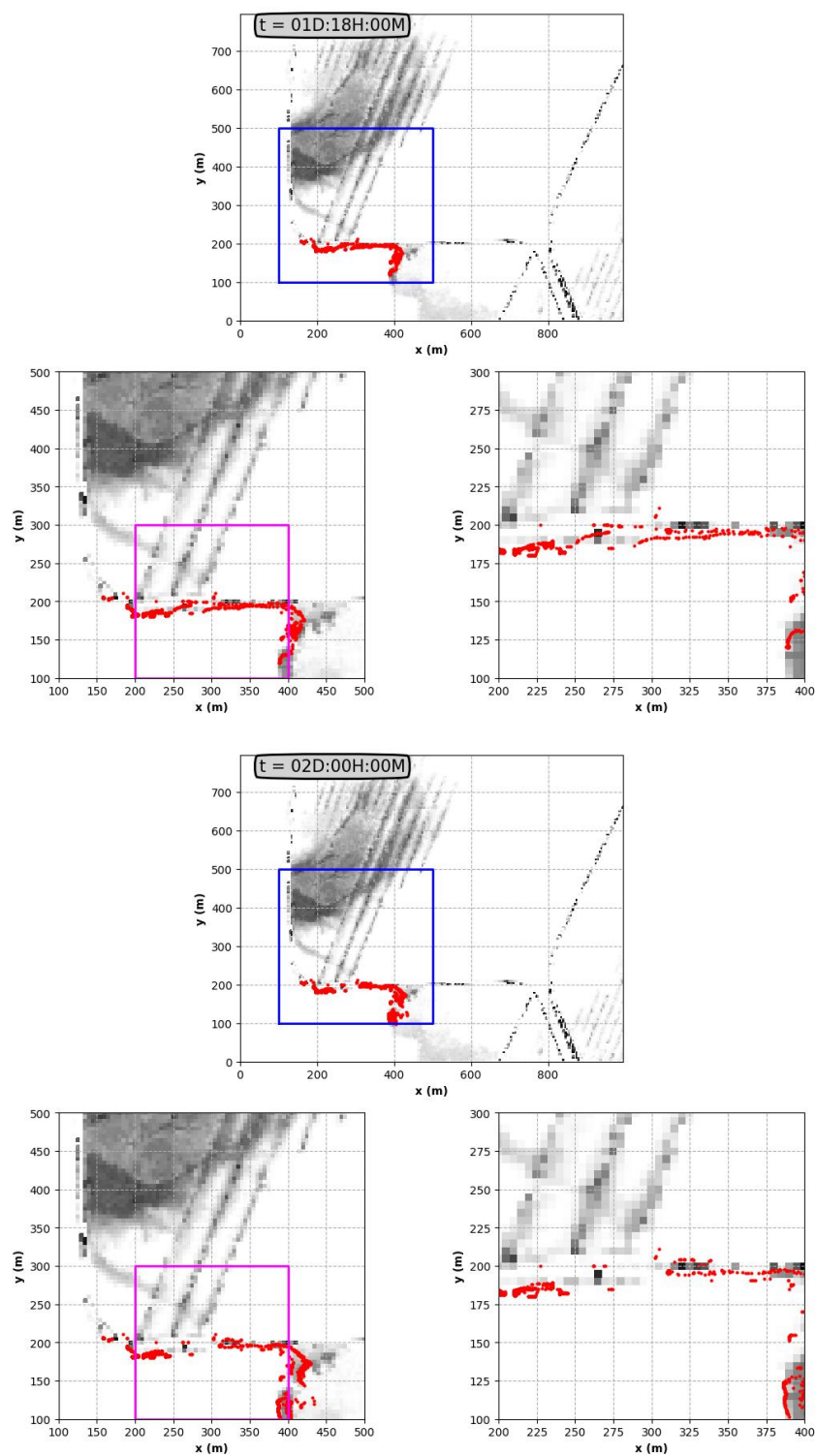


Figura 4-5: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S12 - 5

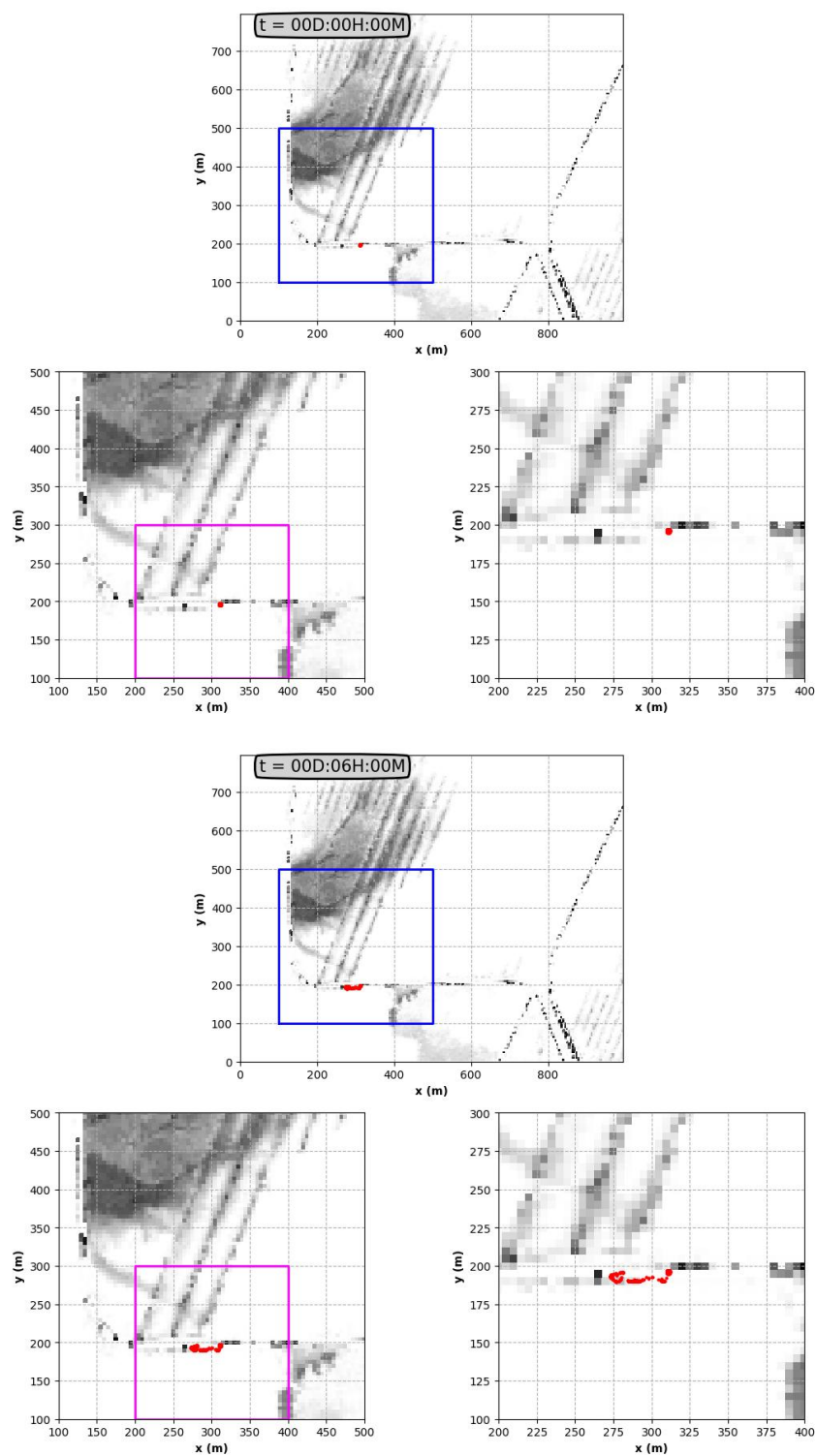


Figura 4-6: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 1

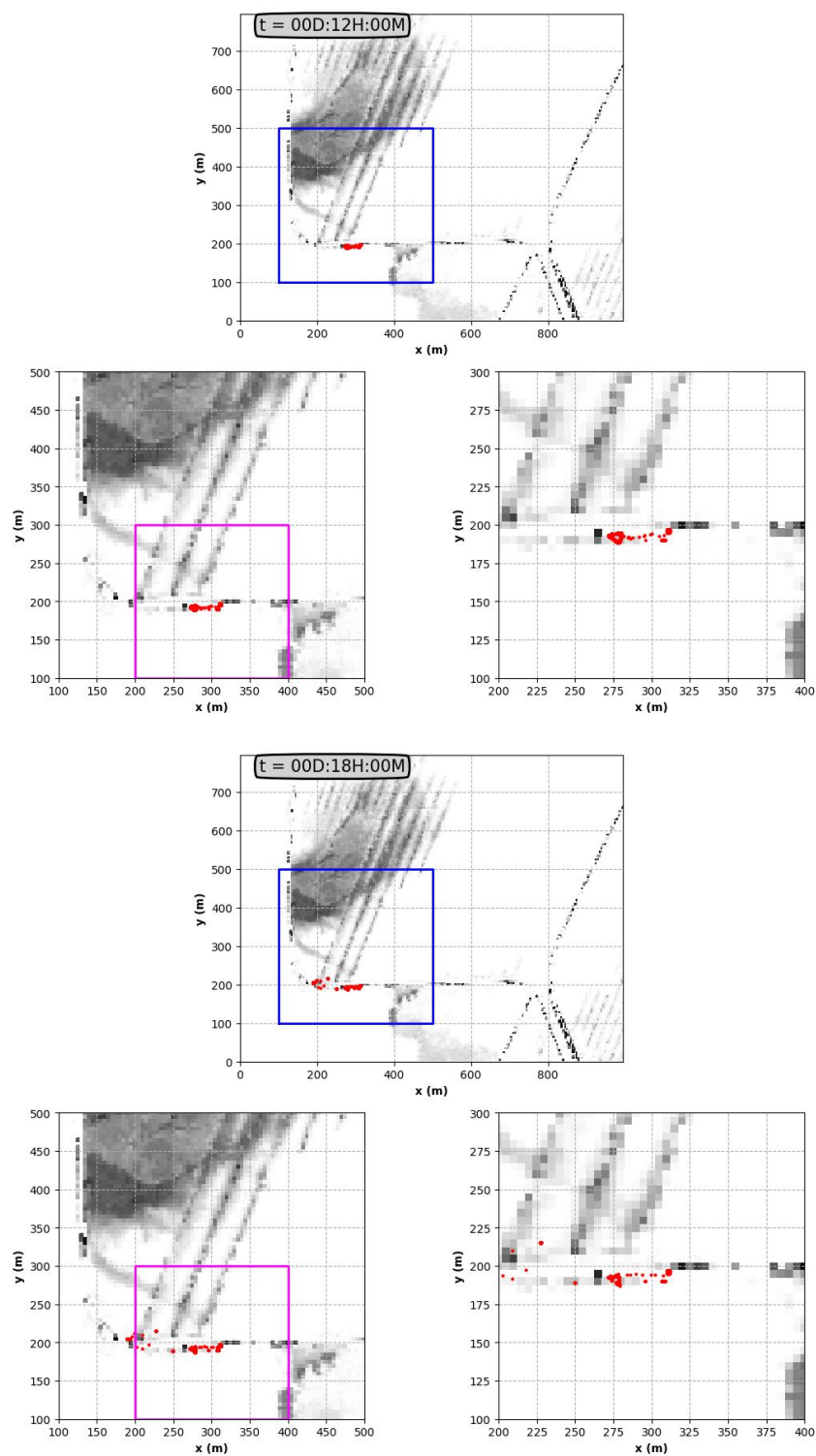


Figura 4-7: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 2



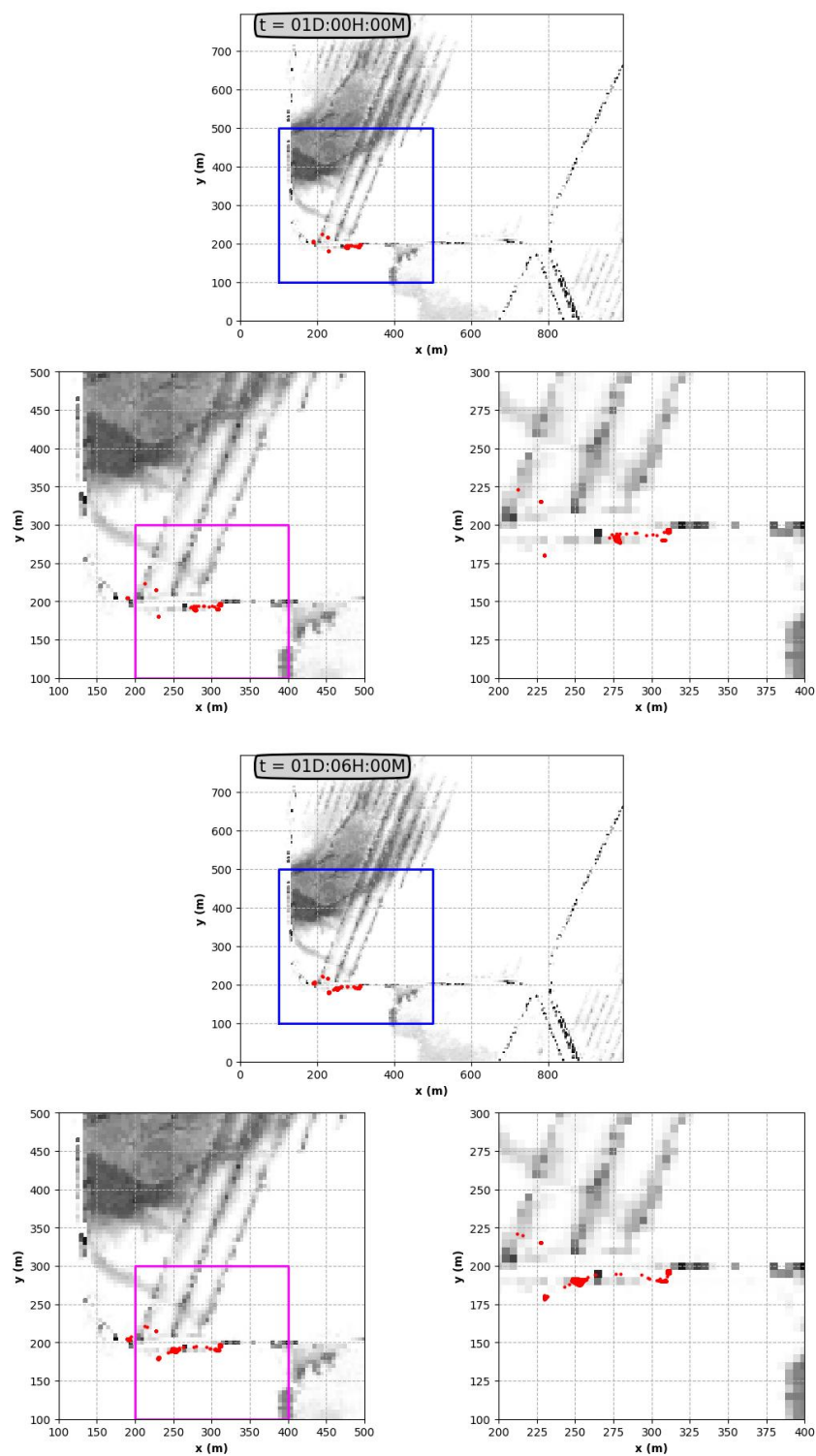


Figura 4-8: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 3



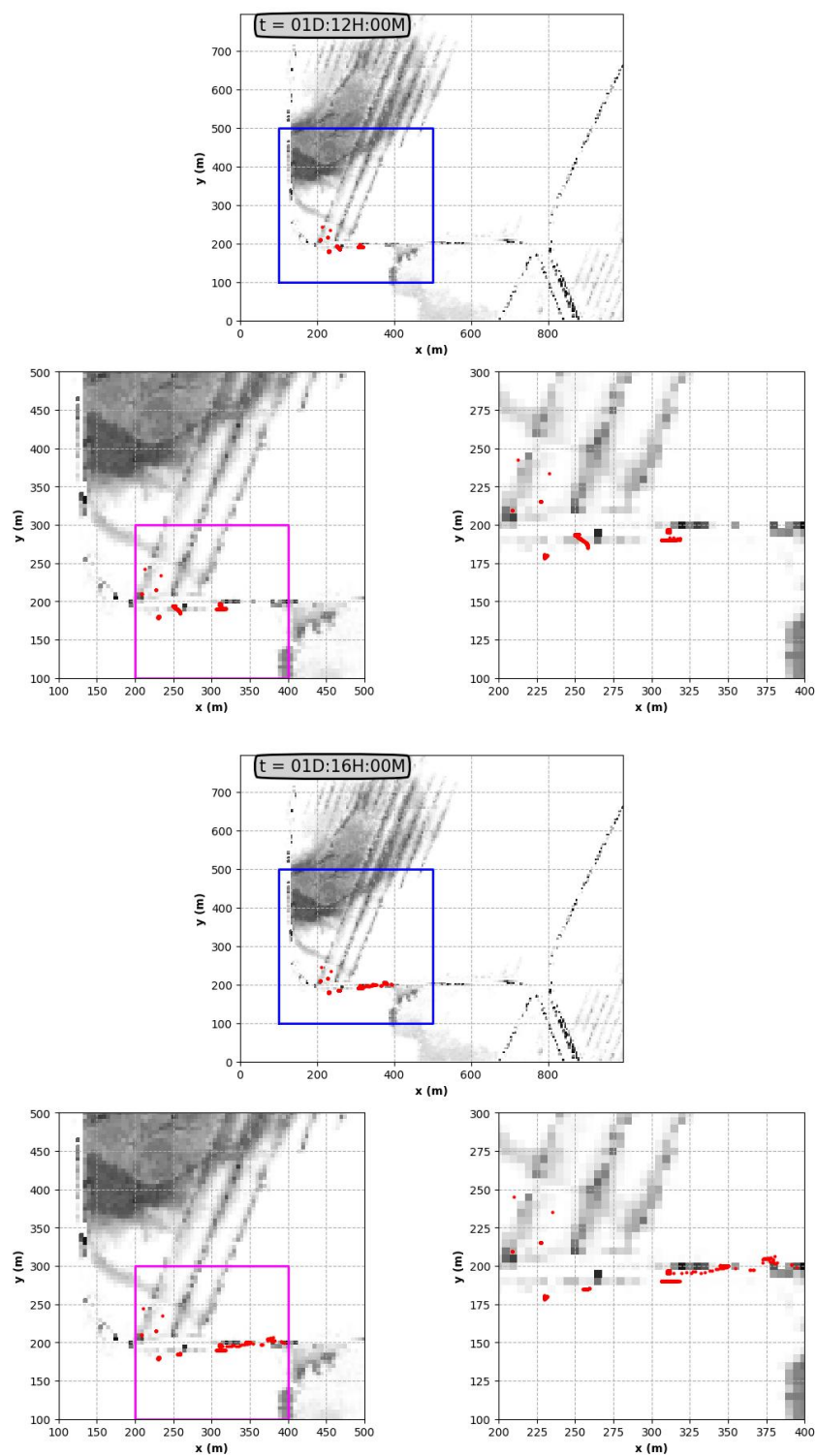


Figura 4-9: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 4

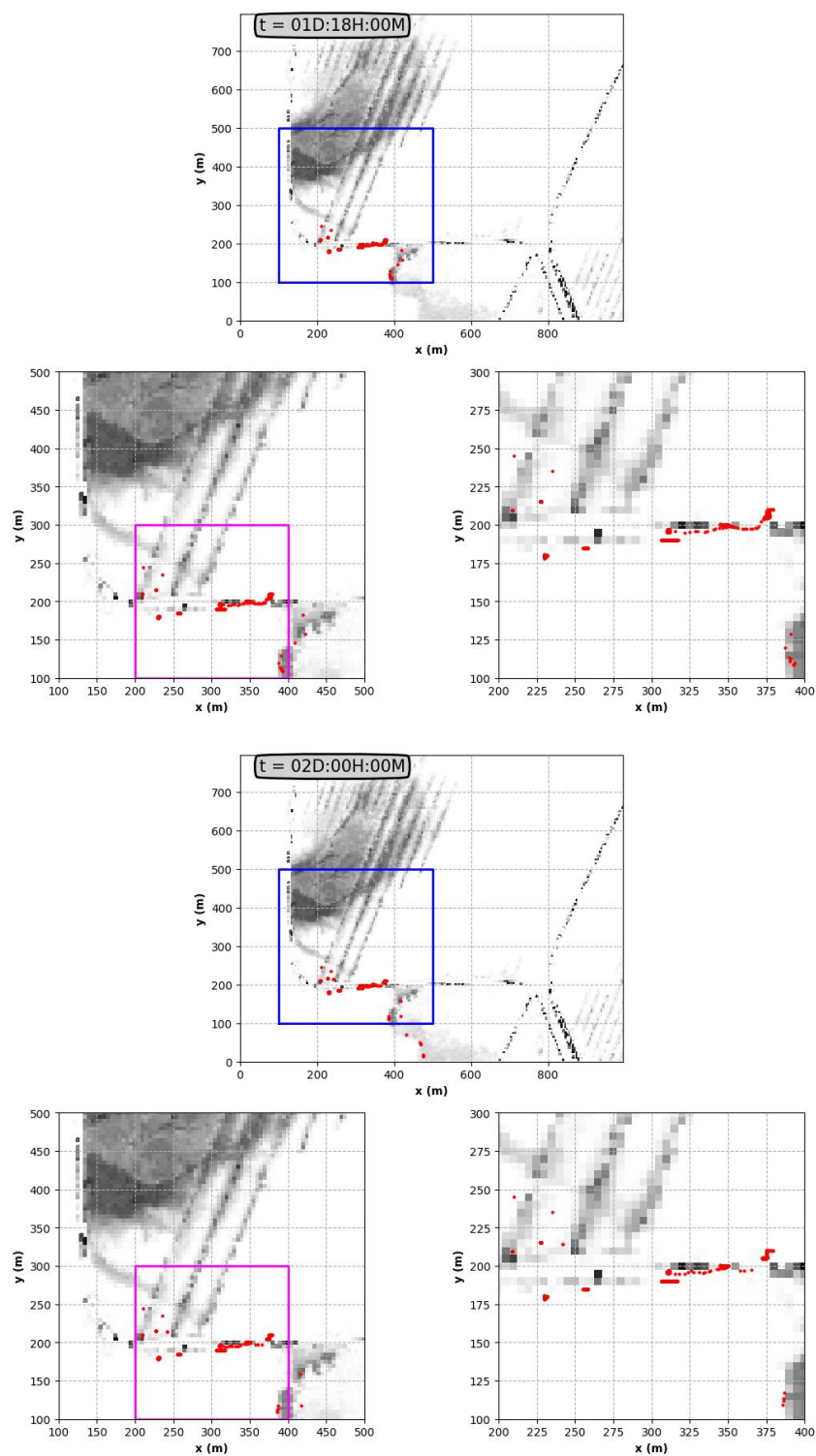


Figura 4-10: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S14 - 5

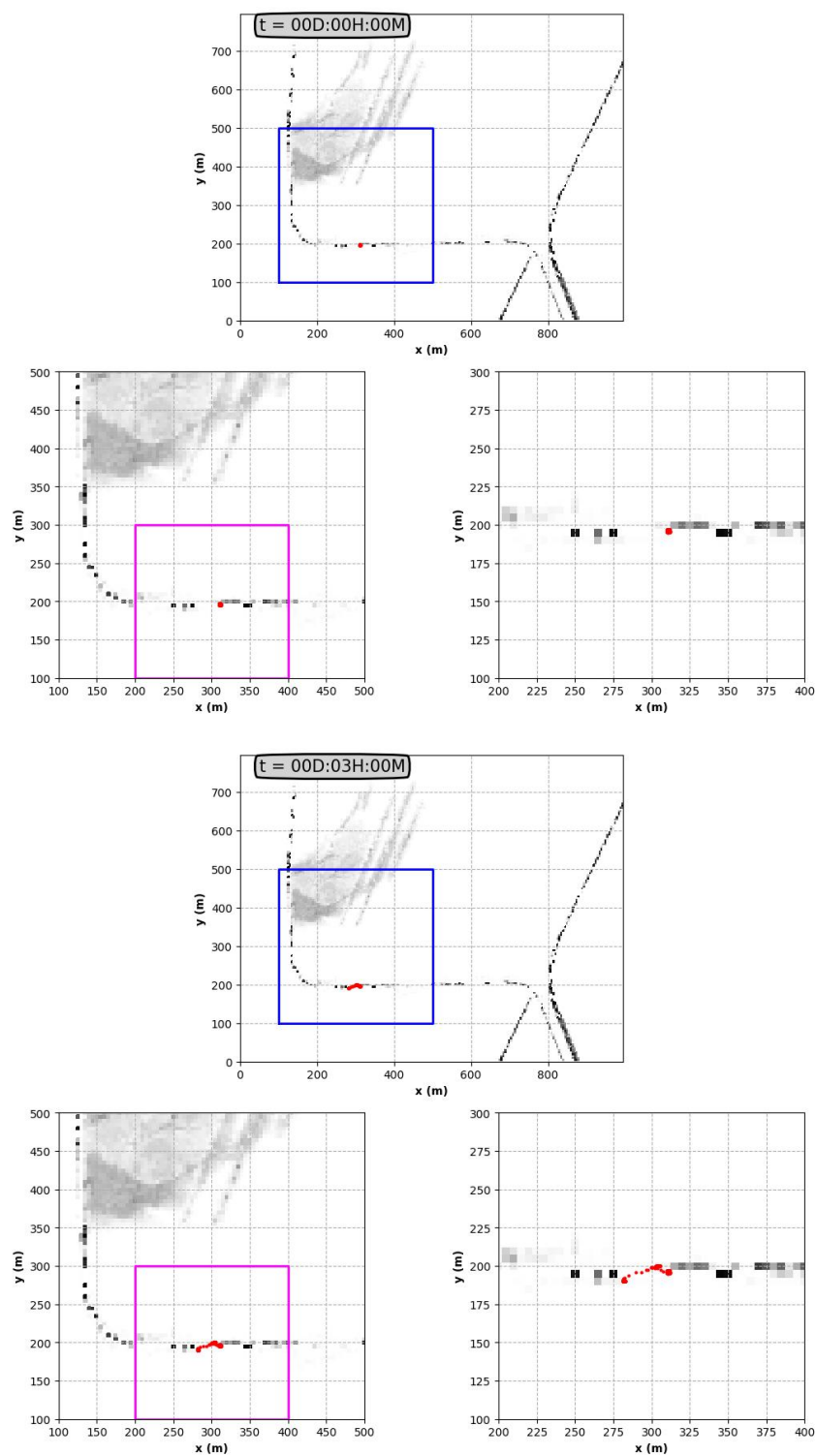


Figura 4-11: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 1

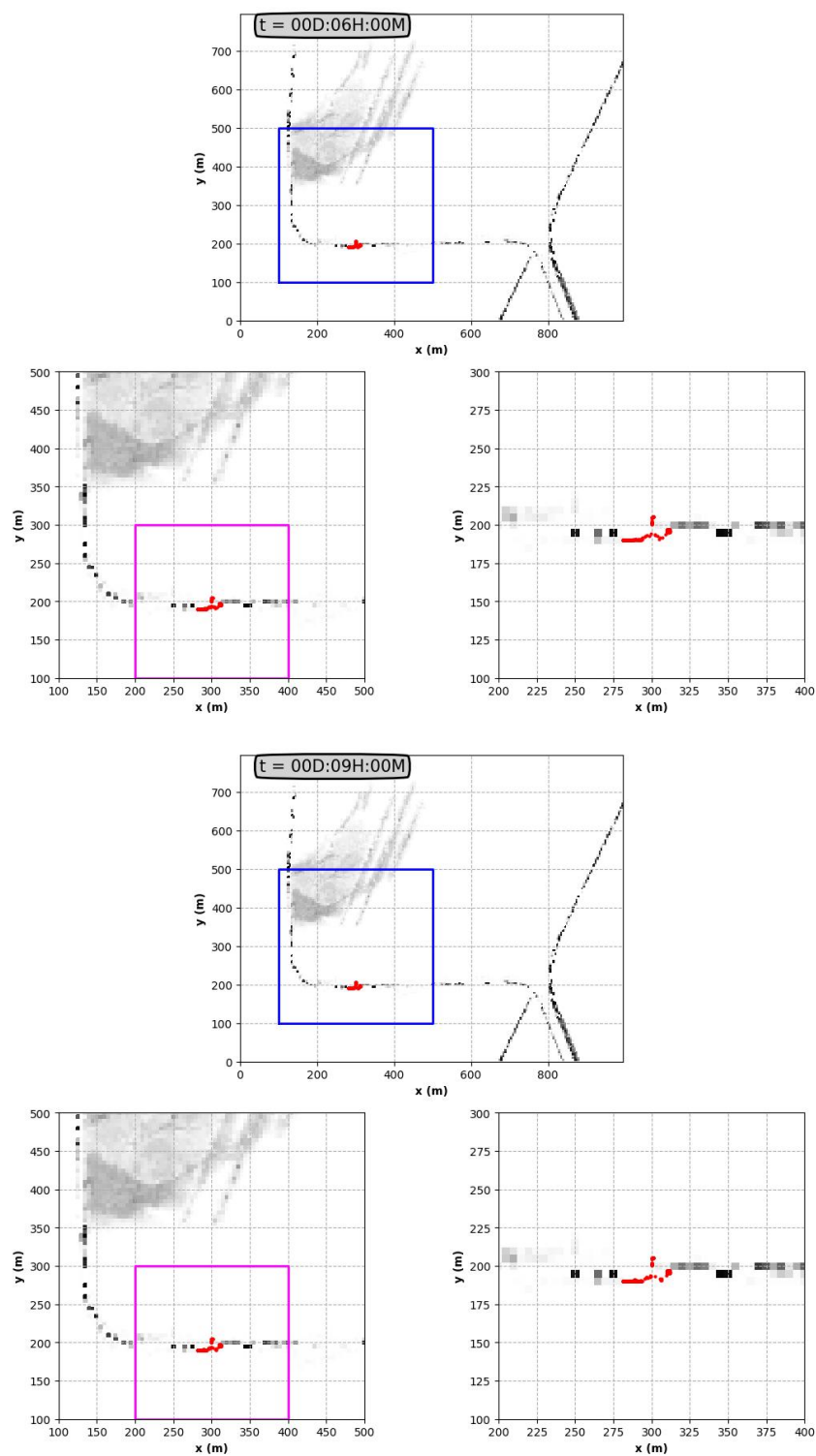


Figura 4-12: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 2

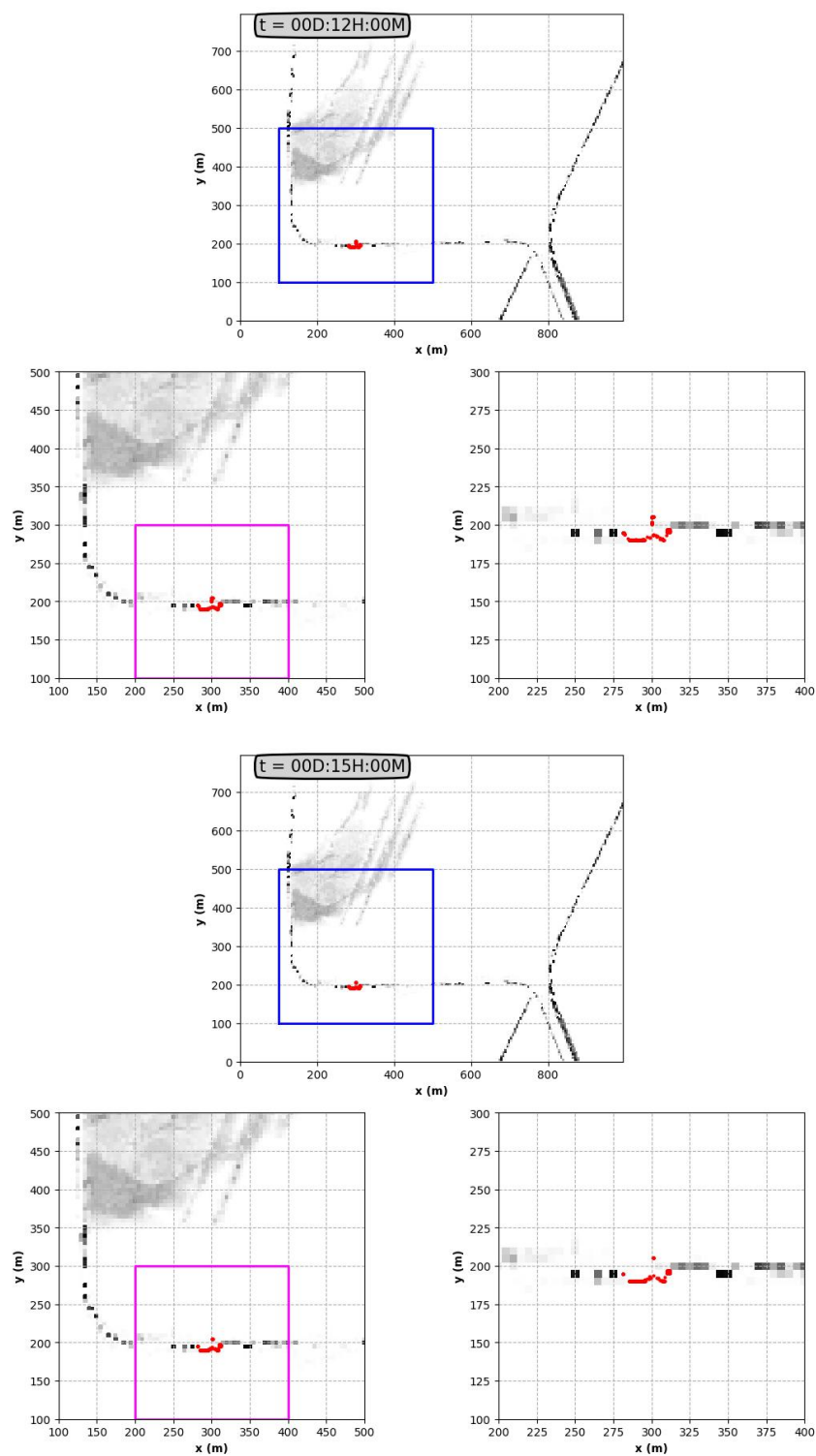


Figura 4-13: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 3

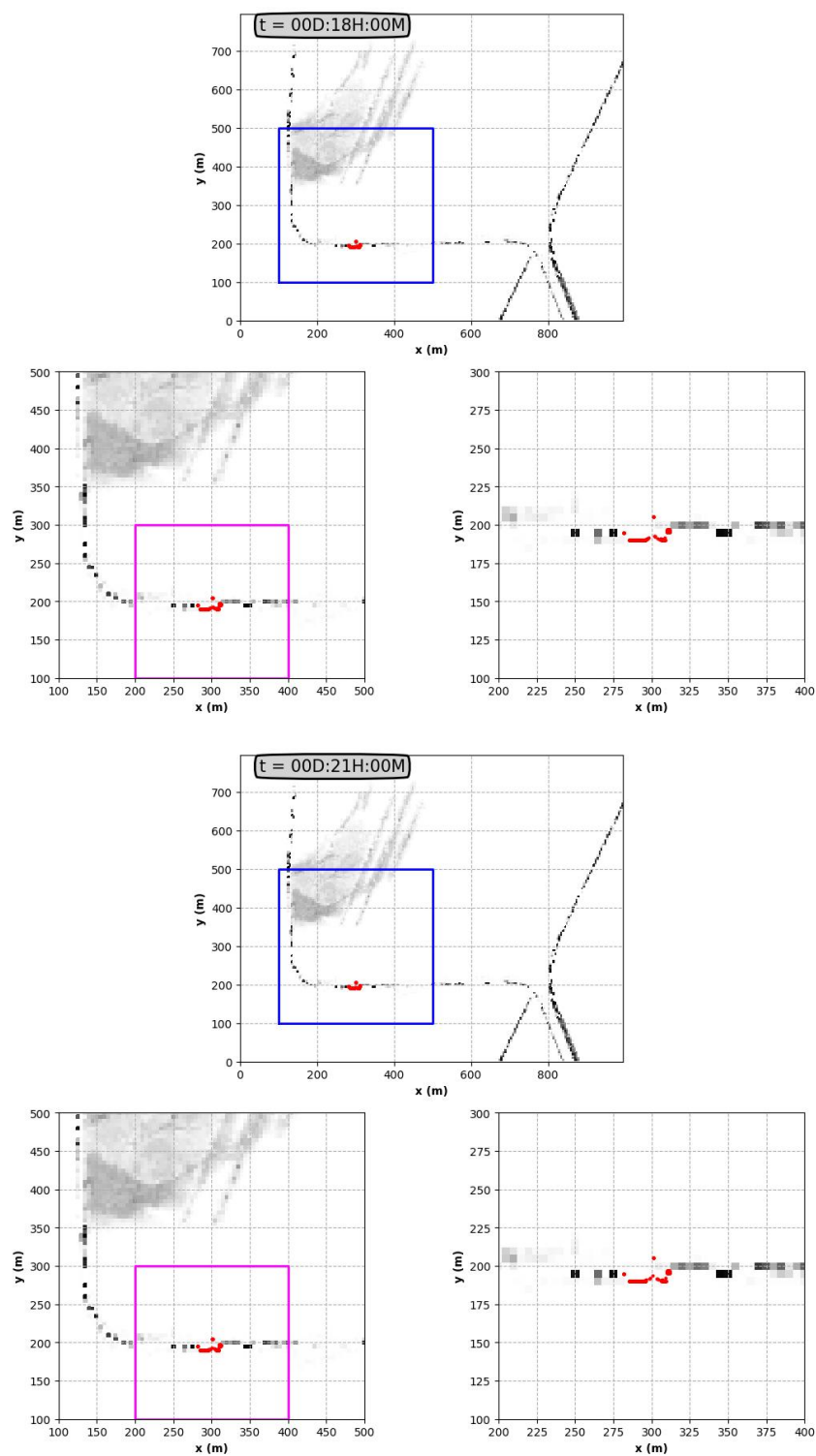


Figura 4-14: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 4



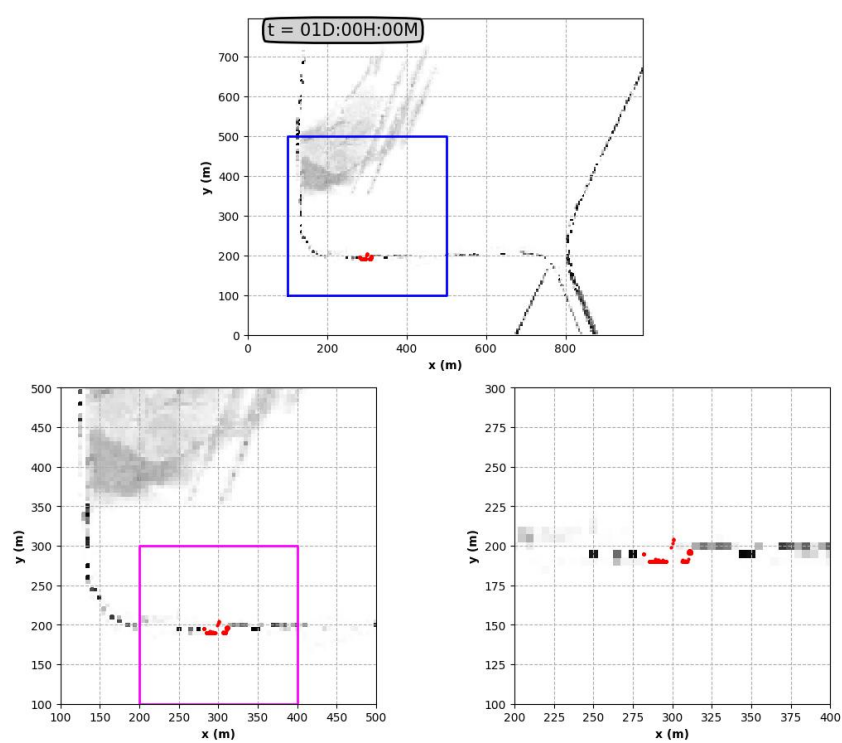


Figura 4-15: Evoluzione spazio temporale delle particelle nello scenario S22 - 5

---

## 5 Effetti relativi all'emungimento da pozzi

---

Nell'ambito del progetto "riqualificazione e ampliamento dell'attività esistente di itticoltura" la committenza richiederà l'apertura di nuovi pozzi per "uso ittigenico" ad uso esclusivo del lavaggio delle reti da pesca. Allo stato attuale quindi non esiste una progettazione delle suddette opere d'arte nè sono stati effettuati studi mirati (es. analisi idrogeologiche dedicate, valutazione delle falde da captare o prove di emungimento). Come si evince anche dallo Studio di Impatto Ambientale allegato al progetto, verranno prelevate solo acque dolci, da falde profonde. Inoltre, le falde superficiali saranno completamente cementate al fine di evitare che possano crearsi comunicazioni con quelle dolci profonde.

La portata da emungere, necessaria alle attività di puliture reti, risulta essere pari a 115 m<sup>3</sup> al giorno che equivalgono a 0.0032 m<sup>3</sup>/s, su un tempo di funzionamento di 10 ore.

Il presente studio ha, tra i suoi obiettivi, quello di valutare possibili influenze dell'emungimento di acqua sulla falda freatica.

Tale influenza è legata fondamentalmente alla tipologia di falda da cui si emunge, ovvero artesiane o freatiche, dallo spessore della falda e dalle caratteristiche della falda stessa (trasmissività e coefficiente di immagazzinamento).

Come evidenziato anche dalla relazione geologica relativa al progetto in esame, esiste uno studio relativo a Ghezzi et al. 1995 (e basato su risultati di sondaggi a carotaggio in continuo eseguiti in situ) che mostra le caratteristiche generali della stratigrafia della fascia costiera fra Piombino e Follonica di cui si riporta un esempio esemplificativo in figura 5-1 e che può essere utilizzata come quadro conoscitivo per delle valutazioni preliminari in relazione agli effetti dell'emungimento.

Si può notare che esistono delle falde profonde, anche al di sotto dei cinquanta metri di profondità, da cui è possibile prelevare acqua.

In una tale configurazione la falda può essere intesa come confinata in quanto lo strato permeabile è racchiuso tra due strati assimilabili ad impermeabili (argille) e possono essere utilizzate le relazioni descritte nel paragrafo 5.

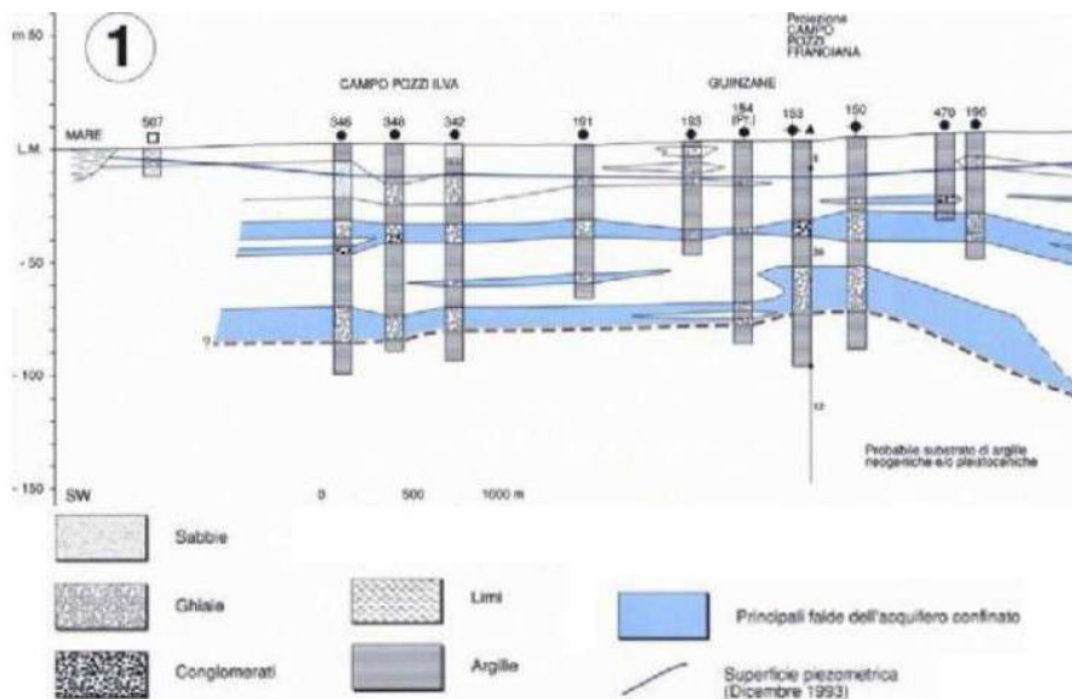


Figura 5-1: Sezione stratigrafica della fascia costiera fra Piombino e Follonica proposta da ghezzi et al, 1995.

Da un punto di vista idraulico, l'emungimento da una falda artesianica provoca, come effetto, un abbassamento della quota piezometrica della falda in un raggio attorno al pozzo variabile in funzione delle caratteristiche della portata emunta e delle caratteristiche della falda (e.g. coefficiente di permeabilità, spessore etc.)

In mancanza di dati di campo, come ad esempio prove di emungimento e rilievi stratigrafici mirati, è possibile effettuare uno studio squisitamente parametrico che valuti l'effetto dell'emungimento della portata desiderata in funzione dello spessore della falda e del coefficiente di permeabilità dello strato permeabile.

In particolare dall'immagine 5-1 si nota come le falde profonde siano in corrispondenza di strati prevalentemente ghiaiosi con spessori della falda variabile a seconda del punto considerato.

Pertanto, è stato effettuato uno studio sugli effetti dell'emungimento considerando una falda confinata compresa tra due strati assunti come impermeabili effettuando uno studio parametrico al variare dello spessore del pozzo.

La valutazione dell'abbassamento della quota piezometrica della falda, nel caso di falde artesiane (confinato) in regime transitorio (portata non costante), può essere effettuato utilizzando la soluzione di Theis che, come dettagliato nel paragrafo 2.7, è una soluzione semplificata che dipende dallo spessore della falda, dai coefficienti di trasmissività e immagazzinamento e dal coefficiente di permeabilità.

Al fine di fornire quindi una verifica degli effetti indotti dall'emungimento della portata

necessaria agli scopi del progetto, è stato valutato l'abbassamento della quota piezometrica della falda a distanze crescenti dal raggio del pozzo

Per quanto concerne la scelta dei parametri della falda ci si è riferiti a dati tipicamente utilizzati in letteratura, In particolare il coefficiente di permeabilità è stato assunto pari a  $k = 10^{-4}$  (m/s), valore tipicamente all'interno del range di variazione delle ghiaie.

Il coefficiente di trasmissività  $T$  è stato valutato costante lungo lo spessore ( $b$ ) con la relazione  $T = bk$  mentre il coefficiente di immagazzinamento è stato valutato utilizzando la relazione (e.g. Di Nucci, 2009 <sup>7</sup>):

$$S = b\eta^2 \frac{\rho g}{\epsilon} \quad (22)$$

dove  $b$  è lo spessore della falda,  $\eta$  è la porosità,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) è la densità dell'acqua ed  $\epsilon$  (kg/m<sup>2</sup>) è il modulo di elasticità dell'acqua. Lo spessore è stato fatto variare dai 2 ai 10 metri mentre la portata è stata posta pari a quella necessaria al lavaggio reti 0.0032 m<sup>3</sup>/s assumendo un tempo di pompaggio pari a 10 ore.

La figura 5-2 mostra i risultati ottenuti.

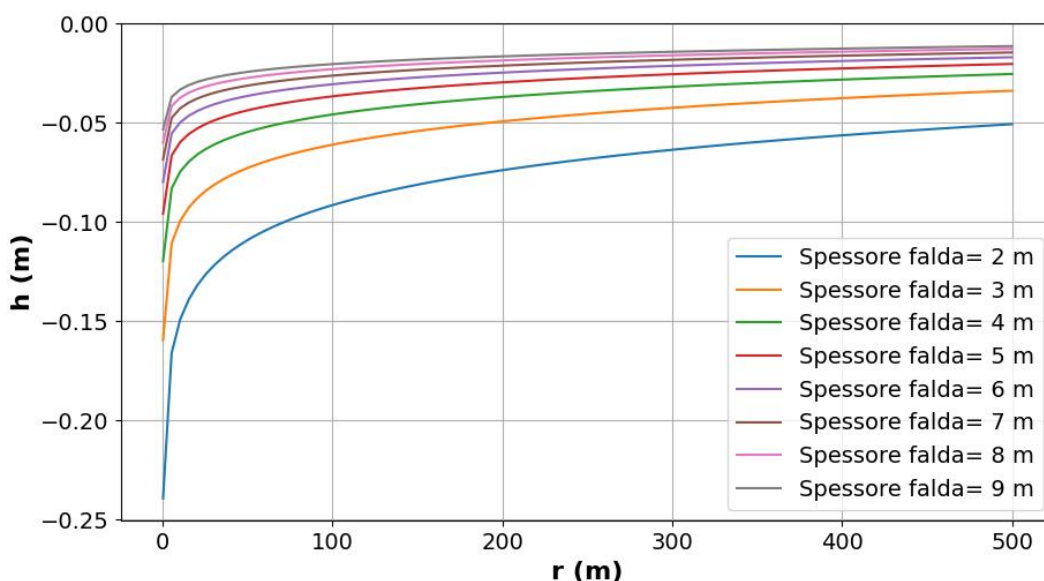


Figura 5-2: Andamento della quota piezometrica al variare della distanza dal pozzo per spessori della falda variabili nel caso di strato permeabile di ghiaia.

L'analisi delle figure mostra che lo spessore, come atteso, incide sull'andamento dell'abbassamento della quota piezometrica della falda.

Si può notare inoltre che l'abbassamento della quota piezometrica è più marcato nei pressi dell'asse del pozzo e tende a diminuire con la distanza rimanendo su valori stimati abbastanza

<sup>7</sup>Di Nucci, C. (2019). Quaderni d'idraulica. Libreria universitaria Benedetti



contenuti. Gli abbassamenti sono dell'ordine della decina di centimetri in corrispondenza dell'asse del pozzo e l'influenza dell'emungimento varia in funzione dello spessore della falda.

Si evince quindi che la configurazione analizzata, seppur in maniera preliminare, rivela che l'emungimento da falde profonde non determina apprezzabili abbassamenti della quota piezometrica della falda artesiana interessata da emungimento.

La figura 5-2 mostra che, in questa configurazione, a distanze maggiori di 70 metri dall'asse del pozzo si hanno abbassamenti inferiori ai dieci centimetri per tutti gli spessori indagati.

Si pone l'attenzione sul fatto che l'abbassamento della quota piezometrica è relativo alla falda e, nel caso di emungimento dalla sola falda confinata (pozzo penetrante) non interessa superfici freatiche superficiali eventualmente presenti.

---

## 6 Osservazioni Conclusive

---

Il presente studio ha riguardato approfondimenti specialistici idrologico-idraulico finalizzati a fornire una valutazione dettagliata delle condizioni idrologiche-idrauliche in relazione al progetto di "riqualificazione e ampliamento dell'attività esistente di itticultura" in località Vignarca, nel Comune di Piombino.

In particolare gli approfondimenti hanno valutato:

- l'influenza dei livelli del mare, e delle condizioni meteo-marine sui livelli idrici che si instaurano all'interno fosso Vignarca in condizioni ordinarie e di magra;
- i fenomeni di diffusione e dispersione delle acque salmastre a carico delle acque scaricate dall'impianto nel del Fosso Maestro del Vignarca;
- l'effetto dell'emungimento dei pozzi sulla falda profonda;

In base alle analisi effettuate ed ai risultati ottenuti i risultati generali dello studio possono essere riassunti come segue:

- L'idrodinamica del Fosso Vignarca è prevalentemente influenzata dai livelli in corrispondenza della costa. Tale evidenza è stata valutata mediante sei scenari di simulazione in cui sono state variate le condizioni al contorno sulla foce e la profondità iniziale del Fosso Vignarca. Il Fosso Acquaviva è sempre stato modellato con un'elevazione della superficie libera pari a 0.50 m s.l.m.
- Lo scarico delle acque provenienti dall'impianto all'interno del Fosso Vignarca non crea delle variazioni significative in termini di estensione delle aree interessate dal deflusso.
- In tutti gli scenari simulati emerge che la connessione idraulica tra il Fosso Vignarca e l'area della Padule Orti-Bottagone permette l'ingressione delle acque nella Padule. Tale evidenza è stata confermata dai rilievi fotografici del 22 e 24 novembre 2023 e conferma che la risalita delle acque nel fosso interessa anche l'area della padule anche in condizioni non estreme.

- La diffusione e dispersione dello scarico di acque all'interno del fosso Vignarca mostra che le acque scaricate tendono a rimanere confinate nei pressi della sorgente nella fase di risalita della marea, per poi defluire verso il mare nella fase decrescente della marea (fase in cui il canale tende a svuotarsi). Inoltre, si evince che le acque scaricate all'interno del Fosso Vignarca (a causa del campo idrodinamico che si instaura all'interno del fosso) non sono trasportate fino all'area della Padule Orti-Bottagone.
- Per quanto riguarda la possibile realizzazione di pozzi, un'analisi preliminare basata sulla cartografia dell'area oggetto di studio ha mostrato che le falde profonde risultano confinate all'interno di strati impermeabili.

E' stato effettuato uno scenario di emungimento variando lo spessore della falda. I risultati mostrano abbassamenti contenuti della quota piezometrica che risultano minori di 10 centimetri a partire da una distanza di circa 70 metri dall'asse del pozzo. Da un punto di vista idraulico l'emungimento da falde confinate non interessa le falde freatiche eventualmente presenti al di sopra di esse e provoca unicamente un abbassamento della quota piezometrica della falda stessa.

