

RAPPORTO

USO RISERVATO APPROVATO B9025640

Cliente Enel Produzione S.p.A.

Oggetto Centrale Termoelettrica di Torrevaldaliga Nord di Civitavecchia (RM).
Progetto di sostituzione delle unità a carbone esistenti con nuove unità a gas.
Allegato E - Studio di dispersione delle acque di raffreddamento.

Ordine Ordine Cliente: attingimento N. 3500036574 del 14.03.2019.

Note Rev. 0 – A1300001827 - Lettera di trasmissione B9014186

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

N. pagine 81 **N. pagine fuori testo** 0

Data 08/01/2019

Elaborato EMS - Dassie Giuseppe Augusto, EMS - Colombo Daniela
B9025640 3800 AUT B9025640 3821 AUT

Verificato EMS - Sala Maurizio
B9025640 3741 VER

Approvato EMS - Granata Tommaso (Project Manager)
B9025640 3744 APP

CESI S.p.A.

Via Rubattino 54
I-20134 Milano - Italy
Tel: +39 02 21251
Fax: +39 02 21255440
e-mail: info@cesi.it
www.cesi.it

Capitale sociale € 8.550.000 interamente versato
C.F. e numero iscrizione Reg. Imprese di Milano 00793580150
P.I. IT00793580150
N. R.E.A. 429222

© Copyright 2020 by CESI. All rights reserved

Indice

SOMMARIO.....	3
1 INTRODUZIONE	6
1.1 Premessa.....	6
1.2 Scopo dello studio.....	7
1.3 Articolazione delle attività.....	7
1.4 Documenti di riferimento.....	7
2 CARATTERIZZAZIONE AMBIENTALE DEL SITO	10
2.1 Premessa.....	10
2.2 Batimetria	10
2.3 Condizioni meteomarine	10
3 ASSETTI DEGLI IMPIANTI DI PRODUZIONE.....	27
3.1 Opere di presa e scarico degli impianti.....	27
3.2 Condizioni di esercizio delle centrali.....	30
4 SCHEMATIZZAZIONE NUMERICA.....	31
4.1 Introduzione	31
4.2 Il modello numerico di simulazione	31
4.3 Schematizzazione numerica	32
5 SCENARI E CONDIZIONI DI CALCOLO	36
6 ANALISI DEI RISULTATI.....	38
6.1 Premessa.....	38
6.2 La valutazione del sovrizzo termico a 1000 m.....	38
6.3 Scenari di calibrazione.....	40
6.3.1 Scenario A (calibrazione estiva)	40
6.3.2 Scenario B (calibrazione invernale)	45
6.3.3 Scenario C (calibrazione primaverile).....	50
6.4 Scenari di previsione	55
6.4.1 Scenario 1: estate, TVN a carbone.....	55
6.4.2 Scenario 2: inverno, TVN a carbone	61
6.4.3 Scenario 3: estate, TVN a gas.....	67
6.4.4 Scenario 4: inverno, TVN a gas	74
7 SINTESI DEI RISULTATI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	80
7.1 Premessa.....	80
7.2 Risultati e considerazioni conclusive	80

STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
0	19/12/2019	B9025640	Prima emissione

SOMMARIO

La centrale termoelettrica di Torrevaldaliga Nord, di proprietà di Enel Produzione S.p.A., si colloca sulla costa laziale nel Comune di Civitavecchia, circa 4 km a Sud di Punta S. Agostino. A Sud si trovano, in successione, l'area industriale occupata dalla Centrale Termoelettrica di Torrevaldaliga Sud, di proprietà di Tirreno Power S.p.A., l'area portuale e l'abitato di Civitavecchia (Figura 1).

La Centrale fu costituita negli anni '80 con quattro sezioni termoelettriche da 660 MW_e ciascuna, alimentate ad olio combustibile denso, per una potenza lorda complessiva massima nominale di 2640 MW_e (potenza elettrica lorda 1980 MW_e). Le unità entrarono in servizio tra ottobre 1984 e giugno 1986. Nel 2002 iniziò il progetto di trasformazione della Centrale che prevedeva il cambiamento del combustibile utilizzato da olio denso a carbone per sole tre unità denominate TV2, TN3 e TN4. Le vecchie unità ad olio combustibile furono messe fuori servizio a partire dal 2005 e dall'agosto 2010 è stato messo a regime l'intero complesso con tre unità.

Il nuovo progetto prevede la realizzazione nell'area di impianto di unità a gas, taglia di circa 1680 MW_e, in sostituzione delle unità esistenti.

L'intervento si articola in tre fasi: le prime due prevedono l'installazione delle unità in ciclo aperto (solo turbina a gas TN1A e TN1B), la terza fase prevede il completamento del ciclo combinato. Le unità a carbone saranno poste fuori servizio all'entrata in esercizio del primo turbogas.

Il nuovo ciclo combinato presenta le caratteristiche tecniche/operative idonee per inserirsi nel contesto energetico nazionale ed europeo, nell'ottica di garantire la continua evoluzione e transizione energetica verso la riduzione della generazione elettrica da fonti maggiormente inquinanti - nell'ottica di trarre gli obiettivi strategici di decarbonizzazione - e temperando la salvaguardia strutturale degli equilibri della rete elettrica. Quanto sopra anche in relazione alla sempre maggiore penetrazione nello scenario elettrico della produzione da FER (fonti di energia rinnovabili), caratterizzate dalla necessità di essere affiancate da sistemi di produzione/tecnologici stabili, efficienti, flessibili e funzionali ad assicurare l'affidabilità del sistema elettrico nazionale.

Il criterio guida del progetto di conversione della centrale è quello di preservare il più possibile la struttura impiantistica esistente e riutilizzare gli impianti ausiliari, migliorando le prestazioni ambientali ed incrementando sostanzialmente l'efficienza energetica. Ove possibile, favorire il recupero dei materiali in una logica di economia circolare.

Il nuovo progetto di costruzione, rispetto alla configurazione attuale autorizzata all'esercizio con decreto di Autorizzazione Integrata Ambientale (A.I.A.) D. M. 284 del 30/09/2019 (Rif. 1), consentirà di:

- ridurre la potenza termica a circa 2.700 MW_t, a fronte di una potenza termica ad oggi installata di 4.260 MW_t;
- diminuire la potenza elettrica di produzione (1680 MW_e contro i 1.980 MW_e attuali) raggiungendo un rendimento elettrico netto superiore al 60%, rispetto all'attuale 44.7% (rendimento di collaudo) e riducendo contestualmente le emissioni di CO₂ di oltre il 62%;
- ottenere una concentrazione di emissioni in atmosfera di NO_x e CO sensibilmente inferiori ai valori attuali;
- azzerare le emissioni di polveri ed SO₂.

Nel Piano di Monitoraggio e Controllo contenuto nel Decreto MATTM n° 114 del 5 aprile 2013, relativo al rinnovo dell'Autorizzazione Integrata Ambientale per l'esercizio dell'impianto, nella sezione 7.2 riguardante il monitoraggio degli scarichi idrici il Ministero prescrive, tra l'altro, che:

"L'incremento di temperatura del corpo recipiente oltre i 1000 metri di distanza dal punto di immissione dello scarico S2 dovrà essere verificato con cadenza semestrale. Tali misure dovranno essere effettuate con tutte e tre le unità produttive al massimo carico, in condizioni di mare calmo ed assenza di vento.

I risultati delle verifiche dovranno essere utilizzati per la taratura di un modello di simulazione per la valutazione del rilascio termico. In caso di variazioni del processo produttivo tale modello verrà utilizzato per una valutazione del rilascio termico nelle nuove condizioni. Il modello da utilizzare dovrà essere proposto dal Gestore, selezionandolo tra quelli attualmente disponibili validati internazionalmente.

Le verifiche dovranno essere effettuate in punti nei quali l'innalzamento di temperatura è direttamente riconducibile all'effetto delle acque di raffreddamento scaricate dalla Centrale, evitando quindi zone nelle quali sia presente una sovrapposizione degli effetti di scarichi termici provenienti da altri impianti industriali."

In tale contesto Enel Produzione ha chiesto a CESI di effettuare lo studio, per mezzo di opportuna modellistica numerica, dei fenomeni di dispersione termica conseguenti ai rilasci delle acque di raffreddamento della centrale di Torrevaldaliga Nord nei due assetti attuale, a carbone, e futuro, a gas.

Lo studio è stato condotto mediante il codice di calcolo MIKE 3 del DHI, *Danish Hydraulic Institute*[®] (Rif. 2 e Rif. 3); si tratta di un codice commerciale validato internazionalmente che simula le correnti a pelo libero con dettaglio tridimensionale. Nello specifico è stato implementato il modulo HD (idrodinamico), per la rappresentazione tridimensionale di flussi di correnti e di trasporto del calore. L'approccio tridimensionale al problema è derivato dalla complessità del sistema e delle variabili in gioco, e dalla conseguente necessità di simulare le correnti e la dispersione della perturbazione termica generata dallo scarico delle acque di raffreddamento della centrale.

La messa a punto e la taratura del modello sono stati oggetto di un precedente studio condotto da CESI per conto di Enel Produzione PP TN (Rif. 5).

Il presente rapporto riprende, per completezza, la fase di taratura del modello di cui al precedente studio CESI e descrive l'insieme delle analisi condotte avvalendosi sia dei risultati delle periodiche campagne di misura della perturbazione termica indotta dal

funzionamento della centrale, sia dell'esito di opportune simulazioni numeriche che hanno riprodotto lo scarico caldo della centrale nel corpo idrico ricevente, il mare Tirreno, in condizioni ambientali e di assetto d'impianto scelte tra le più frequenti e/o conservative rispetto alle tematiche in oggetto.

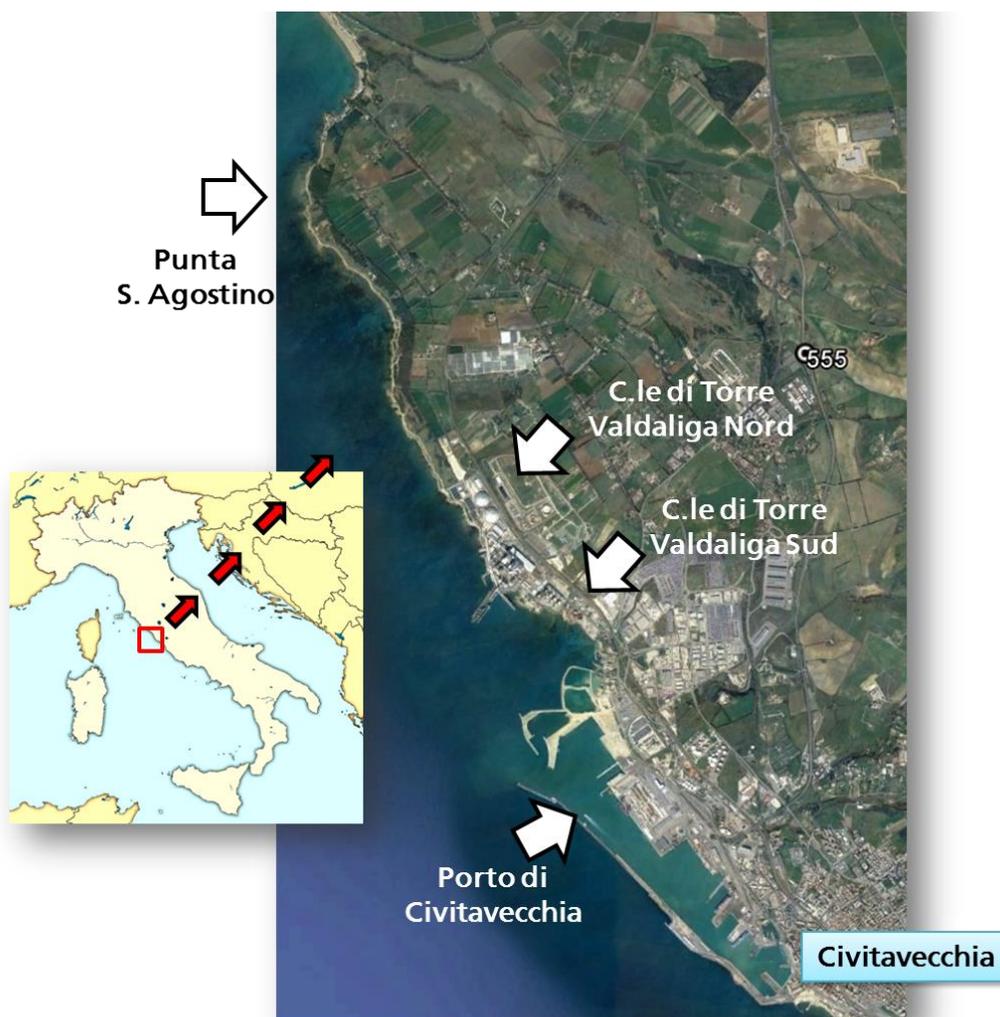


Figura 1 Inquadramento generale dell'area in esame (foto satellitare da Rif. 4)

1 INTRODUZIONE

1.1 Premessa

La centrale termoelettrica di Torrevaldaliga Nord, di proprietà di Enel Produzione S.p.A., è costituita da tre gruppi a carbone da 660 MWe (potenza lorda nominale) entrati in servizio a regime nell'anno 2010. Per il ciclo di condensazione e raffreddamento, l'impianto utilizza acqua prelevata dal mare Tirreno nella misura massima di 24.5 m³/s per ciascuno dei tre gruppi. Il nuovo progetto prevede la realizzazione nell'area di impianto di unità a gas, taglia di circa 1680 MWe, in sostituzione delle esistenti.

La configurazione prevista in sostituzione ai gruppi a carbone è costituita da due turbine a gas, due caldaie a recupero e una turbina a vapore. In caso di funzionamento nominale al massimo carico del gruppo, la portata totale prelevata e scaricata per il raffreddamento condensatore è di 24.5 m³/s a cui si aggiunge la portata di 1.4 m³/s per il raffreddamento degli elementi ausiliari, per un totale di 25.9 m³/s.

La vicina centrale termoelettrica di Torrevaldaliga Sud, di proprietà di Tirreno Power S.p.A., è costituita da due unità a ciclo combinato, una da 800 MWe (TV5) e una 400 MWe (TV6) che utilizzano turbogas alimentati esclusivamente a gas naturale. Anche per questo impianto l'acqua di raffreddamento per il ciclo termico è prelevata dal mare Tirreno attraverso due opere di presa e restituita a mare attraverso due diffusori di scarico.

La Figura 2 indica la posizione delle opere di presa/scarico dei due impianti e del pontile di attracco delle navi carboniere a servizio della centrale di Torrevaldaliga Nord. Questo costituisce un elemento di separazione tra le aree di presa/scarico dei due impianti termoelettrici; è possibile, tuttavia, che in determinate condizioni meteo-marine si venga a creare un'interferenza tra le perturbazioni termiche indotte dallo scarico delle acque di raffreddamento dei due impianti di produzione.



Figura 2 Localizzazione delle opere di presa e di scarico degli impianti di Torrevaldaliga Nord (Enel Produzione) e Sud (Tirreno Power) (foto satellitare da Rif. 4)

1.2 Scopo dello studio

Lo studio ha inteso valutare la dispersione termica del pennacchio caldo costituito dalle acque di raffreddamento provenienti dai condensatori e rilasciate all'opera di scarico della centrale termoelettrica di Torrevaldaliga Nord nell'assetto attuale di funzionamento e in quello futuro a gas naturale. La verifica, condotta mediante l'applicazione di opportuna modellistica numerica tridimensionale, risponde alla prescrizione vigente per l'impianto secondo cui ad ogni variazione del processo produttivo deve essere eseguita una valutazione del rilascio termico nelle nuove condizioni mediante un modello numerico appositamente predisposto e tarato attraverso le misure raccolte nei periodici monitoraggi termici a mare.

In considerazione delle possibili interferenze con lo scarico caldo rilasciato dalla vicina centrale di Torrevaldaliga Sud, le verifiche numeriche sono state condotte con l'impianto Enel ipotizzato funzionante insieme ad essa.

L'analisi ha consentito di individuare la configurazione, l'estensione e la profondità dei pennacchi caldi generati dalle restituzioni delle acque di raffreddamento necessarie al funzionamento delle due centrali, con l'intento di verificare il rispetto dei limiti di legge e la valutazione degli eventuali ricircoli termici alla presa dell'impianto in oggetto nei due assetti attuale, a carbone, e futuro, a gas.

1.3 Articolazione delle attività

Lo studio è stato articolato nelle fasi di seguito riportate:

1. caratterizzazione ambientale del sito oggetto di studio (capitolo 2) e degli impianti di produzione termoelettrica (capitolo 3); i dati raccolti hanno consentito la definizione dell'insieme dei parametri ambientali, strutturali e di esercizio che influenzano il campo idrodinamico e termico nell'area;
2. definizione, attraverso il codice di calcolo MIKE 3 ver. 2019, del dominio di calcolo, della discretizzazione spaziale dell'area nella configurazione delle opere a mare riscontrabile alla data dell'esecuzione dello studio e delle condizioni al contorno, così come descritto all'interno del capitolo 4;
3. scelta e definizione finale degli scenari complessivamente indagati (capitolo 5) ed esecuzione delle simulazioni numeriche;
4. elaborazione dei risultati ottenuti e predisposizione del rapporto tecnico conclusivo; la disamina dei risultati delle simulazioni è contenuta nel capitolo 6, mentre le considerazioni conclusive derivanti dallo studio sono oggetto del capitolo 7.

1.4 Documenti di riferimento

- Rif. 1 Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. D. M. 284 del 30/09/2019.
- Rif. 2 MIKE by DHI (2016). "MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM. Hydrodynamic and Transport Module. Scientific documentation."
- Rif. 3 MIKE by DHI (2014). "Coast & Sea. Hydrodynamic modelling. MIKE 3. User Guide."
- Rif. 4 mapsgoogle.it

- Rif. 5 Rapporto CESI. "Centrale di Torrevaldaliga Nord. Predisposizione e taratura di un modello numerico di simulazione della dispersione del rilascio termico." Prot. B9018209 del 30/9/2019.
- Rif. 6 Istituto Idrografico della Marina (IIM). Carta nautica N° 6. "Mar Tirreno-Italia. Dal promontorio Argentario a Capo Linaro." Scala 1:100000
- Rif. 7 <http://www.mareografico.it/>
- Rif. 8 <http://marine.copernicus.eu/>
- Rif. 9 IIM, Istituto Idrografico della Marina "Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani." II306B, Genova 1982
- Rif. 10 SI-869/88 "Montalto di Castro. Misure correntometriche. Campagna 1987." Relazione Servizio Idrologico SI-869, marzo 1988
- Rif. 11 SI-878/88 "Montalto di Castro. Misure correntometriche. Periodo: 29 luglio – 11 dicembre 1986." Relazione Servizio Idrologico SI-878, maggio 1988
- Rif. 12 SI-909/89 "Utilizzo del modello di Elliott per la simulazione della componente "long-shore" nel tratto di mare antistante Montalto di Castro." Relazione Servizio Idrologico SI-909, febbraio 1989
- Rif. 13 SI-916/89 "I Campagna di idrografia marina nell'area costiera di Montalto di Castro (20 febbraio – 28 marzo 1988)." Relazione Servizio Idrologico SI-916, marzo 1989
- Rif. 14 SI-918/89 "II Campagna di idrografia marina nell'area costiera di Montalto di Castro (21 maggio – 21 giugno 1988)" Relazione Servizio Idrologico SI-918, marzo 1989
- Rif. 15 SI-923/89 "III Campagna di idrografia marina nell'area costiera di Montalto di Castro (18 agosto – 20 settembre 1989)." Relazione Servizio Idrologico SI-923, giugno 1989
- Rif. 16 SI-927/89 "IV Campagna di idrografia marina nell'area costiera di Montalto di Castro (13 novembre – 18 dicembre 1988." Relazione Servizio Idrologico SI-927, luglio 1989
- Rif. 17 SI-1063/92 "Elaborazione ed analisi critica dei rilievi di idrografia marina effettuati nell'area costiera di Montalto di Castro dal 21 maggio al 21 giugno 1988." Relazione Servizio Idrologico SI-1063, giugno 1992
- Rif. 18 IS-E-5946.20 "Centrale termoelettrica di Montalto di Castro. Opere civili marittime del terminale GNL. Indagini e Studi. Studi meteomarini. Rapporto conclusivo." Relazione ISMES: 5946.20-IS-E, agosto 1992
- Rif. 19 SI-1077/92 "Centrale termoelettrica di Montalto di Castro. Analisi dei dati di corrente e di temperatura rilevati nell'area di mare circostante le opere di restituzione a mare dell'acqua di raffreddamento." Relazione Servizio Idrologico SI-1077, novembre 1992
- Rif. 20 Enel Compartimento di Roma. Centro progettazione e costruzioni termoelettriche. "Centrale termoelettrica di Torrevaldaliga 3°. Opera di scarico." Scala 1:100. 16.VI.1967
- Rif. 21 Mantelli Estero. Costruzioni S.p.A. "Centrale termoelettrica di Torrevaldaliga. Opera di presa acqua di mare. 3° e 4° Sezione." Disegno esecutivo. Pianta e profilo longitudinale. Dis. N° 51733. Scala 1:200. 28.4.1967
- Rif. 22 MIKE by DHI (2016). "MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM. Hydrodynamic and Transport Module. Scientific documentation."
- Rif. 23 DLgs 152/06, "Norme in materia ambientale", 3 aprile 2006 n.152 (Suppl. ordinario gazz. Uff. n. 88 del 14/04/2006)
- Rif. 24 Metodica APAT_IRSA-CNR "Metodi analitici per le acque. Volume 1. Sezione 2100_Temperatur" APAT Manuali e linee guida, 29/2003

- Rif. 25 Notiziario IRSA. *"Metodi analitici per le acque: Metodologie per la determinazione dell'incremento di temperatura nelle acque marine a seguito di sversamenti di scarichi termici."* n. 4, Ottobre – Dic. 1993
- Rif. 26 Comunicazione E-mail da Ing. A. Brizzi del 31 gennaio 2019

2 CARATTERIZZAZIONE AMBIENTALE DEL SITO

2.1 Premessa

La dispersione in mare delle acque di raffreddamento di impianti produttivi è condizionata sia dalle caratteristiche del rilascio, sia dalle condizioni idrauliche e ambientali del corpo idrico ricevente. Attraverso la raccolta e l'analisi dei dati caratteristici del sito e degli impianti da cui provengono gli scarichi a mare, è dunque necessario individuare le condizioni di simulazione più adatte allo scopo dello studio.

La raccolta e l'analisi dei dati fa riferimento a quelli riguardanti:

- la configurazione dei corpi idrici: batimetria e opere eventualmente presenti (nello specifico, per esempio, opere portuali);
- le condizioni meteo-marine dell'area;
- l'assetto di esercizio degli impianti da cui provengono gli scarichi, necessario per la quantificazione degli stessi.

Nel presente capitolo si analizzeranno in dettaglio le prime due tipologie di dati allo scopo di definire correttamente gli scenari di analisi. Il capitolo successivo analizzerà in dettaglio la caratterizzazione delle opere di presa e di scarico presenti nell'area di studio.

2.2 Batimetria

Il modello matematico tridimensionale implementato nel codice MIKE 3 del DHI (*Danish Hydraulic Institute* ®) nella versione *Flexible Mesh* utilizza un reticolo di calcolo a maglia triangolare; ad ogni cella del dominio è associata una quota del fondo interpolata sulla base dei dati topo - batimetrici disponibili. Il punto di partenza per la predisposizione del reticolo di calcolo è, dunque, la ricostruzione degli andamenti della batimetria dell'area e della topografia costiera (linea di costa).

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area d'interesse ci si è avvalsi di dati già in possesso di CESI utilizzati per studi recenti condotti nella medesima area di studio. I rilievi hanno consentito di definire gli andamenti dei fondali antistanti alle due centrali con elevato dettaglio, in particolare, per l'area a Sud del pontile carboni.

Per le aree del dominio di calcolo non coperte da rilievi batimetrici recenti, ci si è avvalsi della cartografia nautica disponibile (Rif. 6). Nelle aree più distanti, anche in direzione *off-shore*, da quelle in cui si sviluppano i fenomeni più significativi, peraltro, il diminuito livello di dettaglio delle batimetrie ricavabili dalla cartografia nautica è comunque più che sufficiente agli scopi dello studio.

La massima profondità simulata nel dominio di calcolo è stata scelta pari a 70 m, più che sufficiente per la corretta rappresentazione dei fenomeni allo studio.

2.3 Condizioni meteomarine

I dati relativi alle condizioni del mare hanno lo scopo di fornire tutte le informazioni atte a definire le condizioni del corpo idrico ricevente ed a verificare quali sono le condizioni più critiche ai fini dello scarico delle acque di raffreddamento. Le condizioni del mare che debbono essere prese in considerazione per una corretta simulazione numerica sono essenzialmente:

- l'intensità e la direzione della corrente ambientale,
- la temperatura e la salinità dell'acqua di mare,
- le oscillazioni di marea.

Analogamente, i dati meteorologici necessari allo studio fanno riferimento in particolare alle condizioni di temperatura e vento nei bassi strati dell'atmosfera, rilevati in prossimità del sito; essi vengono considerati allo scopo di valutare correttamente lo scambio termico con l'atmosfera e l'eventuale correlazione presente con l'andamento delle correnti, nelle varie stagioni e condizioni climatiche.

Corrente marina

La **corrente marina** è senza dubbio da considerare tra le forzanti capaci di influenzare in maniera significativa l'evoluzione del pennacchio termico. Esistono diverse tipologie di correnti: correnti di circolazione generale o di densità, di vento, di marea e correnti legate al moto ondoso frangente. Nel presente studio, focalizzato sull'analisi di condizioni di mare calmo e di livello medio (come indicato anche dal Piano di Monitoraggio e Controllo), non sono state conseguentemente considerate né le correnti legate al moto ondoso frangente, né quelle di marea. Le correnti di deriva, prodotte dall'azione del vento sulla superficie liquida, sono automaticamente simulate dal codice di calcolo in base all'intensità e alla direzione del vento eventualmente presente.

Tutti gli scenari di calcolo, invece, hanno simulato una corrente di circolazione generale applicata con opportuna intensità e direzione al perimetro Sud del dominio di calcolo. La Figura 3 mostra l'andamento delle correnti superficiali al largo del sito in esame (oltre le 5 miglia) da cui si evince la presenza di una corrente di risalita da Sud-Est verso Nord-Ovest compresa nel vortice stazionario presente nel Tirreno settentrionale ad Est di Corsica e Sardegna. In prossimità della riva la corrente subisce, tra gli altri, gli effetti indotti dal fondale decrescente e dalle opere (si pensi, per esempio, alla diga foranea del porto di Civitavecchia o al molo di attracco delle carboniere a servizio della centrale) che ne possono modificare radicalmente verso e intensità.

Inoltre, al campo di moto naturalmente presente al largo del sito si sommano, nell'area più prossima ai diffusori delle centrali, quelli generati dai rilasci delle acque di raffreddamento. Nell'ipotesi di funzionamento a pieno carico degli impianti, in prossimità degli scarichi delle centrali alla estremità *offshore* dei diffusori, la velocità del flusso supera 1 m/s. La velocità dei getti di scarico diminuisce rapidamente allontanandosi dalle bocche di scarico, quando il pennacchio si allarga e, rallentando, può risentire maggiormente dell'effetto della corrente naturale.

Nell'ambito della realizzazione delle opere a mare della centrale di Montalto di Castro, tra il 1973 e il 1988 Enel ha condotto diverse campagne oceanografiche e correntometriche nell'area marina più prossima a riva compresa tra Capo Linaro, circa 9 km a Sud del porto di Civitavecchia, e l'Argentario, circa 45 km a Nord della centrale di Torrevaldaliga Nord (da Rif. 10 a Rif. 19). L'analisi dei dati correntometrici raccolti durante le varie campagne ha evidenziato una dinamica prevalentemente *long-shore*. L'idrodinamica dell'area in esame è influenzata soprattutto dai profili topobatimetrici. In particolare, le correnti risultano deboli e prevalentemente parallele alla costa, l'influenza delle maree trascurabile. Di fatto la correlazione tra il vento (registrato contemporaneamente alla misura delle correnti nelle varie campagne descritte) è evidente solo per la direzione normale alla costa, mentre le prevalenti correnti parallele alla spiaggia sono legate soprattutto alla circolazione generale dovuta alla differenza di densità dell'acqua nel Mediterraneo.

I dati raccolti mostrano che l'idrodinamica nel tratto di mare in esame è caratterizzata da correnti deboli che vanno generalmente da 1 a 30 cm/s, le cui direzioni interessano prevalentemente il II e IV quadrante; in particolare i contributi nei diversi quadranti si addensano attorno ad assi preferenziali paralleli o perpendicolari alla costa.

Analizzando la distribuzione delle direzioni preferenziali alle diverse quote si è osservato che la corrente subisce una rotazione verso ovest a mano a mano che dalla superficie si scende verso il fondo. Per quanto riguarda la corrente superficiale essa risulta distribuita in modo abbastanza omogeneo sia come direzione sia come intensità e mostra una tendenza a disporsi parallelamente alla costa con intensità massime (circa 30 cm/s) nella prima metà dell'estate e nel primo autunno. La corrente sul fondo presenta una componente parallela ed una perpendicolare all'isobata -50 m: la prima è massima nel periodo primaverile, mentre la seconda prevale in quello autunnale. La distribuzione della corrente a 10 m dal fondo testimonia una uniformità tra il comportamento della corrente superficiale e di quella sul fondo.

Analoghe caratteristiche della corrente più prossima a riva sono state riscontrate anche dall'analisi dei profili di corrente misurati dal profilatore acustico (*ADCP Acoustic Doppler Current Profiler*) collocato in prossimità del pontile carboni della centrale di Torvaldaliga Nord al fine di garantire la sicurezza delle operazioni di ormeggio-scarico-disormeggio delle navi carboniere a servizio dell'impianto termoelettrico.

Si sono individuati due assi direzionali privilegiati per le correnti naturali registrate alle varie profondità dalla stazione correntometrica: si tratta delle direzioni all'incirca parallela e perpendicolare alla linea di riva. È lungo tali direzioni che, alle varie profondità, si allineano con maggiore frequenza le correnti misurate i cui versi di propagazione si alternano tra i quadranti a Nord (I e IV) e quelli a Sud (II e III). In generale, le maggiori velocità della corrente sono riscontrabili nei metri superficiali della colonna d'acqua (i primi due metri per le prime ore della mattina); alle maggiori velocità sono associate direzioni di propagazione stabili, generalmente verso i quadranti settentrionali, in particolare verso Nord-Ovest.

Alla luce dei risultati delle varie campagne di misura della corrente e della dislocazione del pennacchio termico osservata a 1000 m nei giorni di monitoraggio termico scelti per la taratura estiva (19 luglio 2017) e invernale (16 febbraio 2017) è stato individuato il profilo di velocità illustrato in Figura 4. Al profilo, applicato ad entrambi gli *scenari di taratura*, è stata associata una direzione di propagazione costante lungo tutta la colonna d'acqua al fine di riprodurre una corrente entrante dal contorno Sud del dominio di calcolo in movimento verso Nord-Ovest (direz. = -32.3 °N) parallelamente alla costa. Le velocità della corrente negli strati più bassi (a profondità > di 20 m) sono state mantenute costanti e pari alla velocità a -20 m di 0.03 m/s. Il profilo di velocità della corrente di Figura 4, inoltre, è stato adottato anche per gli *scenari previsionali*.

Un terzo scenario di taratura ha riprodotto le condizioni riscontrate durante la campagna di monitoraggio termico eseguita il giorno 17 aprile 2013. Le misure hanno evidenziato una chiara deviazione verso Sud-Est del pennacchio, probabilmente a seguito della combinazione dell'assetto di funzionamento non a pieno carico della centrale di Torvaldaliga Nord (funzionante al 60% circa della potenza nominale con una portata calda scaricata anch'essa ridotta al 61% circa della massima nominale) e di una corrente discendente verso il II quadrante (Sud-Est). La corrente che ha riprodotto la deviazione del pennacchio registrata ad aprile 2013 è debole (5 cm/s) e costante lungo tutta la profondità.

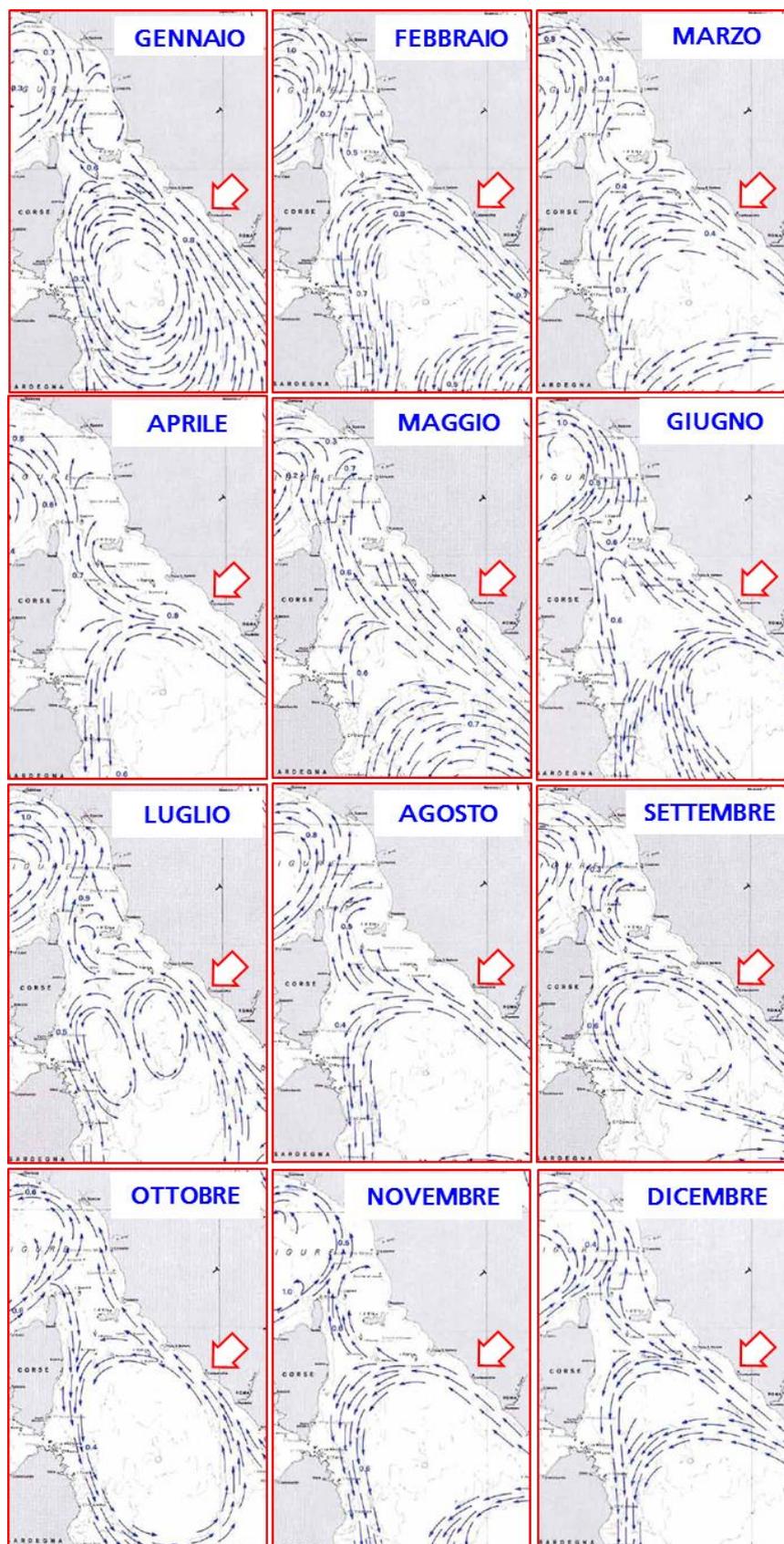


Figura 3 Circolazione superficiale al largo del perimetro costiero in esame (Rif. 9)

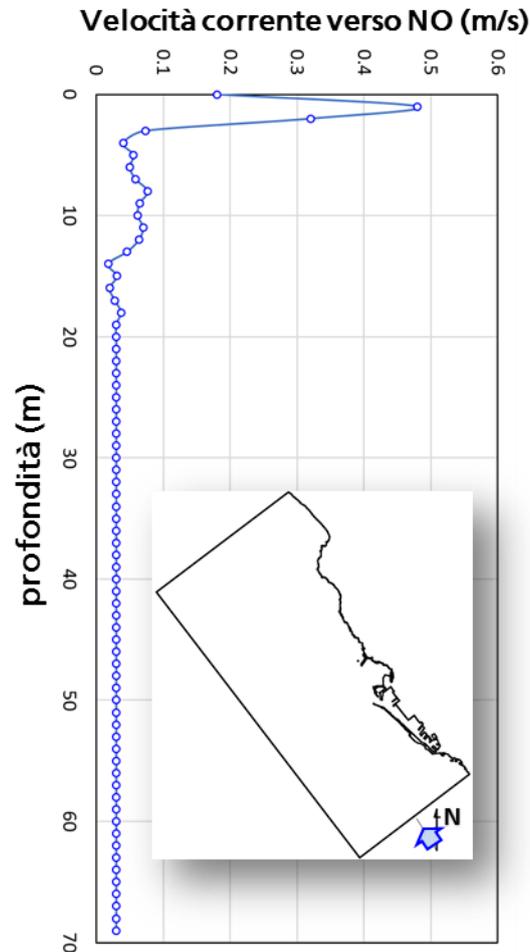


Figura 4 Profilo di velocità della corrente: entrante dal contorno Sud del dominio di calcolo; direzione della corrente: Nord-Ovest (-32.3 °N).

Temperatura dell'acqua

La **temperatura** indisturbata del mare nell'area in esame è stata analizzata con riferimento a rilievi puntuali e lungo profili verticali. La prima analisi ha considerato sia le misure della stazione di Civitavecchia appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (RMN, Rif. 7), sia le registrazioni in ingresso alle casse dei condensatori, rappresentative della temperatura dell'acqua di mare che, prelevata in profondità, giunge ai condensatori attraverso i canali di adduzione sommersi che partono dai torrini di presa illustrati in Figura 2. Le serie di dati disponibili hanno riguardato il periodo 2010-2017, completamente coperto per le misure della stazione di centrale e mancante degli anni 2012 e 2013 per la stazione della RMN. Si tratta di serie sufficientemente prolungate della temperatura che, pur riferendosi a punti fissi (in centrale e in un'area piuttosto confinata all'interno del porto di Civitavecchia), hanno consentito di ricavare la statistica stagionale contenuta in Tabella 1.

Tabella 1 Temperature medie stagionali (°C) misurate alla stazione RMN di Civitavecchia e in ingresso ai condensatori.

Stazione di misura	inverno	primavera	estate	autunno
RMN <i>Periodo 2010-2011 e 2014-2017</i>	17.2	18.3	21.3	20.4
Ingresso Condensatori <i>Periodo 2010-2017</i>	14.3	17.6	22.7	19.0

La Figura 5 mostra gli andamenti delle misure alle due stazioni negli anni più recenti e la localizzazione della stazione della RMN in prossimità della Calata della Rocca nel porto di Civitavecchia.

Le diversità delle temperature riscontrabili in figura sono con ogni probabilità imputabili alla diversa posizione plano-altimetrica delle due stazioni. In particolare, grazie alla profondità delle bocche di presa (tra -8.5 e -13 m dal l.m.m.) dovuta alla notevole distanza da riva dei torrioni, durante i mesi più freddi, dunque in assenza di qualsiasi stratificazione termica della colonna d'acqua come si mostrerà nel seguito, si osserva che la temperatura dell'acqua in ingresso ai condensatori è sistematicamente inferiore a quella registrata dalla stazione della RMN; tale circostanza è sinteticamente confermata dalla media delle temperature invernali registrate in ingresso ai condensatori, inferiore di circa 3 °C a quella della stazione della RMN.

Durante i mesi centrali e più caldi dell'anno, invece, la temperatura dell'acqua di raffreddamento proveniente dalle prese sommerse della centrale risente di marcate oscillazioni probabilmente riconducibili alle condizioni atmosferiche e alla stratificazione termica che caratterizza in questo periodo i primi metri della colonna d'acqua arrivando talvolta a raggiungere anche la profondità di presa.

Le serie di misure fin qui descritte hanno consentito di caratterizzare la temperatura dell'acqua mare con riferimento a due punti nell'area di interesse distanti tra loro oltre 4 km e con sensori a differenti profondità. Il codice di calcolo tridimensionale qui utilizzato, però, consente di definire la temperatura del corpo idrico alle diverse profondità del dominio di calcolo simulato. In sostanza, previa disponibilità di misure sito-specifiche, il codice consente di fornire dei profili per caratterizzare la temperatura del corpo idrico.

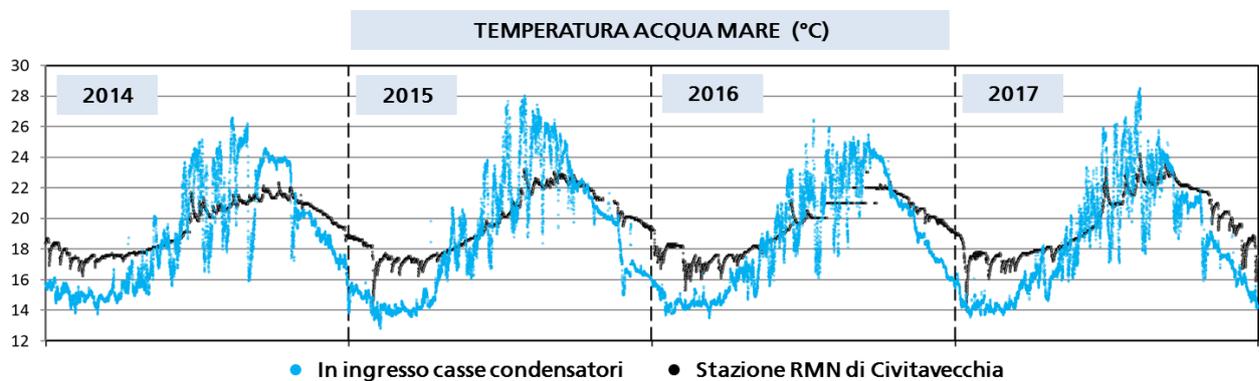


Figura 5 In alto: posizione della stazione di Civitavecchia della Rete Mareografica Nazionale, RMN; in basso: temperatura dell'acqua di mare misurata tra il 2014 e il 2017 alle due stazioni RMN (Rif. 7) e in ingresso ai condensatori della centrale

Nel caso specifico ci si è potuti avvalere delle campagne di misura eseguite nell'ambito del Piano di Monitoraggio del tratto di mare antistante alla centrale di Torrevaldaliga Nord prescritto dal Decreto di Autorizzazione alla conversione a carbone dell'impianto emesso dal Ministero dello Sviluppo Economico 55/02/2003 del 24.12.2003. L'attuazione del Piano consentì l'investigazione di una serie di parametri tra cui, appunto, la temperatura.

Le misure riguardarono, tra l'altro, il rilievo dei profili termici in 12 stazioni distribuite su 4 transetti trasversali alla riva. Le stazioni collocate su ciascun transetto si trovavano a distanze da riva di circa 500 m (stazioni A_1, B_1, D_1 e E_1), 1000 m (stazioni A_2, B_2, D_2 e E_2) e 2000 m (stazioni A_3, B_3, D_3 e E_3).

Le figure che seguono illustrano i profili termici misurati alle dodici stazioni nelle campagne invernali (Figura 6 e Figura 7 per gli inverni 2010 e 2011) e in quelle estive (Figura 8 e Figura 9 per le estati 2010 e 2011). I profili sono raggruppati in funzione della distanza da riva (i tre grafici in alto) e con riferimento distinto ai diversi transetti (i quattro grafici in basso).

L'analisi complessiva dei profili evidenzia:

- la mancanza di stratificazioni termiche nei **rilievi invernali** che mostrano minime escursioni tra le temperature superficiali e quelle profonde indipendentemente dalla posizione più o meno prossima a riva dei transetti di misura; si osserva, in particolare, che le stazioni del transetto A risultano più fredde delle corrispondenti stazioni degli altri transetti, anche se con differenze massime dell'ordine del grado;
- le temperature misurate durante i **rilievi estivi** evidenziano una (attesa) stratificazione termica con temperature medie nei primi metri della colonna d'acqua

maggiori di quelle degli strati più profondi a seguito del riscaldamento solare; il gradiente termico assume valori superiori ai 5 °C tipici del termoclino estivo.

L'analisi dei profili evidenzia che le temperature si mantengono generalmente omogenee per tutti i quattro transetti esaminati lungo la costa evidenziando una stratificazione termica verticale coerente con la stagione estiva.

La Figura 10 illustra i profili di temperatura stagionali tipici del sito adottati per le *simulazioni numeriche previsionali*, ricavati dall'insieme delle misure disponibili per quell'area appena descritte. In considerazione del particolare andamento delle correnti al largo del sito in esame, generalmente dirette da Sud-Est verso Nord-Ovest (come descritto in precedenza), la scelta dei profili è ricaduta su quelli misurati al transetto più a Sud (E) rappresentativi della temperatura di una generica corrente "entrante" attraverso il contorno Sud. Secondo un approccio conservativo per le tematiche in oggetto, per il profilo estivo si è fatto riferimento alla media delle misure eseguite al transetto E nell'estate 2010, più calda di quella dell'anno successivo.

Per quanto concerne, invece, i profili di temperatura adottati per gli *scenari di calibrazione*, che hanno riprodotto, come già indicato, le condizioni di tre campagne di misura (una estiva, il 17 luglio 2017, una primaverile, il 17 aprile 2013 e una invernale, il 16 febbraio 2017) sono stati utilizzati sia i profili di temperatura ricavati dal *database* europeo COPERNICUS (Rif. 8) per quelle stesse giornate nell'ora dei rilievi termici sull'arco a 1000 m, sia le misure dirette delle temperature superficiali ai punti di controllo più a Sud o più a Nord dell'arco (per correnti dirette verso Nord e verso Sud, rispettivamente), che, in base alla dislocazione del pennacchio Enel (deviato verso Nord Ovest dalla corrente ambientale a luglio e a febbraio, e verso Sud Est ad aprile) e alle informazioni relative al funzionamento dell'impianto di Torre Valdaliga Sud (spento il 16 febbraio e funzionante al minimo il 19 luglio), appaiono non disturbati dalle acque calde rilasciate dalle centrali e, dunque, ancora rappresentativi della temperatura della corrente ambientale entrante dal contorno Sud o dal contorno Nord. La Figura 11 mostra i profili di temperatura forniti in *input* al codice di calcolo per gli scenari di calibrazione.

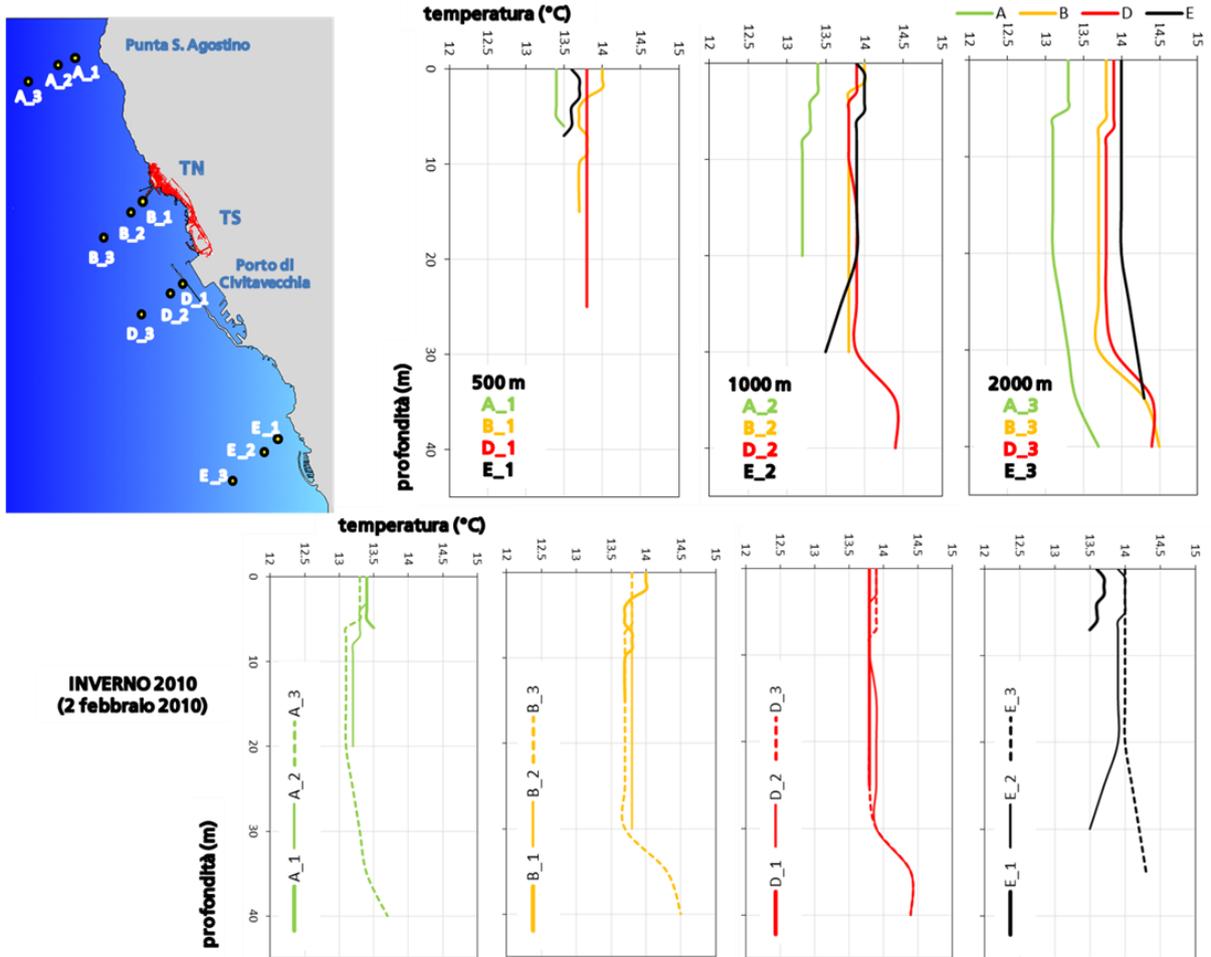


Figura 6 Profili di temperatura misurati in 3 punti (a distanza crescente dalla costa) di 4 transetti trasversali alla riva del sito in esame il 2 febbraio 2010 (misure CESI per Enel)

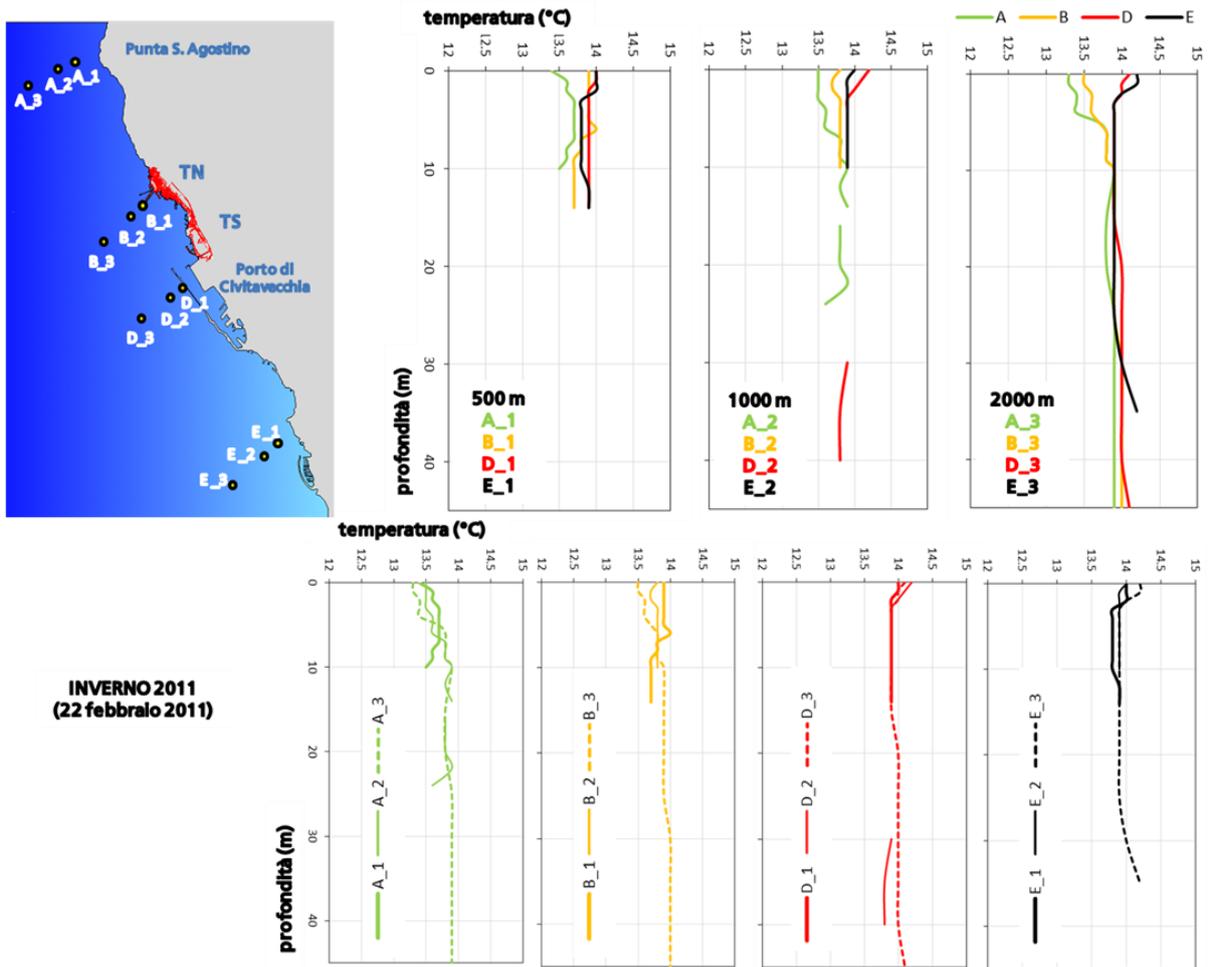


Figura 7 Profili di temperatura misurati in 3 punti (a distanza crescente dalla costa) di 4 transetti trasversali alla riva del sito in esame il 22 febbraio 2011 (misure CESI per Enel)

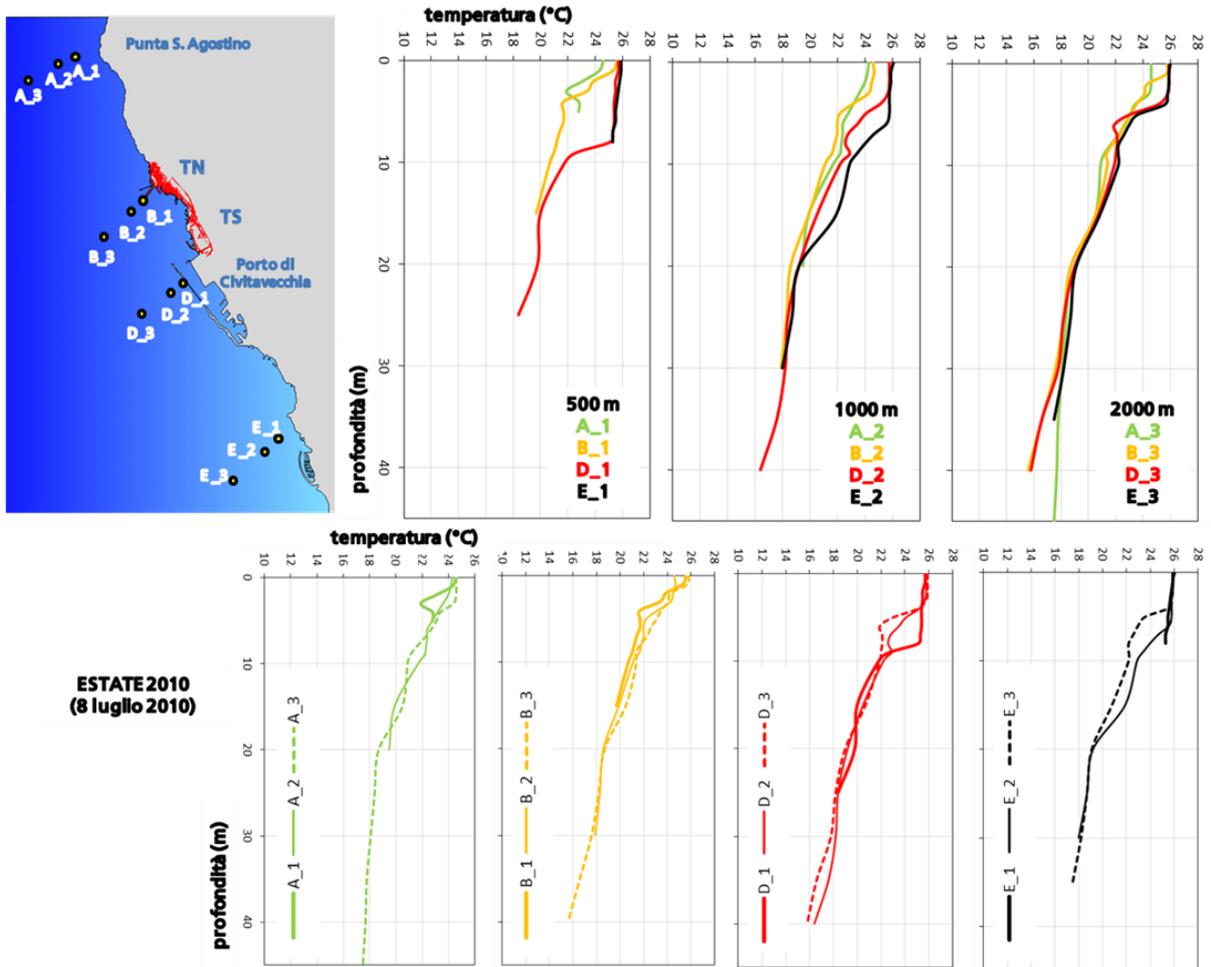


Figura 8 Profili di temperatura misurati in 3 punti (a distanza crescente dalla costa) di 4 transetti trasversali alla riva del sito in esame l'8 luglio 2010 (misure CESI per Enel)

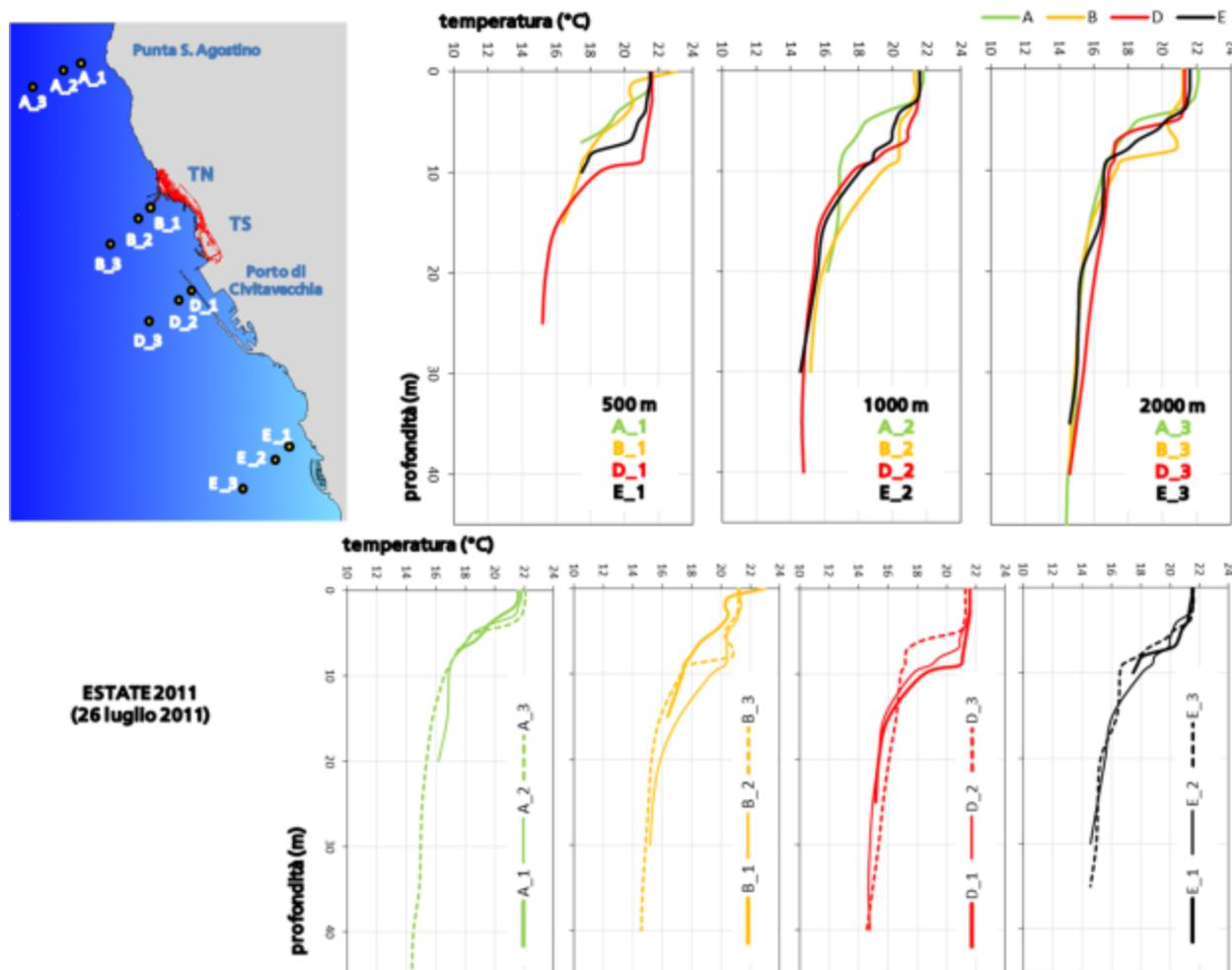


Figura 9 Profili di temperatura misurati in 3 punti (a distanza crescente dalla costa) di 4 transetti trasversali alla riva del sito in esame il 26 luglio dell'anno 2011 (misure CESI per Enel)

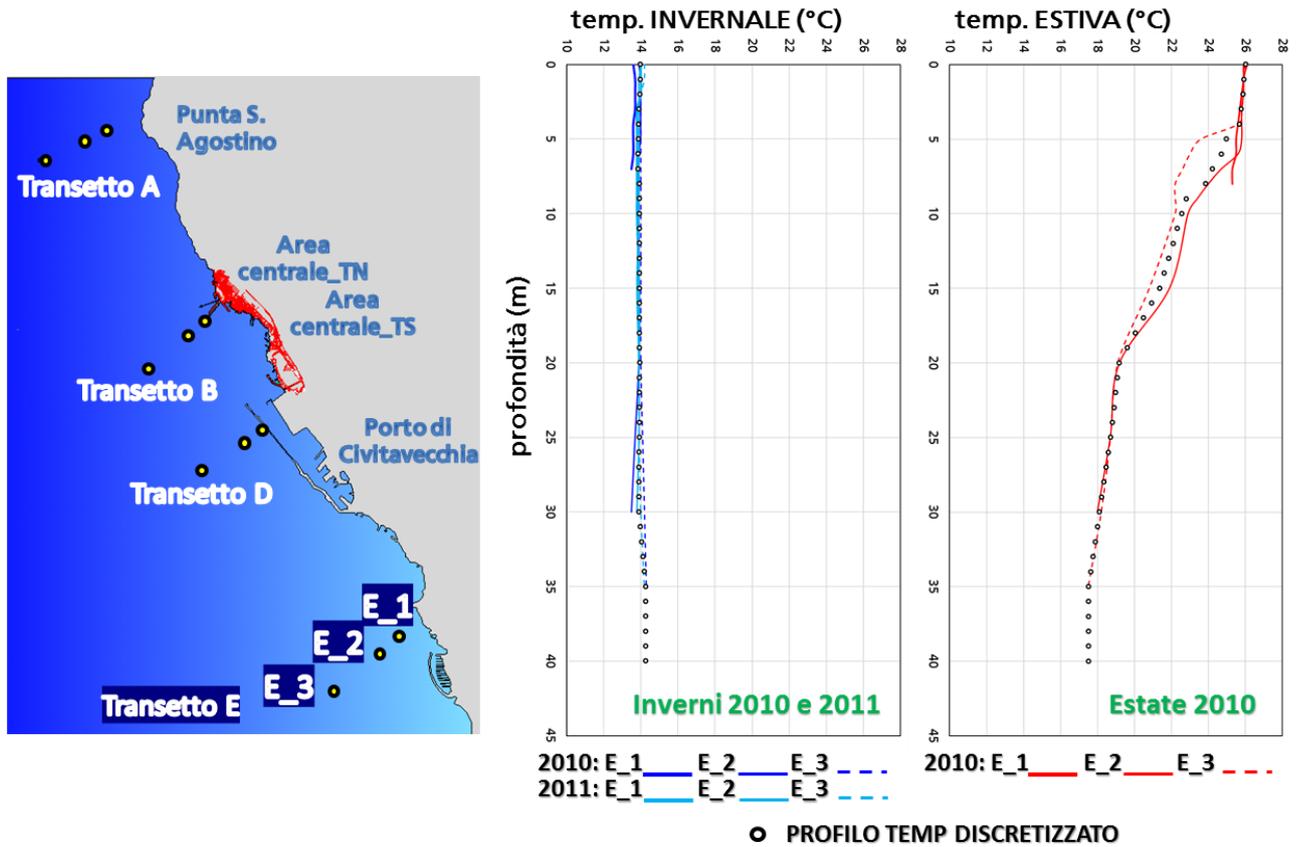


Figura 10 Profili di temperatura invernale (a sinistra) ed estivo (a destra) utilizzati per gli *scenari previsionali* (profilo discretizzato) ricavati dall'insieme delle misure complessivamente disponibili al transetto E

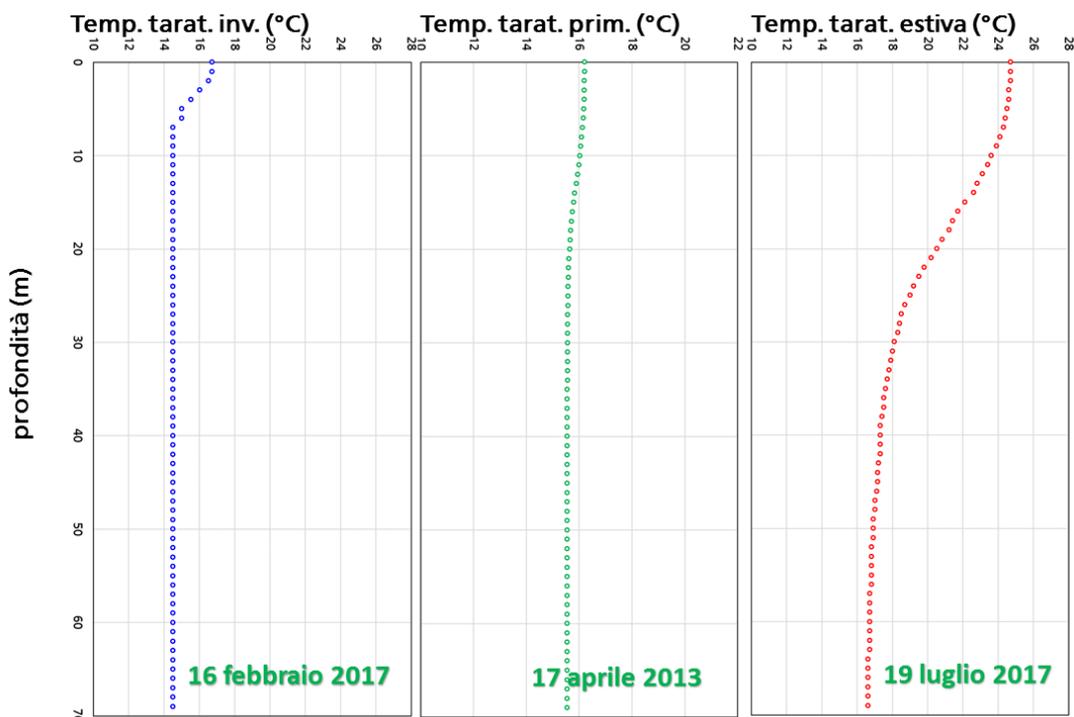


Figura 11 Profili di temperatura adottati per gli *scenari di taratura*

Salinità

La **salinità** dell'acqua di mare nella zona considerata non è soggetta a variazioni significative; per essa è stato adottato il valore medio tipico di 38 g/l.

Livello del mare

Per quanto concerne le oscillazioni del **livello marino** nel sito in esame (e nel Mar Mediterraneo in generale) le escursioni del livello del mare sono modeste, solo eccezionalmente significative e normalmente riconducibili alla marea astronomica e alla cosiddetta marea "meteorologica". È stato pertanto adottato il livello di medio mare come livello di riferimento per le simulazioni numeriche.

Moto ondoso

Scopo delle presenti verifiche è quello di analizzare la situazione in condizioni meteorologiche critiche per le fenomenologie in esame che si accompagnano, generalmente, a condizioni di pressione stabile.

Le condizioni più critiche dal punto di vista della dispersione, infatti, fanno riferimento a venti di intensità moderata o a situazioni di calme di vento, che corrispondono in generale ad un **moto ondoso** non particolarmente sviluppato o del tutto assente.

Peraltro, la presenza di un forte moto ondoso causato da un forte e perdurante vento rappresenterebbe una condizione favorevole alla dispersione del pennacchio.

Tutto ciò premesso nel presente studio non viene considerata la presenza di moto ondoso, mentre gli effetti delle correnti generate dal moto ondoso sono considerati come precedentemente descritto.

Vento

Il "**regime anemologico**" locale rappresenta una delle caratteristiche ambientali importanti per l'analisi di dispersione del pennacchio caldo proveniente dal diffusore di scarico di una centrale termoelettrica. Il vento, specie se intenso e prolungato, può infatti influenzare la dinamica superficiale, oltre che favorire lo scambio termico con l'atmosfera.

Per quanto riguarda la direzione e la frequenza prevalente del vento, si riportano in Figura 12 le rose dei venti (totale, diurna e notturna) ricavate dalle serie storiche del periodo 2009 - 2012 della postazione meteo di centrale a +10 m. Le due figure seguenti si riferiscono alla serie rilevata dalla medesima stazione meteo di centrale nell'anno 2017: in Figura 13 si mostrano la rosa annuale totale e quelle diurne e notturne, mentre la successiva Figura 14 contiene le rose dei venti stagionali.

In generale, le direzioni di provenienza prevalenti sono quelle da NE e da S-SE indotte dalla circolazione sinottica. A queste si sovrappone il regime locale di brezza dovuta alla presenza del Mar Tirreno a Ovest ed ai rilievi dell'Appennino ad Est, che si evidenziano nella maggior frequenza dei venti dal settore orientale nelle ore notturne e da quello occidentale nelle ore diurne.

Sono state individuate due condizioni di ventosità così distinte:

- vento da Sud con intensità di 3 m/s caratterizzato da una elevata frequenza di accadimento in particolare nella stagione estiva;
- vento da Nord Est con intensità di 4 m/s caratterizzato da una elevata frequenza di accadimento in particolare nella stagione invernale.

Le condizioni ambientali simulate negli *scenari di taratura* e in quelli *previsionali* saranno di volta in volta riassunte all'interno dei paragrafi che ne descrivono i risultati.

Per quanto concerne, in particolare, gli *scenari di calibrazione* del modello si è fatto riferimento, ove disponibili, alle condizioni ambientali misurate durante le stesse giornate assunte come riferimento per la fase di taratura dei parametri del modello.

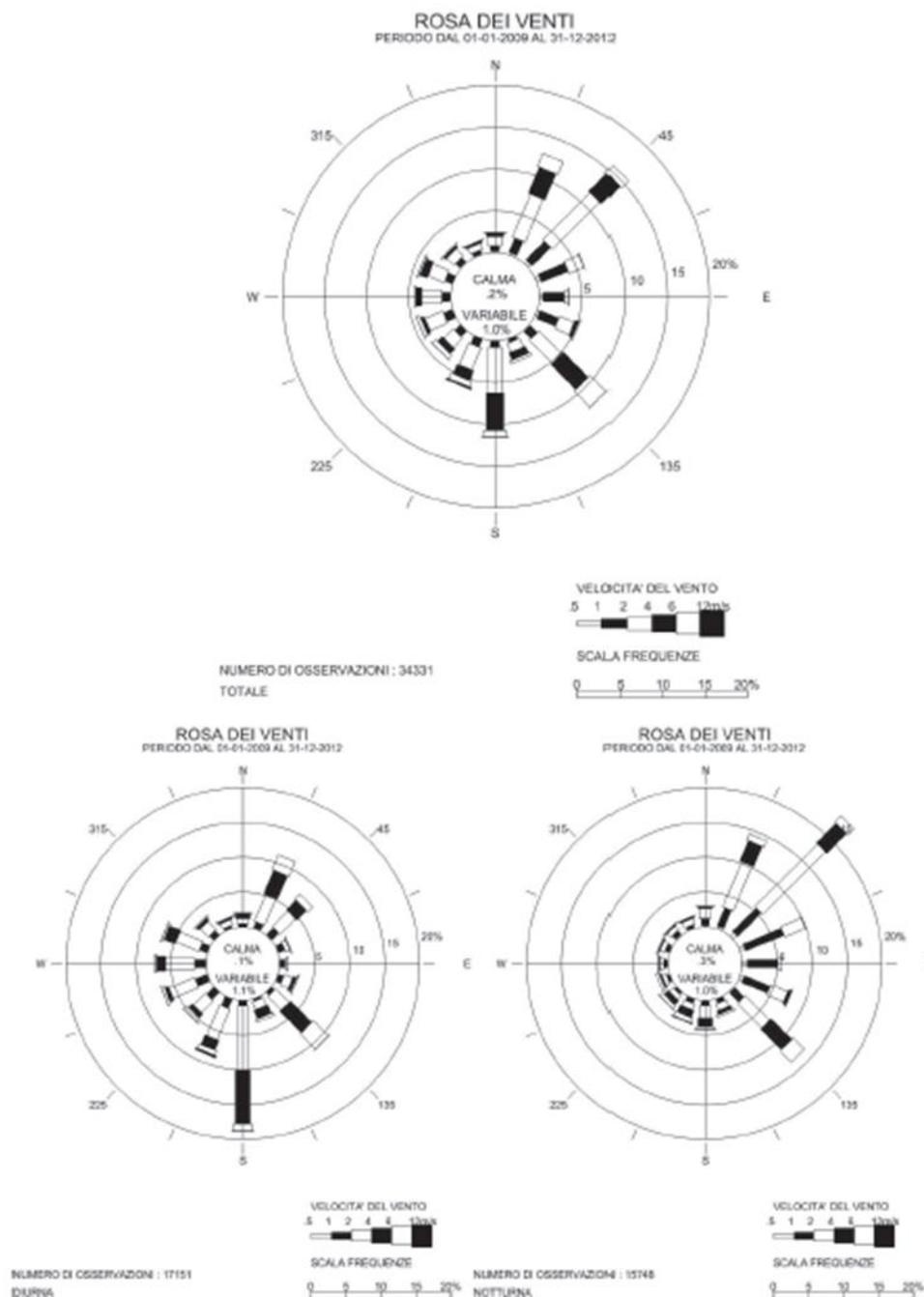
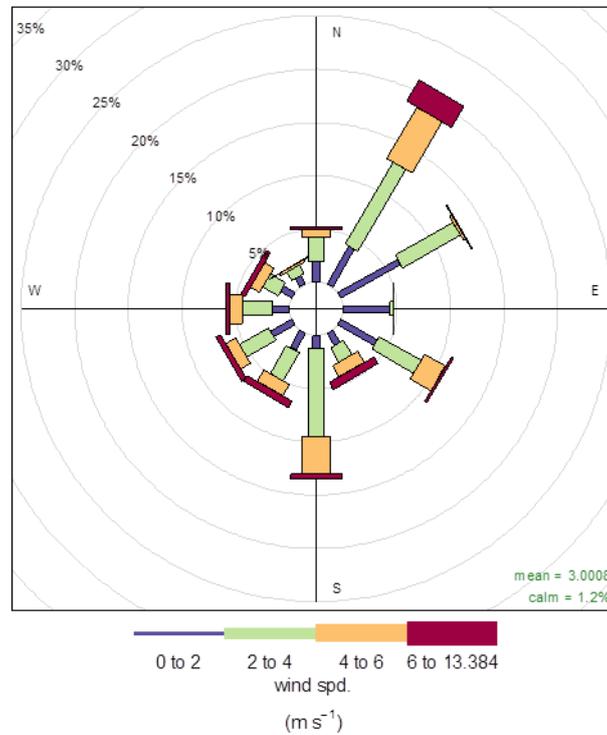


Figura 12 Postazione meteo di centrale. Rose dei venti totale (sopra), diurna (sx sotto) e notturna (dx sotto) nel periodo dal 2009 al 2012.

Rosa dei venti di Civitavecchia - Anno 2017



Rosa dei venti (giorno/notte) di Civitavecchia - Anno 2017

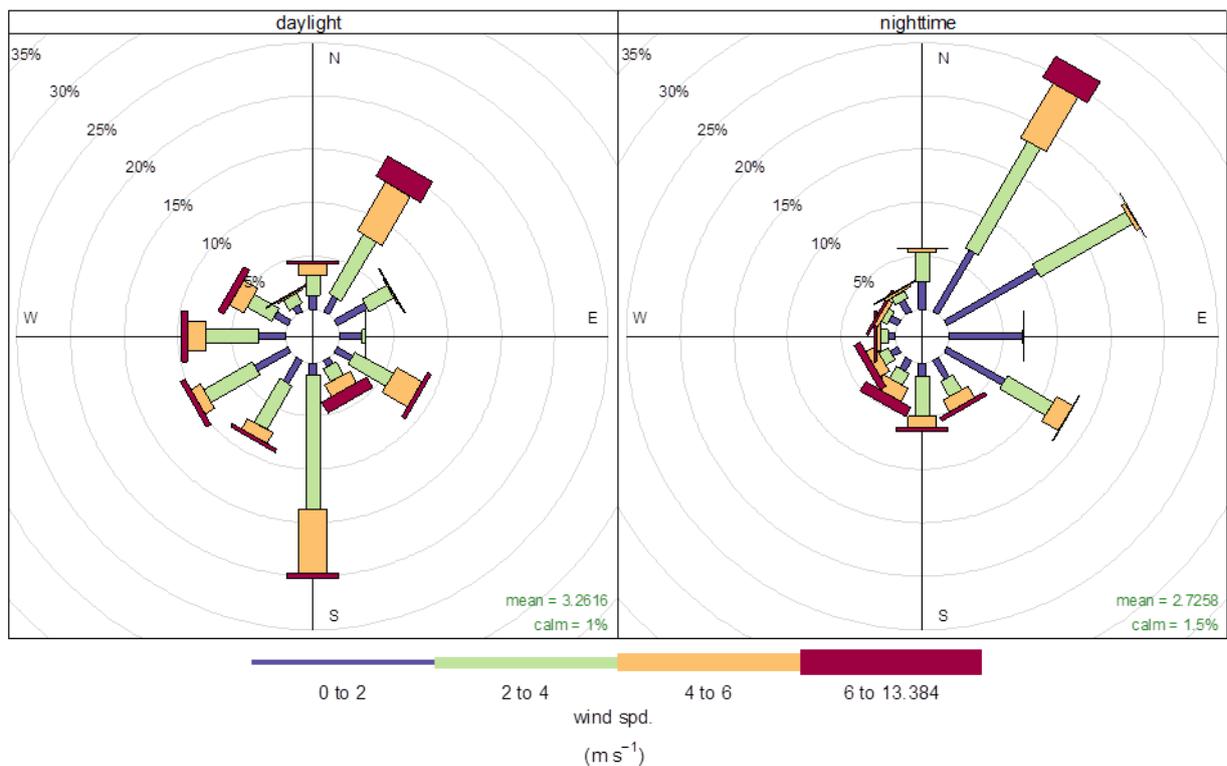


Figura 13 Postazione meteo di centrale. Rose dei venti totale (sopra), diurna (sx sotto) e notturna (dx sotto) nell'anno 2017.

Rosa dei venti (stagionale) di Civitavecchia - Anno 2017

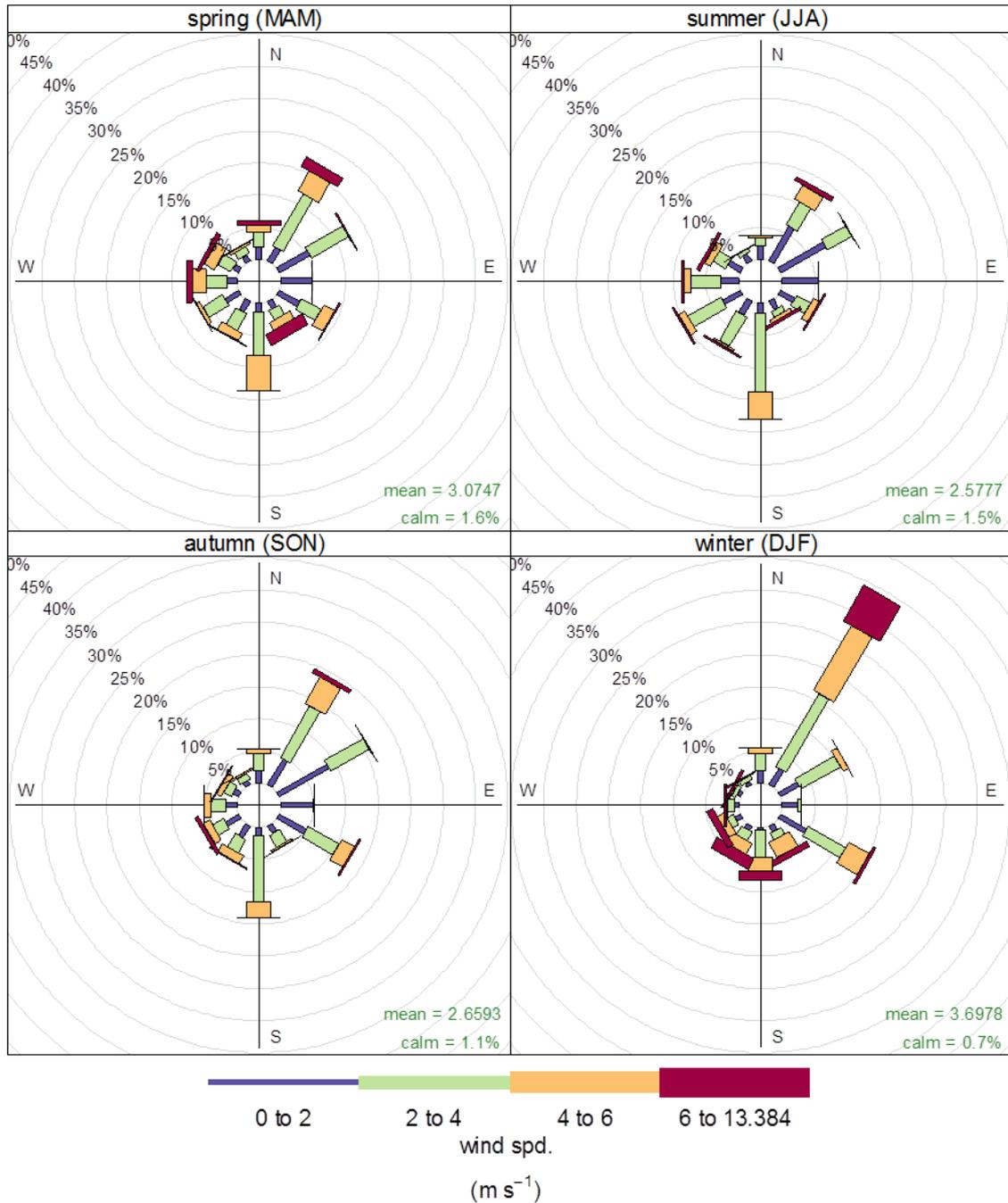


Figura 14 Postazione meteo di centrale. Rose dei venti stagionali nell'anno 2017.

3 ASSETTI DEGLI IMPIANTI DI PRODUZIONE

3.1 Opere di presa e scarico degli impianti

La centrale termoelettrica di **Torrevaldaliga Nord (TVN)** è esercita a carbone con una potenza termica totale pari a 4260 MWt e una potenza elettrica lorda di 1980 MWe (660 MWe per gruppo). Per il ciclo di condensazione e raffreddamento nell'attuale assetto a carbone, l'impianto utilizza acqua prelevata dal mare Tirreno nella misura massima di 24.5 m³/s per ciascuno dei tre gruppi. Nel previsto futuro assetto a gas, la portata complessivamente aspirata alla presa e rilasciata allo scarico nelle condizioni nominali di massimo carico è invece pari a 25.9 m³/s per l'aggiunta di 1.4 m³/s per il raffreddamento degli ausiliari.

La presa, di tipo sommerso, è costituita da un torrino di 40 m di lato, con quattro bocche di aspirazione disposte due a destra e due a sinistra ad una distanza da riva pari a circa 400 m. Le quote limite di ciascuna bocca di aspirazione si collocano a 8.5 m e 13 m di profondità (Figura 15 e Figura 2).

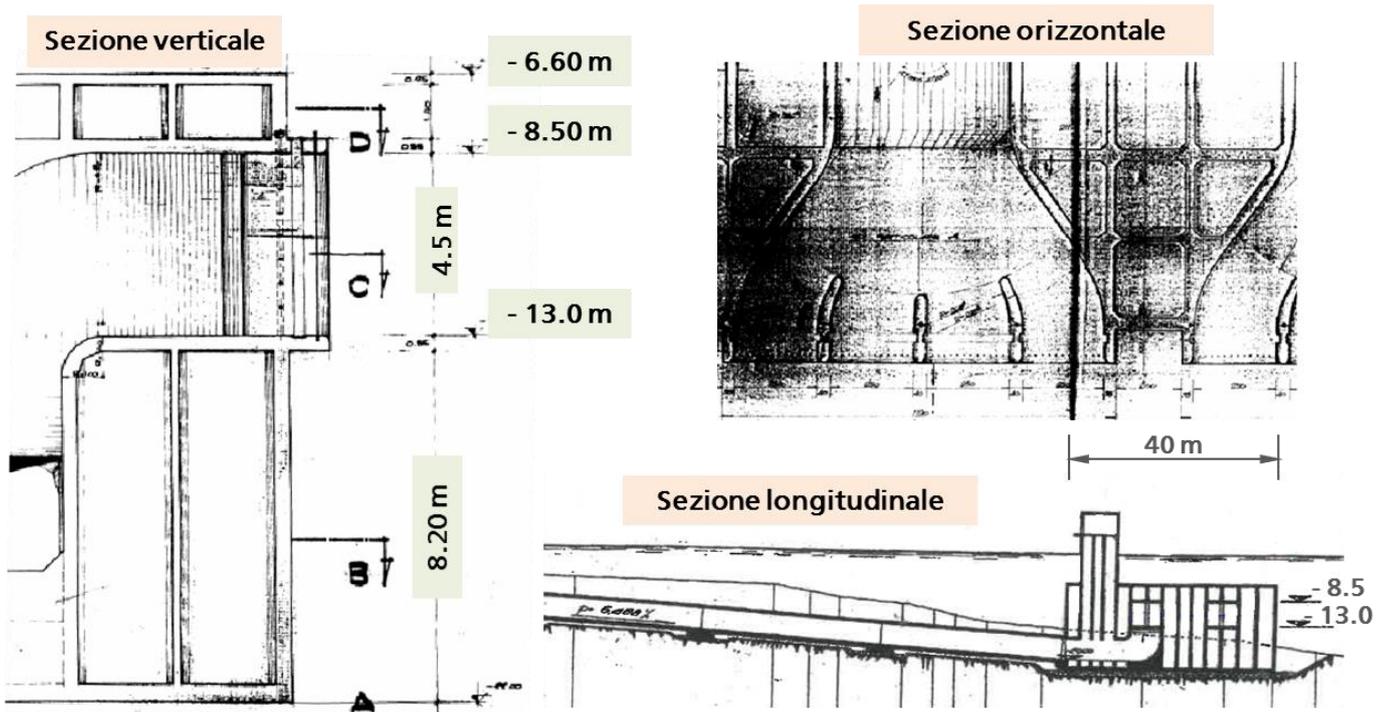


Figura 15 Particolari dell'opera di presa della centrale di TVN

L'opera di **scarico** della centrale di Torrevaldaliga Nord è del tipo a diffusore superficiale ed è localizzata lungo la costa a circa 350 m a Nord del radicamento a terra della banchina carboni di Enel (Figura 16); in essa confluiscono le acque di raffreddamento provenienti da tutti i gruppi dell'esistente centrale di TVN.

Il circuito dell'acqua di circolazione di TVN prevede due canali di confluenza prima dello scarico (uno per gr. 1-2 e uno per gr. 3-4) che subito prima del diffusore sono in comunicazione con un collettore. Nel presente documento sono state considerate quattro condotte di scarico come rappresentative dello scenario attuale. Nella futura configurazione a gas, invece, sono stati considerati solo i due canali più a Nord.

L'opera di scarico, lunga circa 100 m, larga circa 15 m alla sezione iniziale e 43 m a quella di efflusso finale, presenta una profondità di scarico alla sezione *inshore* pari a 3.6 m, mentre l'efflusso alla sezione *offshore* avviene ad una quota del fondo di -1.5 m dal livello di medio mare.

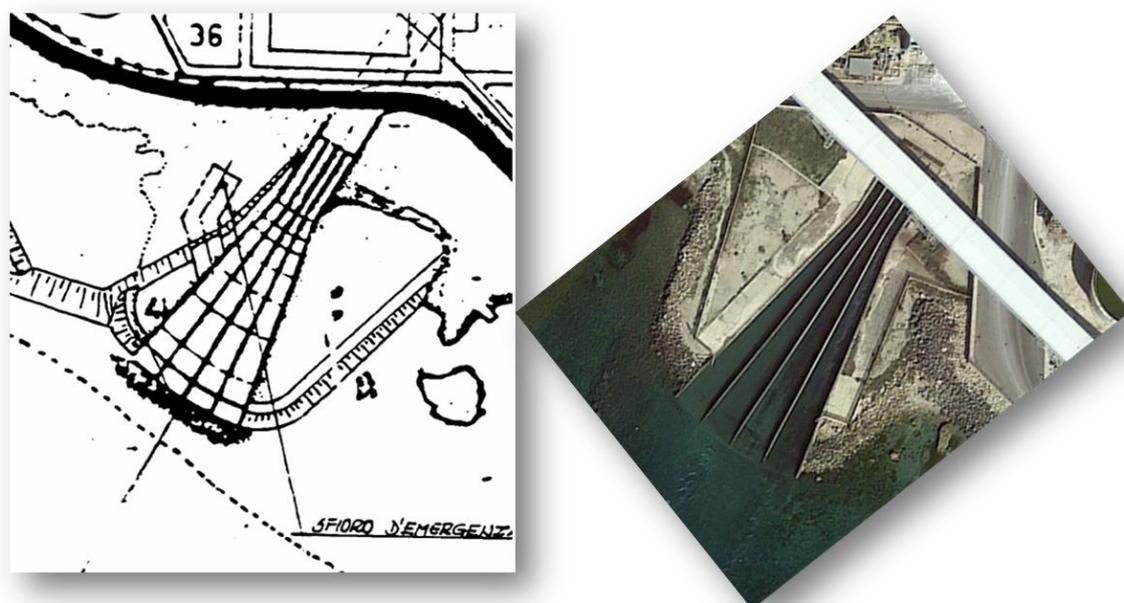


Figura 16 Pianta del diffusore dell'opera di scarico della centrale di TVN

La vicina centrale termoelettrica di **Torrevaldaliga Sud (TVS)**, di proprietà di Tirreno Power S.p.A., è costituita da due unità TV5 e TV6 a ciclo combinato (CCGT *Combined Cycle Gas Turbine*); la sezione TV5, configurata con due linee turbogas (A e B) e una a vapore, ha una produzione totale di 800 MWe elettrici, mentre la sezione TV6 configurata con una linea turbogas (C) e una a vapore, ha una produzione totale di 400 MWe elettrici; i turbogas sono alimentati esclusivamente a gas naturale.

Anche per questo impianto l'acqua di raffreddamento per il ciclo termico è prelevata dal mare Tirreno. Il prelievo avviene attraverso due opere di presa distanti circa 150 m dalla riva, mentre la restituzione a mare avviene tramite due diffusori di scarico denominati SF2

(scarico termico della sezione TV6) e SF3 (scarico termico della sezione TV5), secondo la disposizione planimetrica illustrata in Figura 17.

L'opera di scarico SF2, lunga circa 45 m, larga circa 6 m alla sezione iniziale e 28 m a quella di efflusso finale, presenta una profondità di scarico alla sezione *inshore* pari a 4.8 m, mentre l'efflusso alla sezione *offshore* avviene ad una quota del fondo di -0.6 m dal livello di medio mare. Il diffusore SF3, più piccolo del precedente, è lungo 40 m, largo circa 5 m alla sezione iniziale e 21 m a quella di efflusso finale; presenta una profondità di scarico alla sezione *inshore* pari a 3.25 m, mentre l'efflusso alla sezione *offshore* avviene ad una quota del fondo di -0.5 m dal livello di medio mare (Rif. 20).

L'impianto di Torre Valdaliga Sud utilizza acqua prelevata dal mare Tirreno nella misura di 15.6 m³/s per entrambi i gruppi TV5 e TV6. Dal punto di vista costruttivo, le opere di presa sono cassoni terminali con pianta rettangolare; sulle pareti laterali sono ricavate le bocche di aspirazione. I cigli superiore ed inferiore delle bocche si trovano ad una profondità di 3 e 4 m e di 2.75 e 4.75 m rispettivamente per le prese del gruppo TV5 e TV6 (Figura 18, Rif. 21).



Figura 17 Diffusori di scarico e prese del circuito di raffreddamento della centrale di TV5

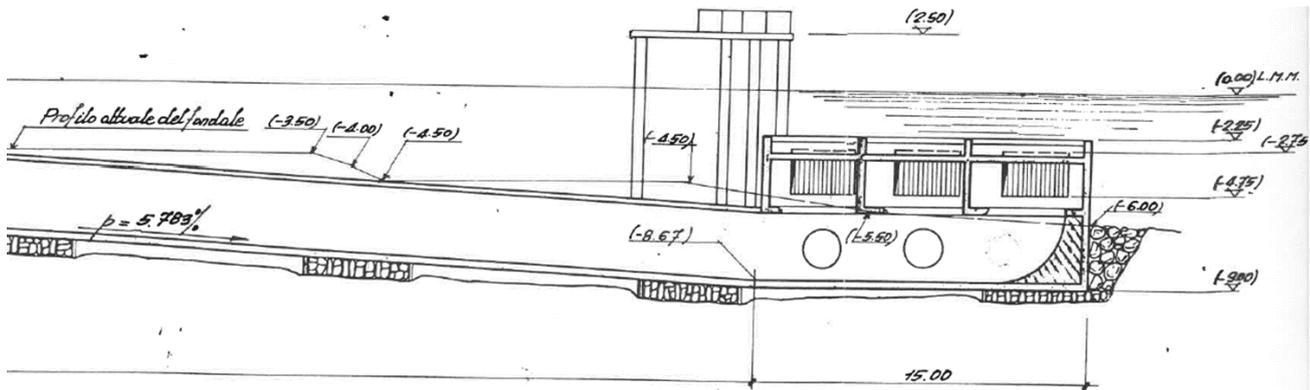


Figura 18 Sezione longit.le delle prese del circuito di raffreddamento della c.le di TVS (TV6; Rif. 21)

3.2 Condizioni di esercizio delle centrali

Ai fini dello studio i dati essenziali per quanto riguarda l'assetto di funzionamento delle centrali sono le portate alle prese e agli scarichi unitamente all'incremento termico agli scarichi determinato dai circuiti di raffreddamento.

Le ipotesi prese in considerazione esaminano il funzionamento degli impianti alla massima potenza (vale a dire quello più critico ipotizzabile per le tematiche in oggetto) e sono riassunti in Tabella 2.

Tabella 2 Condizioni di esercizio delle centrali di TVN e TVS.

	TVN assetto carbone (1)	TVN assetto gas (1)	TVS (2) gruppo TV5 (800 MW)	TVS (2) gruppo TV6 (400 MW)
Portata alla presa (m ³ /s)	73.5	25.9	15.6	15.6
Portata allo scarico (m ³ /s)	73.5	25.9	15.6	15.6
ΔT allo scarico (°C)	7.65	8	7.7	5.3

(1) Fonte: Enel Produzione. (2) Fonte: CESI (da precedenti studi)

4 SCHEMATIZZAZIONE NUMERICA

4.1 Introduzione

L'approccio tridimensionale utilizzato nel presente studio è derivato dalla complessità del sistema e delle variabili in gioco, e dalla conseguente necessità di simulare le correnti e la dispersione da esse operata della perturbazione termica generata dallo scarico delle acque di raffreddamento della centrale in tutte le componenti direzionali, tenendo conto anche dei gradienti di densità dovuti alla temperatura dell'acqua variabile nei diversi punti di calcolo.

Per la simulazione numerica è stato dunque utilizzato il codice MIKE 3 del DHI, *Danish Hydraulic Institute*® (Rif. 22) che:

- utilizza un reticolo di calcolo a maglia triangolare; ad ogni cella del dominio è associata una quota del fondo interpolata sulla base dei rilievi batimetrici disponibili. I confini dell'area di calcolo sono stati fatti coincidere con la riva e con tre contorni in mare denominati NORD, SUD e OFFSHORE, trasversali alla riva i primi due e parallelo ad essa il terzo;
- simula la dispersione in ambiente marino di perturbazioni (per esempio termiche) e/o di sostanze (per esempio nutrienti) in base a condizioni iniziali e ai contorni variabili spazialmente e temporalmente, che definiscono lo scenario di analisi.

I risultati ottenuti nelle diverse simulazioni numeriche sono poi esaminati attraverso l'interfaccia grafica del codice ed evidenziati allo scopo di determinare l'andamento del campo di velocità, di concentrazione dei componenti simulati e di temperatura nell'intero dominio di calcolo.

4.2 Il modello numerico di simulazione

MIKE 3 (Rif. 22) simula correnti con schema tridimensionale ed è applicabile ad ambienti marini e lacustri. Il modulo di calcolo principale, denominato **MIKE 3 HD** (*HydroDynamic*), risolve le equazioni idrodinamiche (equazioni di continuità e del momento) e dell'energia per il calcolo del pelo libero, del campo di moto e della temperatura.

MIKE 3 è stato usato nella versione *Flexible Mesh* (FM) ai volumi finiti che consente di adottare una risoluzione spaziale variabile in funzione delle diverse aree di studio. Inoltre, la versione FM utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte.

L'area oggetto di studio è stata schematizzata all'interno del modello tridimensionale MIKE 3 FM mediante una griglia di calcolo (*mesh*) a maglie triangolari (Figura 19). Ad ogni cella del dominio è stata associata una quota del fondo interpolata sulla base dei dati batimetrici disponibili. Il confine *inshore* dell'area di calcolo coincide con la linea di riva nel tratto compreso tra il porto commerciale di Civitavecchia, a Sud, e le opere di difesa costiera esistenti circa due chilometri a Nord della foce del fiume Mignone. L'estensione in direzione trasversale alla costa è mediamente pari a circa 5.5 km.

La terza dimensione è discretizzata nel modello mediante strati a spessore variabile con una discretizzazione di tipo *sigma* nella parte superficiale per seguire in maggiore dettaglio la diminuzione dei fondali sottocosta, e una di tipo *z-level* in quella più profonda (Figura 19).

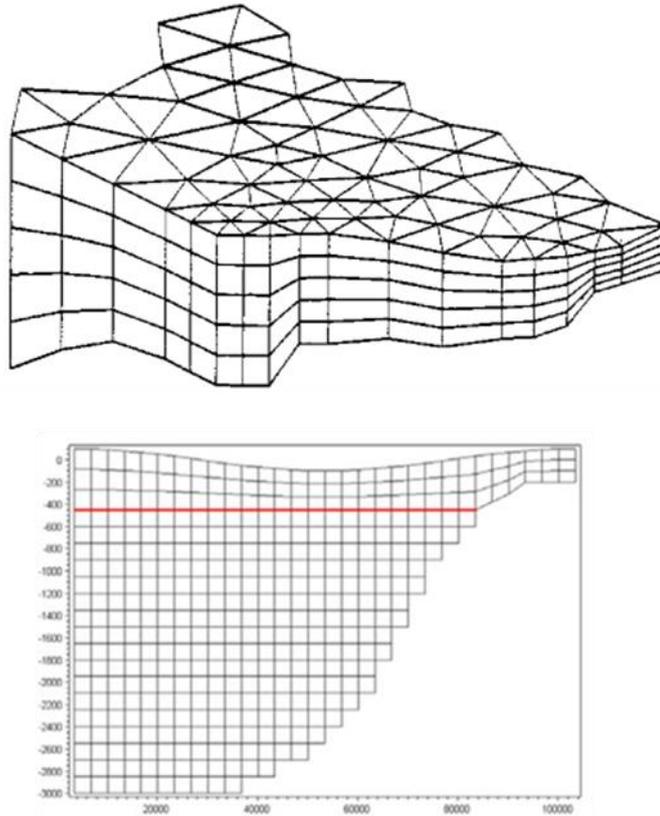


Figura 19 Discretizzazione orizzontale e verticale a strati
(*combined sigma & z-level mesh*, Rif. 22)

MIKE 3 HD è in grado di valutare i gradienti di densità dell'acqua che derivano dalla distribuzione non uniforme della salinità e della temperatura del volume d'acqua compreso nel dominio di calcolo.

I gradienti di densità indotti, nello studio in oggetto, dallo scarico della/e centrale/i sono in grado di modificare i campi di corrente che, a loro volta, agiscono sulla dispersione della componente termica.

4.3 Schematizzazione numerica

Al fine di valutare l'insieme dei fenomeni indotti dal rilascio delle acque di raffreddamento delle centrali operanti sul segmento costiero in esame è stato necessario definire un dominio di calcolo di dimensioni adeguate che comprendesse, oltre allo scarico della centrale di Torrevaldaliga Nord anche quelli della vicina centrale termoelettrica di Torrevaldaliga Sud. Inoltre, le dimensioni complessive del dominio devono garantire la necessaria accuratezza nell'assegnazione delle condizioni ai contorni e consentire lo sviluppo delle perturbazioni indotte nell'intorno dei punti di scarico coerentemente con le correnti marine simulate. È stato necessario, infine, includere i profili di tutte le opere costiere potenzialmente capaci di influire sulla corrente esistente e su quella indotta dagli scarichi e dalle prese a mare. Si tratta, in particolare, dei profili della diga foranea del porto di Civitavecchia e delle opere in corso di realizzazione che ne riconfigurano significativamente l'ingresso.

Tutto ciò premesso, la predisposizione del reticolo di calcolo (*mesh*) è stata condotta secondo i seguenti criteri:

- garantire il massimo dettaglio, generando elementi di piccole dimensioni, nelle zone più critiche dal punto di vista idrodinamico e termico, con particolare riferimento alle aree prossime alla riva e ai diffusori di scarico;
- operare con elementi il più possibile regolari, allo scopo di incrementare la stabilità e la convergenza del calcolo.

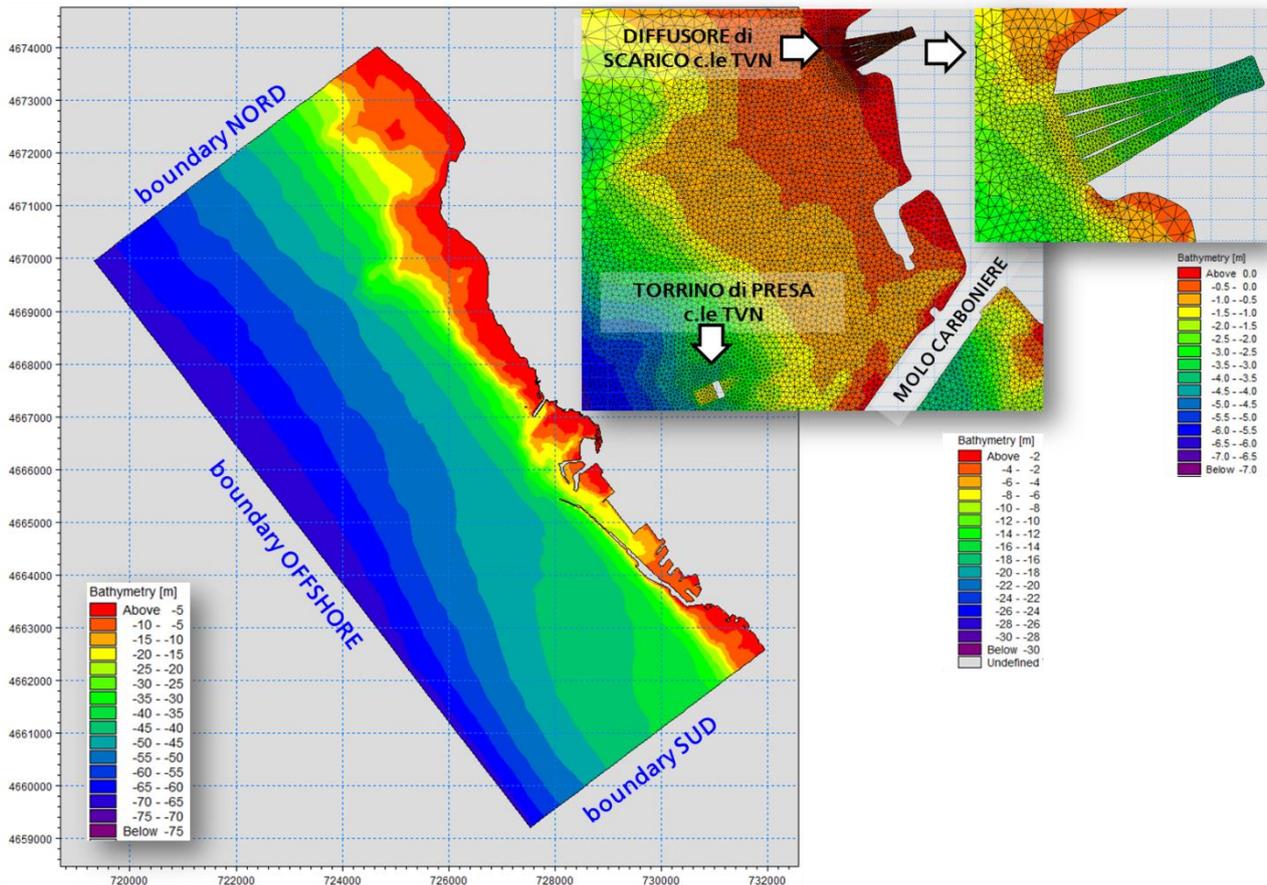


Figura 20 Batimetria nell'area del dominio di calcolo; in alto a destra il dettaglio del reticolo di calcolo e della batimetria nell'area della presa e dello scarico della centrale di Torrevaldaliga Nord

La Figura 20 riporta la batimetria interpolata dal codice di calcolo sulla base delle informazioni topografiche e batimetriche fornite. Compatibilmente con l'estensione complessiva del dominio di calcolo, le dimensioni delle celle di calcolo sono state assunte minime in corrispondenza delle zone prossime agli scarichi e alle prese (con lato ≈ 2 m e ≈ 3 m, rispettivamente) e sono state progressivamente aumentate allontanandosi da esse fino a raggiungere la dimensione massima di ≈ 300 m in prossimità dei contorni Offshore, Nord e a Sud indicati nella stessa immagine. In Figura 21 sono illustrate la batimetria e la *mesh* di calcolo nell'area delle prese e degli scarichi delle due centrali. Le opere "a giorno" (su pali), come il pontile secondario dell'area di attracco delle carboniere e i due condotti di adduzione paralleli che conducono ai cassoni sommersi delle prese della centrale di TVS, non sono stati riprodotti poiché influenti sulla dinamica complessiva dell'area.

La risoluzione verticale adottata discretizza il battente idrico in 15 strati verticali con spessore minore (0.5 m fino a 1.5 m di profondità) in prossimità della superficie, dove avvengono i rilasci e dove si sviluppano i fenomeni di dispersione (Figura 22).

Il reticolo finale è risultato costituito da 48745 elementi triangolari e da 25468 nodi (vertici dei triangoli) nello strato superficiale; il reticolo tridimensionale è costituito da 412383 elementi e da 241842 nodi. Il reticolo finale per la schematizzazione del funzionamento a gas, con scarico attraverso solo due dei quattro canali in cui è attualmente parzializzato il diffusore, ha dimensioni leggermente inferiori: 48581 elementi triangolari e 25374 nodi, in superficie, e 411371 elementi con 241175 nodi con riferimento alla *mesh* tridimensionale. Gli elementi sono compresi in un dominio di calcolo la cui area superficiale è di poco inferiore a 7650 ettari.

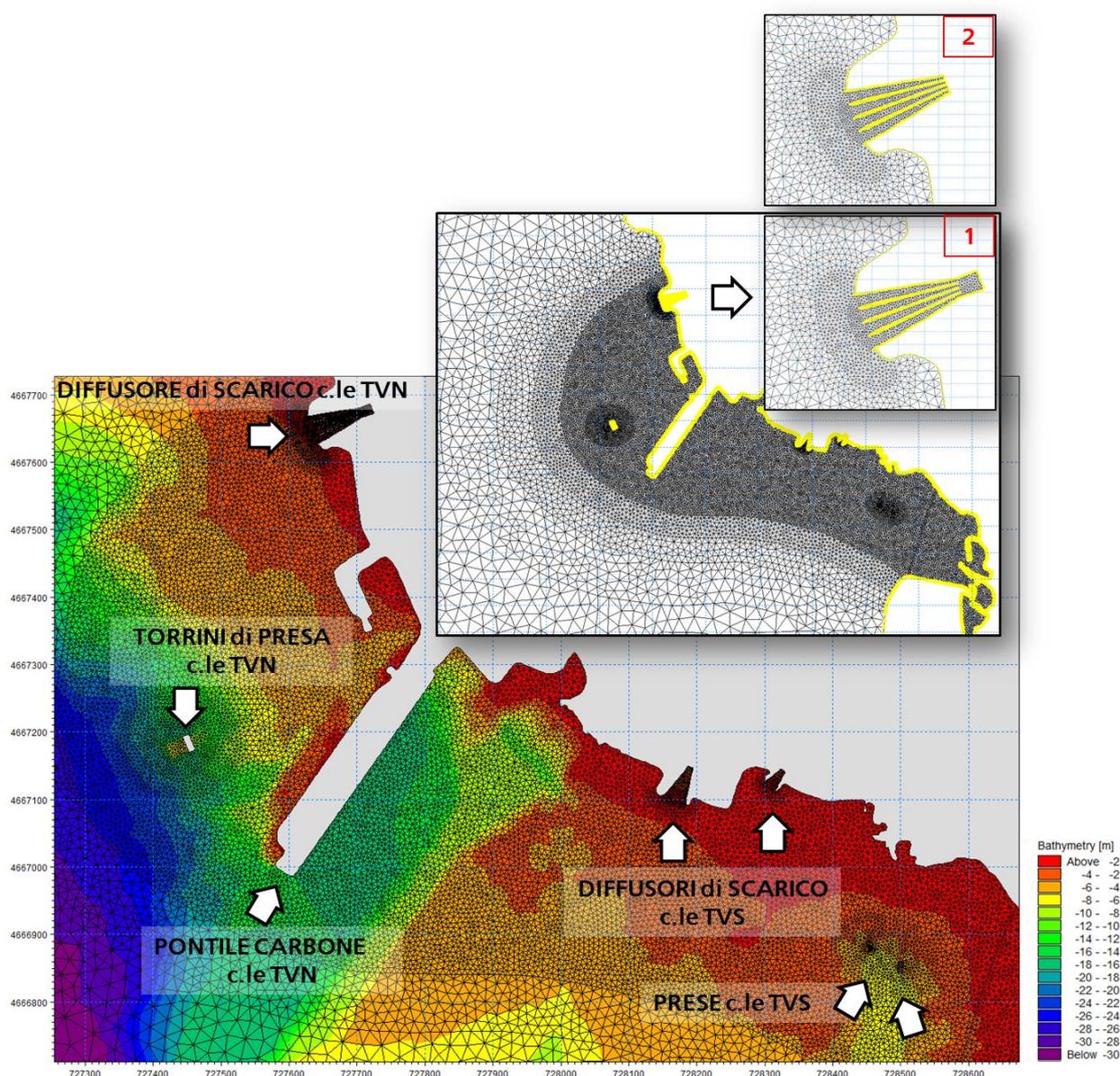


Figura 21 Batimetria nell'area delle prese e degli scarichi delle due centrali termoelettriche di TVN e TVS; in alto a destra il dettaglio del reticolo di calcolo nella stessa area con i particolari del diffusore di scarico utilizzato per lo scarico a quattro canali attuale (dettaglio 1) e a due canali futuro (dettaglio 2)

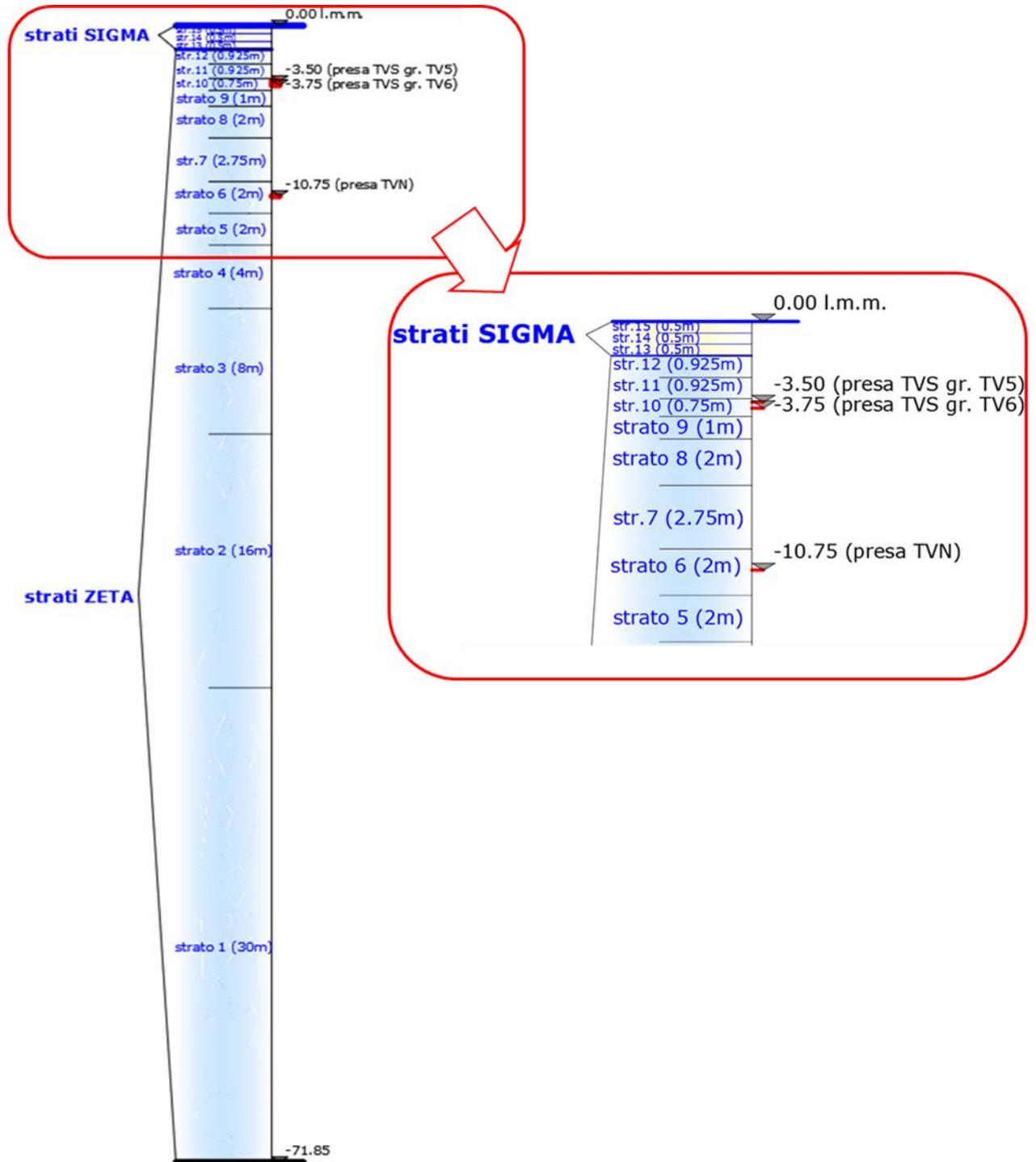


Figura 22 Discretizzazione verticale del volume di calcolo: 15 strati di cui i 3 superficiali a spessore variabile (strati *sigma*)

5 SCENARI E CONDIZIONI DI CALCOLO

Gli scenari di calcolo adottati per il presente studio sono derivati dalla combinazione delle condizioni di esercizio (illustrate al paragrafo 3.2 e in Tabella 2) e delle condizioni meteomarine più frequenti e/o più critiche per le problematiche in oggetto, scelte tra quelle tipiche del sito.

Nel complesso sono stati simulati 7 scenari di calcolo così suddivisi:

- N. 3 scenari di taratura (A, B e C),
- N. 4 scenari previsionali.

Per *taratura o calibrazione* di un modello matematico si intende la messa a punto dei parametri, delle condizioni ai contorni e degli elementi agenti nel sito in esame affinché il modello possa riprodurre al meglio e con sufficiente accuratezza la realtà.

La taratura del modello è una fase particolarmente importante e indubbiamente delicata poiché, sulla base di informazioni puntuali relative al sito in esame, consente di adattare il codice di calcolo alla situazione del paraggio oggetto di studio. Il modello, infatti, interpreta la realtà fisica in maniera semplificata, tenendo conto dei principali fenomeni che governano la dispersione della perturbazione termica. I fenomeni responsabili della dispersione, tuttavia, sono molteplici e la loro influenza non può essere sempre valutata in termini quantitativi. L'operazione di taratura consente, in maniera implicita, di considerare tutti i fattori non direttamente esplicitabili sotto la forma di relazioni causa/effetto.

Ultimata la fase di calibrazione dei parametri del modello, si procede all'utilizzo di questi ultimi per la successiva *fase previsionale* con cui è possibile ipotizzare la dispersione della perturbazione termica al variare delle condizioni ambientali.

La Tabella 3 e la Tabella 4 che seguono riassumono gli scenari di calcolo rispettivamente simulati nella fase di taratura e in quella previsionale del presente studio. Tutti gli scenari previsionali si riferiscono alla condizione di funzionamento più gravosa (nominale di picco) dell'impianto di Torrevaldaliga Nord nei due assetti a carbone (attuale) e a gas (futuro), e del vicino impianto di Torrevaldaliga Sud il cui pennacchio, con corrente ambientale diretta verso Nord Ovest, è potenzialmente in grado aggiungersi a quello di TVN.

Il codice MIKE è basato su equazioni valide in regime non stazionario per cui, quando si tratta di riprodurre una situazione stazionaria, questa viene raggiunta simulando un transitorio a partire da una condizione iniziale assegnata. Tale transitorio viene considerato esaurito quando tra un passo temporale e il successivo non sono riscontrabili differenze significative. Ogni simulazione numerica dello studio è stata effettuata partendo da una **condizione iniziale** di quiete in tutte le celle del reticolo che, all'istante iniziale, sono dunque caratterizzate da velocità nulla e da temperatura uguale a quella ambiente. Ciascuna simulazione è stata quindi fatta proseguire fino ad almeno 3.5 giorni di tempo reale; tale periodo consente il raggiungimento della condizione di stazionarietà del campo idro-termo-dinamico secondo quanto appena descritto.

Il dominio di calcolo è stato considerato sufficientemente esteso per consentire lo sviluppo del pennacchio nell'intorno del punto di scarico coerentemente con le correnti simulate. Le assunzioni ai **contorni del dominio** sono quelle necessarie a far sì che il modello numerico riproduca al meglio le condizioni meteomarine nell'area più direttamente interessata dalla dispersione. In particolare, è stata imposta una temperatura della corrente marina entrante nel dominio pari a quella imperturbata tipica della condizione stagionale considerata.

Sempre con riferimento alle condizioni di temperatura adottate, allo scarico è stata imposta la temperatura dettata dalla condizione di esercizio dell'impianto, mentre alla presa essa è determinata dal bilancio termico dell'acqua aspirata. Il codice, infatti, tiene conto dell'eventuale ricircolo alla presa dell'acqua di scarico: l'energia termica contenuta nell'acqua, prelevata alla sezione di presa in forma di (eventuale) sovrappiù termico rispetto alla temperatura ambiente imperturbata, viene automaticamente aggiunta all'energia termica rilasciata dallo scarico associato alla presa stessa.

Tabella 3 Scenari di **TARATURA**: assetti di esercizio degli impianti e valori assunti per i principali parametri ambientali.

Scenario di TARATURA N°	ASSETTO CENTRALI						DATI AMBIENTALI					
	TVN		TVS (TV5)		TVS (TV6)		STAGIONE	VENTO		CORRENTE		T corrente
	Q AC [m³/s]	DT presa- scarico [°C]	Q AC [m³/s]	DT presa- scarico [°C]	Q AC [m³/s]	DT presa- scarico [°C]		Vel. [m/s]	Direz.ne di prov. [-]	Vel. [m/s]	Direz.ne di prop. [-]	T acqua [°C]
A_19 luglio 2017	73.5	8.3	12.6	5.3	non funzionante		est	0	CALMA	profilo (Fig. 4)	NO	profilo estivo (Fig. 11)
B_16 febbraio 2017	68.8	6.8	non funzionante		non funzionante		inv	2	SO	profilo (Fig. 4)	NO	profilo invernale (Fig. 11)
C_17 aprile 2013	44.9	5.0	non funzionante		non funzionante		pri	1.5	NE	0.05 (cost)	SE	profilo invernale (Fig. 11)

Tabella 4 Scenari di **PREVISIONE**: assetti di esercizio degli impianti e valori assunti per i principali parametri ambientali.

Scenario PREVISIONALE N°	assetto	ASSETTO CENTRALI						STAGIONE	DATI AMBIENTALI				
		TVN		TVS (TV5)		TVS (TV6)			VENTO		CORRENTE		T corrente
		Q AC [m³/s]	DT presa- scarico [°C]	Q AC [m³/s]	DT presa- scarico [°C]	Q AC [m³/s]	DT presa- scarico [°C]		Veloc. [m/s]	Dir. di prov. [-]	Velocità [m/s]	Dir. di prop. [-]	T acqua [°C]
1	a carbone (attuale)	73.5	7.65	15.6	7.7	15.6	5.3	est	3	S	profilo (Fig. 4)	NO	(Fig. 10)
2	a carbone (attuale)	73.5	7.65	15.6	7.7	15.6	5.3	inv	4	NE	profilo (Fig. 4)	NO	(Fig. 10)
3	a gas (futuro)	25.9	8	15.6	7.7	15.6	5.3	est	3	S	profilo (Fig. 4)	NO	(Fig. 10)
4	a gas (futuro)	25.9	8	15.6	7.7	15.6	5.3	inv	4	NE	profilo (Fig. 4)	NO	(Fig. 10)

Alcuni altri parametri ambientali sono riassunti qui di seguito:

- la salinità: 38 per mille, valore tipico del Mediterraneo;
- il livello marino: livello di medio mare;
- la temperatura dell'aria e l'umidità relativa: variabili in base alle misure disponibili per gli scenari di calibrazione A, B e C e, per gli scenari previsionali, in base ai valori tipici stagionali.

6 ANALISI DEI RISULTATI

6.1 Premessa

I risultati relativi a ciascuno degli scenari considerati nello studio sono stati analizzati sia graficamente, sia mediante elaborazioni analitiche per estrarre l'insieme delle informazioni atte a caratterizzare esaurientemente le condizioni di diffusione termica. In particolare, poiché lo scopo dello studio è quello di verificare le caratteristiche di diffusione del pennacchio termico nelle tre dimensioni, viene analizzata con particolare dettaglio l'area più prossima allo scarico e alla presa della centrale di Torrevaldaliga Nord.

I risultati di ciascuna simulazione sono illustrati mediante quattro differenti figure tutte riferite alle condizioni di stazionarietà. Nello specifico le figure contengono rispettivamente:

- il grafico delle temperature in corrispondenza dei 22 punti di controllo a 1 km dallo scarico di TVN; una tabella dettaglia il calcolo dell'incremento termico secondo la vigente legislazione;
- le mappe, estese a tutto il dominio di calcolo e in dettaglio nelle aree d'impianto, della perturbazione termica superficiale con indicazione delle linee isoterme quotate a partire dalla temperatura indisturbata iniziale del corpo idrico ricettore; le mappe contengono anche la traccia dei punti di monitoraggio della temperatura sull'arco a 1000 m secondo la normativa vigente;
- la mappa della perturbazione termica riscontrata in una sezione verticale posizionata in asse al pennacchio di scarico della centrale di TVN;
- il campo di moto superficiale, insieme a quello termico nelle aree d'impianto in esame.

L'insieme delle mappe consente di fornire, per ciascuno scenario di calcolo, un'indicazione della estensione e della conformazione spaziale della perturbazione termica generata dallo scarico delle acque di raffreddamento della centrale.

6.2 La valutazione del sovrizzo termico a 1000 m

La normativa di legge vigente ai fini del rispetto dei limiti termici (Tabella III, Allegato V, Parte III del Rif. 23) di immissione in mare prevede un limite massimo di +3 °C di sovrizzo termico rispetto alla temperatura ambientale valutato su un arco di raggio 1000 m a partire dal punto di scarico, oltre al limite assoluto di 35 °C nel punto di scarico stesso.

Il regolamento attuativo (Rif. 24, che ha sostituito il precedente Rif. 25) prevede che tale limite sia verificato in una serie di punti di misura lungo l'arco, a distanza di 5° l'uno dall'altro, attraverso rilievi di temperatura superficiale dell'acqua di mare. Il valore di incremento termico viene stabilito per differenza tra la temperatura nel punto più caldo e la temperatura di una porzione di corpo idrico non influenzata dallo scarico.

In considerazione della oggettiva frequente difficoltà nella determinazione di un'area non perturbata, per la definizione della temperatura di riferimento è consentito dal regolamento attuativo di "*assumere come temperatura riferimento (TR) la media delle temperature superficiali (Tm), misurate alla quota di -0,1 m, dei tre punti più freddi del predetto arco aumentata del doppio dello scarto tipo relativo ai suddetti tre punti* (Rif. 24)".

La Figura 23 che segue mostra la posizione dei punti di misura della temperatura al largo del diffusore di scarico della centrale di Torrevaldaliga Nord adottati durante i periodici

rilievi termici a cui la centrale è tenuta secondo il Piano di Monitoraggio e Controllo di cui al Rif. 1. Nella stessa figura, inoltre, sono evidenziate le posizioni delle prese e dei diffusori di scarico della vicina centrale di Torrevaldaliga Sud e l'ubicazione del pontile di attracco delle navi porta-carbone a servizio della centrale Enel.

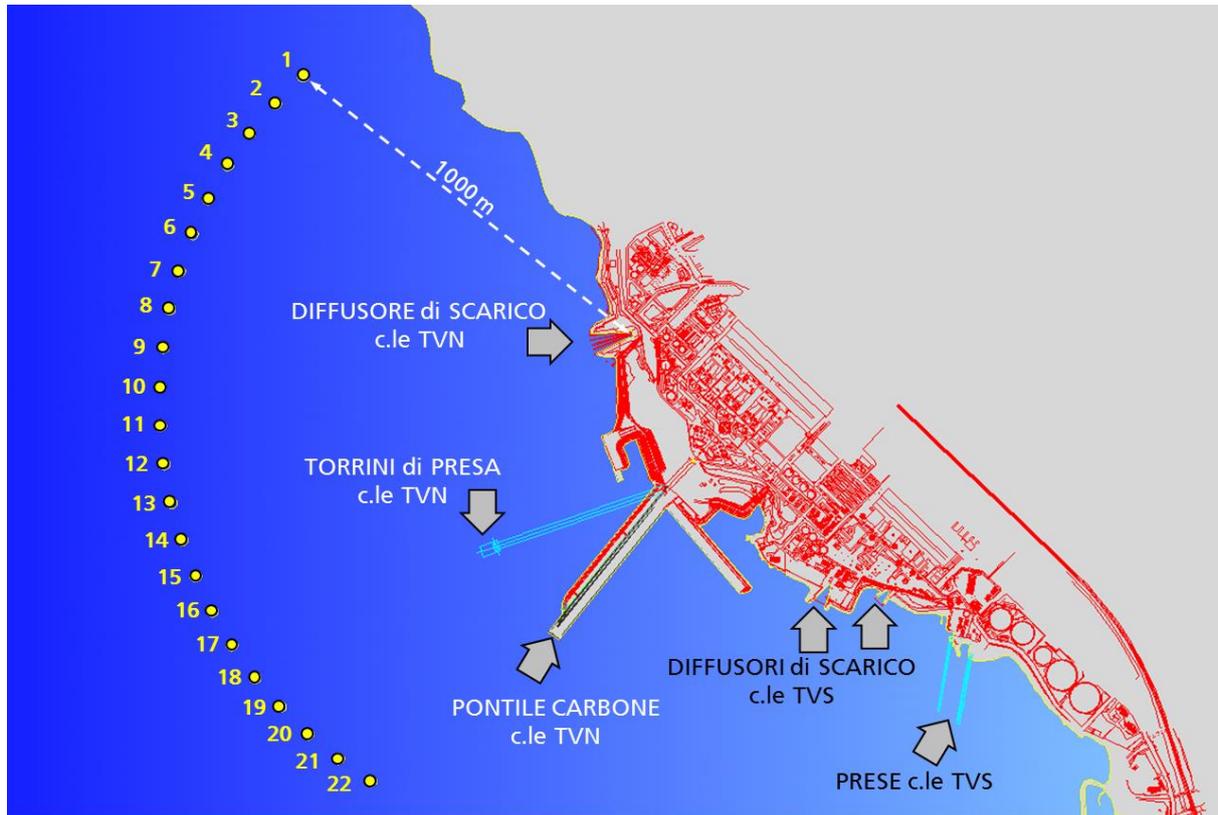


Figura 23 Stazioni di misura sull'arco a 1000 m dal punto d'immissione (diffusore TVN)

I punti di verifica, come precisato anche nel rinnovo autorizzativo di cui al Rif. 1, sono quelli in cui l'innalzamento di temperatura è direttamente riconducibile all'effetto delle acque di raffreddamento scaricate dalla centrale evitando quindi di collocarli in zone in cui sia presente una sovrapposizione degli effetti di scarichi caldi provenienti da altri impianti industriali. Nel caso della centrale di Torrevaldaliga Nord tali considerazioni portano all'esclusione dei punti che potrebbero essere influenzati termicamente dallo scarico caldo della vicina centrale di Torrevaldaliga Sud, vale a dire da quelli che chiuderebbero l'arco a Sud-Est¹.

Il calcolo dell'incremento termico ΔT sull'arco a 1000 m è stato eseguito con riferimento alla legislazione vigente (Rif. 23 e Rif. 24) in base a cui:

$$\Delta T = (T_c - 2sc) - (T_m + 2sf)$$

dove:

sf = deviazione standard relativa ai 3 punti più freddi dell'arco

sc = deviazione standard relativa alle repliche nel punto più caldo

¹ Peraltro, non è da escludere che i punti selezionati possano risentire anche dei rilasci del vicino impianto di Torrevaldaliga Sud, specialmente in presenza di una corrente ambientale diretta verso NO.

T_m = temperatura media dei tre punti più freddi dell'arco
 T_c = temperatura media relativa alle repliche nel punto più caldo
 ΔT = incremento termico nel punto più caldo dell'arco (massimo: 3 °C).

6.3 Scenari di calibrazione

La *taratura o calibrazione* di un modello matematico consente la messa a punto dei parametri, delle condizioni ai contorni e degli elementi agenti nel sito in esame affinché il modello possa riprodurre al meglio e con sufficiente accuratezza la realtà.

Nel caso specifico sono state riprodotte le condizioni ambientali e termiche riscontrate durante tre campagne di monitoraggio eseguite al largo della centrale Enel di Torrevaldaliga Nord, come riassunto in Tabella 3 e dettagliatamente spiegato nel seguito.

6.3.1 Scenario A (calibrazione estiva)

Lo scenario A ha riprodotto le condizioni termiche, ambientali e di assetto osservate il 19 luglio dell'anno 2017 tra le 09:17 e le 09:42 ai punti di controllo sull'arco a 1000 m dal diffusore di scarico della centrale di TVN; in particolare:

1. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Nord (Enel Produzione):*
 - funzionamento prossimo al pieno carico (circa 1894 MW); Q pompe AC: 73.5 m³/s,
 - Δ termico allo scarico pari a 8.3 °C.
2. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Sud (Tirreno Power):*
 - funzionamento a carico ridotto (circa il 37% del carico nominale massimo con TGA 148.3 MW, TGB 42.4 MW e TGC fermo; da Rif. 26); Q pompe AC: 12.6 m³/s,
 - Δ termico allo scarico mantenuto conservativamente pari a 5.3 °C.
3. *parametri ambientali:*
 - condizione estiva caratterizzata da calma di vento e mare calmo;
 - temperatura T dell'aria = 26 °C e umidità relativa = 80%;
 - corrente ambientale entrante dal contorno Sud del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) variabile secondo il profilo verticale illustrato in Figura 4;
 - T indisturbata iniziale del corpo idrico ricettore assunta pari a quella della corrente ambientale (Figura 11 a destra).

I parametri ambientali descritti presentano una condizione meteomarina, frequente per l'area in esame, caratterizzata da una corrente ambientale diretta verso Nord-Ovest. Tale circostanza è chiaramente visibile dall'andamento delle temperature superficiali ai punti di controllo sull'arco a 1000 m riscontrabile in Figura 24: le misure condotte la mattina del 19 luglio 2017, in blu nel grafico, evidenziano l'interessamento dei soli punti dal n. 1 al n. 10 confermando la deviazione del pennacchio caldo verso Nord-Ovest. Lo scenario riproduce, inoltre, condizioni complessivamente critiche per le tematiche in oggetto: temperature elevate estive e assenza di vento di superficie, che implicano un limitato scambio termico con l'atmosfera, combinate al funzionamento a pieno carico dell'impianto di TVN.

La Figura 25, la Figura 26 e la Figura 27 mostrano, rispettivamente, la mappa termica superficiale, il profilo termico verticale in asse al pennacchio ed il campo di moto

superficiale calcolati al termine della simulazione di calibrazione, al raggiungimento della condizione di stazionarietà.

L'analisi delle figure consente di osservare chiaramente:

- la deviazione del pennacchio caldo verso Nord-Ovest operata dalla corrente ambientale che prevale sulla corrente generata dallo scarico a mano a mano che ci si allontana dal punto di diffusione a riva; le isoterme più esterne del pennacchio, inferiori a 27 °C, si dispongono praticamente parallele alla riva (Figura 25);
- la penetrazione in profondità (Figura 26) della perturbazione termica che si mantiene nei primi metri della colonna d'acqua; tale circostanza, unitamente alla deviazione del pennacchio di TVN verso Nord-Ovest e al contenimento tra il molo carboni e il perimetro della nuova area tombata in ingresso al porto di Civitavecchia della perturbazione generata da TVS, evita il verificarsi di fenomeni di ricircolo di acque calde alla presa di TVN;
- l'effetto di ridosso operato dalla diga foranea del porto di Civitavecchia nell'area dello scarico di TVS: la corrente generata dallo scarico si esaurisce fino ad annullarsi nell'area di intersezione con la corrente ambientale proveniente da Sud-Est; ciò comporta il contenimento in direzione *offshore* della perturbazione termica indotta dallo scarico di TVS, già limitato all'origine in virtù del funzionamento ridotto dell'impianto (Figura 25);
- lo scarico della centrale di TVN costituisce, nella metà più vicina a riva, un ostacolo alla corrente ambientale che piega in un macro-vortice verso i torrini di presa e verso il molo carboni a servizio della centrale (Figura 27); tale deviazione, peraltro, non comporta ricircoli verso la presa di TVN ma, solo superficialmente, un allargamento verso riva sul lato sinistro del pennacchio.

La Figura 24 mette a confronto le misure di temperatura nei punti di controllo sull'arco a 1000 m con le temperature calcolate nei medesimi punti al termine dello scenario di taratura estiva. L'aderenza dei valori calcolati a quelli misurati appare buona, con l'eccezione del punto 11 in cui la temperatura calcolata supera quella misurata di quasi tre gradi.

La Tabella 5, infine, mostra il calcolo del delta termico sull'arco a 1000 m in base ai valori calcolati al termine della taratura secondo la procedura di legge descritta al precedente paragrafo 6.2. Il delta termico da dati calcolati è pari a 2.89 °C, mentre quello ricavato in base alle misure eseguite il 19 luglio 2017 è pari a 2 °C. Si fa osservare che, diversamente dalla procedura di legge che prevede 10 misure di replica della temperatura nel punto più caldo dell'arco, nel caso di calcolo con mappe termiche derivate da simulazioni numeriche non è possibile eseguire tali repliche. A parità di condizioni, ciò comporta un aumento del delta termico a seguito dell'annullamento del termine 2SC, doppio della deviazione standard relativa alle repliche nel punto più caldo, che andrebbe sottratto nella formula di legge per il calcolo del delta termico.

È dunque possibile concludere che le incertezze della taratura finale e le inevitabili differenze nella procedura di calcolo del parametro di legge ΔT , si traducono in un risultato conservativo per quest'ultimo.

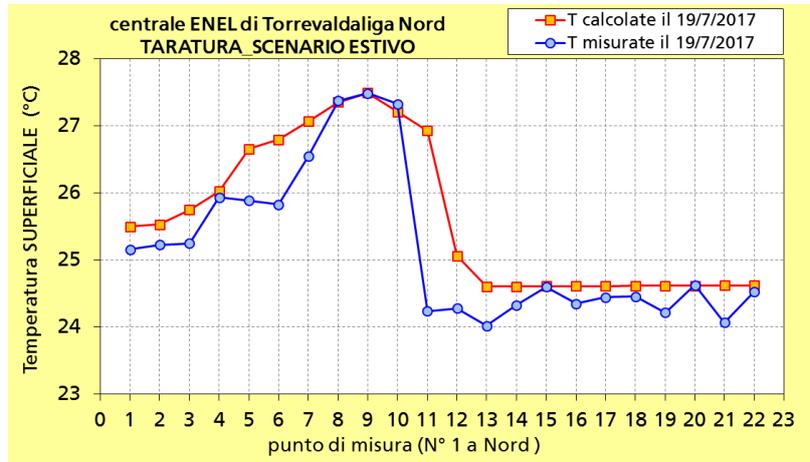


Figura 24 SCENARIO A: taratura ESTIVA. Confronto tra le temperature (°C) calcolate e quelle misurate in corrispondenza dei 22 punti di controllo sull'arco a 1000 m.

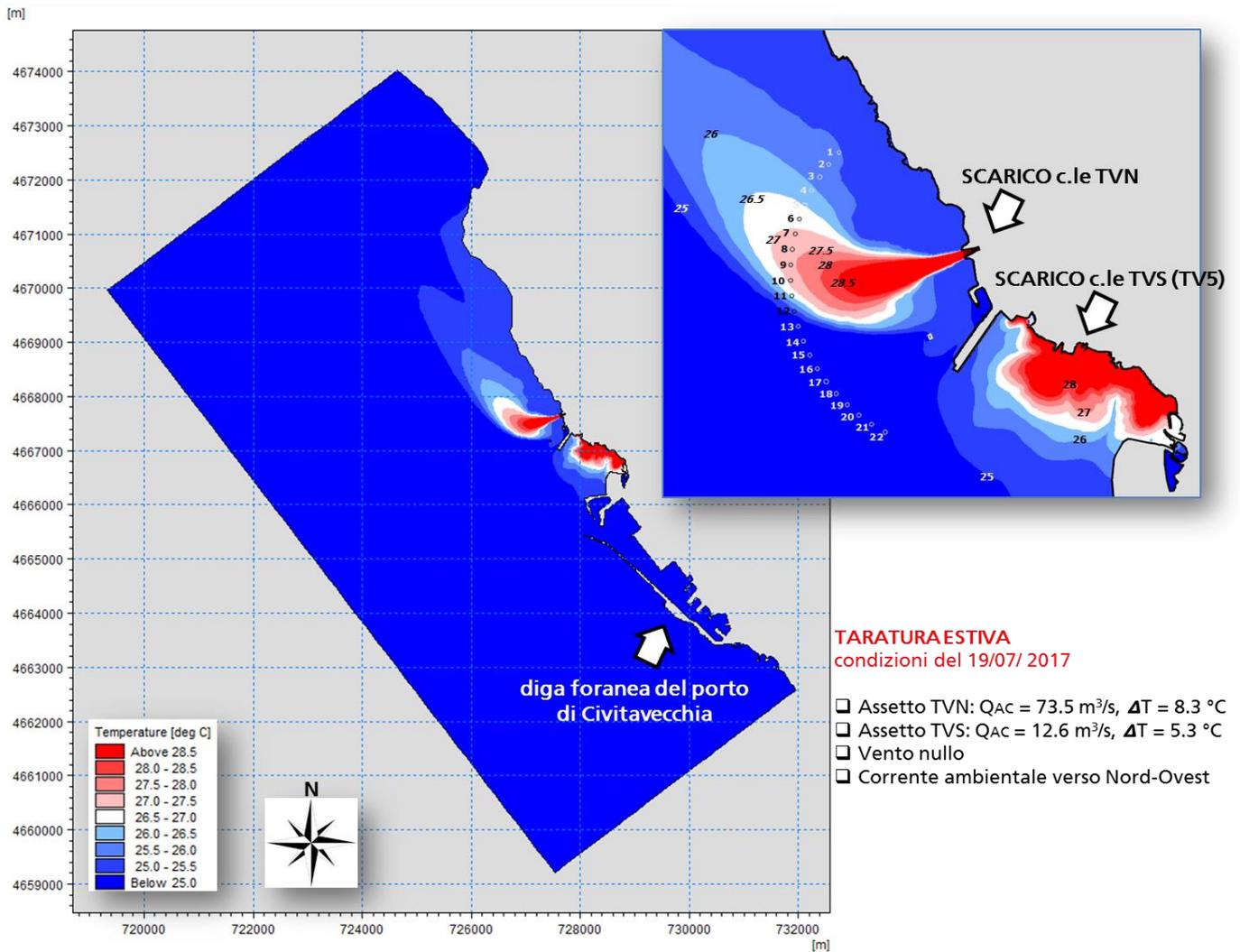


Figura 25 SCENARIO A: taratura ESTIVA. Condizioni del 19 luglio 2017. Mappe di temperatura superficiale (°C).

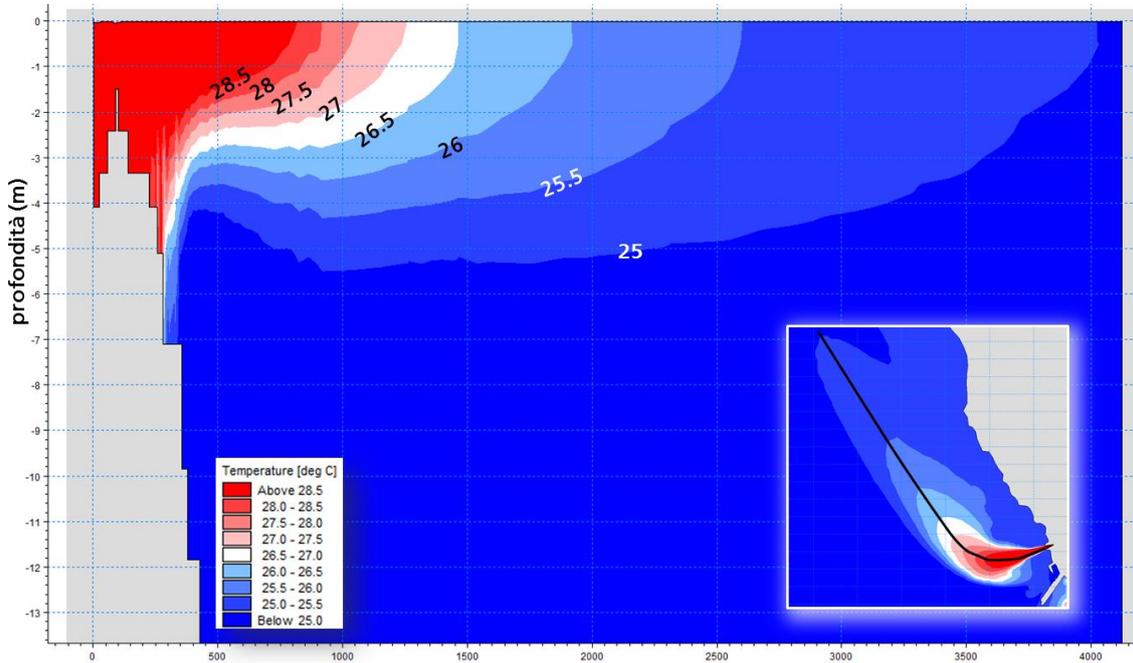


Figura 26 SCENARIO A: taratura ESTIVA. Condizioni del 19 luglio 2017. Profilo verticale di temperatura (°C) in asse al pennacchio caldo della centrale di TVN.

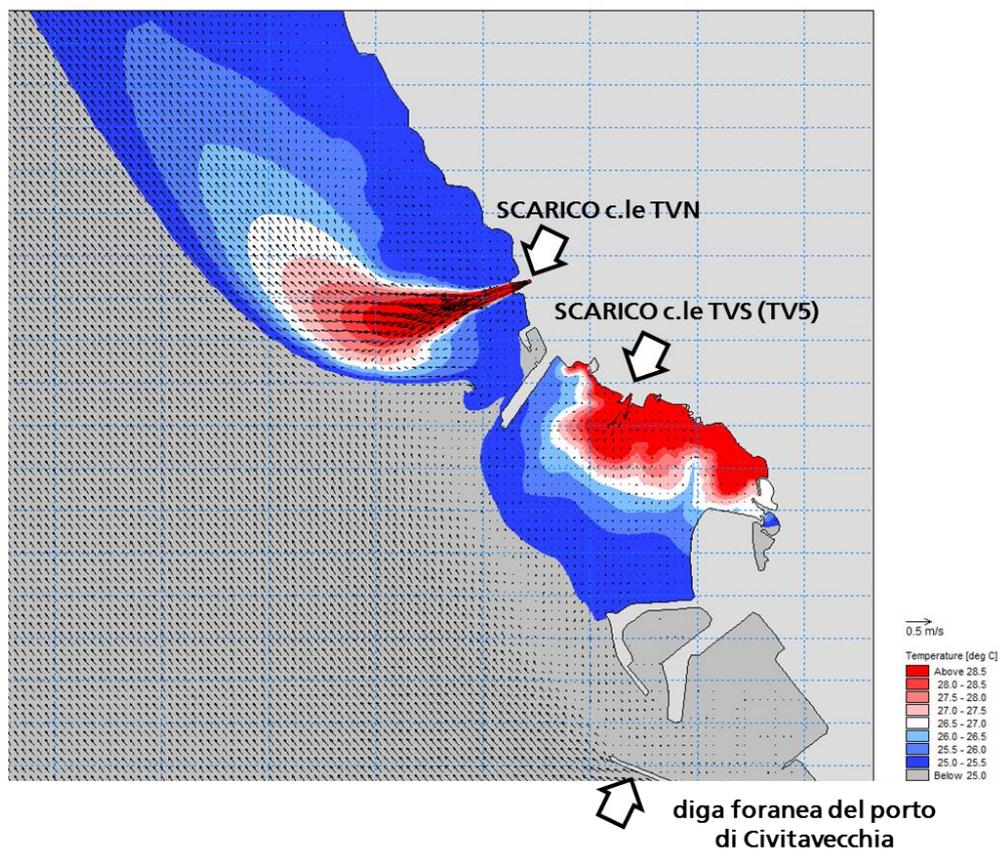


Figura 27 SCENARIO A: taratura ESTIVA. Condizioni del 19 luglio 2017. Campo di moto superficiale (m/s).

Tabella 5 SCENARIO A: taratura ESTIVA. Calcolo dell'incremento termico a 1000 m dal punto di scarico secondo la metodica di legge (Rif. 23 e Rif. 24).

Incremento termico (°C) sull'arco a 1000 m (valori superficiali)				
N. punto	T calcolate il 19/7/2017	Punti C-F		repliche caldi
			Staz. C (Tj) 27.498	0.00
			2SC 0.0000	0.00
1	25.5075			0.00
2	25.5404			0.00
3	25.7688		Staz. F 1 24.606	0.00
4	26.048		Staz. F 2 24.607	0.00
5	26.679		Staz. F 3 24.610	0.00
6	26.8156		Tm 24.608	0.00
7	27.0833		2SF 0.004	0.00
8	27.362		TR = Tm+2SF 24.61	0.00
9	27.4983	C	Incr. term. 2.89	0.00
10	27.2128			
11	26.9247		Incr.Term. = DTj = (Tj - 2SC) - TR	
12	25.0691			
13	24.6054	F1		
14	24.607	F2		
15	24.6094	F3		
16	24.6119			
17	24.6146			
18	24.6164			
19	24.6181			
20	24.6195			
21	24.6209			
22	24.6224			

6.3.2 Scenario B (calibrazione invernale)

Lo scenario B ha riprodotto le condizioni termiche e ambientali osservate il 16 febbraio dell'anno 2017 tra le 09:01 e le 09:49 ai punti di controllo sull'arco a 1000 m dal diffusore di scarico della centrale di TVN; in particolare:

1. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Nord (Enel Produzione):*
 - funzionamento prossimo al pieno carico (circa 1867 MW); Q pompe AC: 68.8 m³/s,
 - Δ termico allo scarico pari a 6.8 °C.
2. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Sud (Tirreno Power):*
 - impianto non operativo (da Rif. 26);
3. *parametri ambientali:*
 - condizione invernale caratterizzata da vento minimo di 2 m/s proveniente da SO (225 °N) e mare calmo;
 - temperatura T dell'aria = 8.2 °C e umidità relativa = 74%;
 - corrente ambientale entrante dal contorno Sud del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) variabile secondo il profilo verticale illustrato in Figura 4;
 - T indisturbata iniziale del corpo idrico ricettore assunta pari a quella della corrente ambientale (Figura 11 a sinistra).

I parametri ambientali descritti presentano una condizione meteomarina, frequente per l'area in esame, caratterizzata da una corrente ambientale diretta verso Nord-Ovest. Tale circostanza è chiaramente visibile dall'andamento delle temperature superficiali ai punti di controllo sull'arco a 1000 m riscontrabile in Figura 28: le misure condotte la mattina del 16 febbraio 2017, in blu nel grafico, evidenziano l'interessamento dei soli punti dal n. 1 al n. 12 confermando la deviazione del pennacchio caldo verso Nord-Ovest. Lo scenario riproduce, inoltre, condizioni complessivamente critiche per le tematiche in oggetto: temperature invernali, che implicano un elevato galleggiamento del pennacchio caldo, combinate al funzionamento a pieno carico dell'impianto di TVN.

La Figura 29, la Figura 30 e la Figura 31 mostrano, rispettivamente, la mappa termica superficiale, il profilo termico verticale in asse al pennacchio ed il campo di moto superficiale calcolati al termine della simulazione di calibrazione, al raggiungimento della condizione di stazionarietà.

L'analisi delle figure consente di osservare chiaramente:

- la deviazione del pennacchio caldo verso Nord-Ovest operata dalla corrente ambientale che prevale sulla corrente generata dallo scarico a mano a mano che ci si allontana dal punto di diffusione a riva; le isoterme più esterne del pennacchio, inferiori a 18 °C, si dispongono praticamente parallele alla riva (Figura 29); l'impronta superficiale della perturbazione termica appare meno estesa di quella riscontrata nel precedente scenario A;
- la penetrazione in profondità (Figura 30) della perturbazione termica che si mantiene nei primi metri della colonna d'acqua; tale circostanza, unitamente alla deviazione del pennacchio di TVN verso Nord-Ovest, evita il verificarsi di fenomeni di ricircolo di acque calde alla presa dell'impianto;

- l'effetto di ridosso operato dalla diga foranea del porto di Civitavecchia nell'area dello scarico di TVS: la corrente generata dallo scarico si esaurisce fino ad annullarsi nell'area di intersezione con la corrente ambientale proveniente da Sud-Est; ciò comporta la creazione di un'ampia area di calma ad Est del molo carboni che si mantiene anche in virtù del mancato funzionamento dei gruppi di TVS (Figura 29);
- lo scarico della centrale di TVN costituisce, nella metà più vicina a riva, un ostacolo alla corrente ambientale che piega in un macro-vortice verso i torrini di presa e verso il molo carboni a servizio della centrale (Figura 31); tale deviazione, peraltro, non comporta ricircoli verso la presa di TVN ma, solo superficialmente, un leggero allargamento verso riva sul lato sinistro del pennacchio.

La Figura 28 mette a confronto le misure di temperatura nei punti di controllo sull'arco a 1000 m con le temperature calcolate nei medesimi punti al termine dello scenario di taratura estiva. L'aderenza dei valori calcolati a quelli misurati appare buona, con differenze massime inferiori al grado.

La Tabella 5, infine, mostra il calcolo del delta termico sull'arco a 1000 m in base ai valori calcolati al termine della taratura secondo la procedura di legge descritta al precedente paragrafo 6.2. Il delta termico da dati calcolati è pari a 2.0 °C, mentre quello ricavato in base alle misure eseguite il 16 febbraio 2017 è pari a 1.5 °C. Si fa nuovamente osservare che, diversamente dalla procedura di legge che prevede 10 misure di replica della temperatura nel punto più caldo dell'arco, nel caso di calcolo con mappe termiche derivate da simulazioni numeriche non è possibile eseguire tali repliche. A parità di condizioni, ciò comporta un aumento del delta termico a seguito dell'annullamento del termine 2SC, doppio della deviazione standard relativa alle repliche nel punto più caldo, che andrebbe sottratto nella formula di legge per il calcolo del delta termico.

È dunque possibile concludere che le incertezze della taratura finale e le inevitabili differenze nella procedura di calcolo del parametro di legge ΔT , si traducono in un risultato conservativo per quest'ultimo.

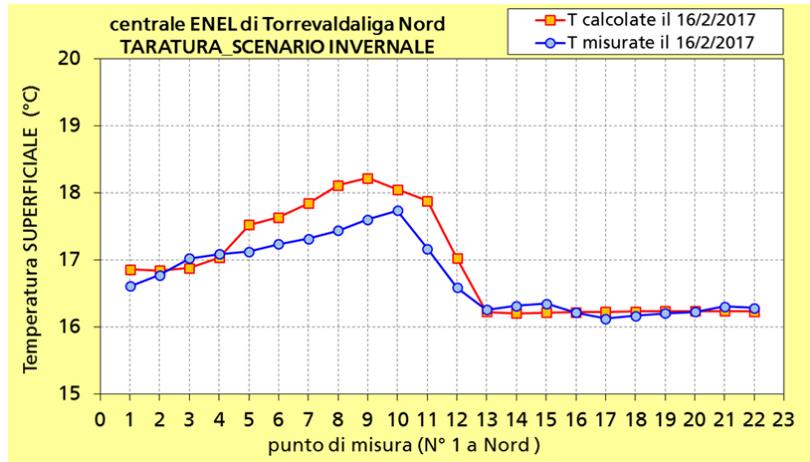


Figura 28 SCENARIO B: taratura INVERNALE. Confronto tra le temperature (°C) calcolate e quelle misurate in corrispondenza dei 22 punti di controllo sull'arco a 1000 m.

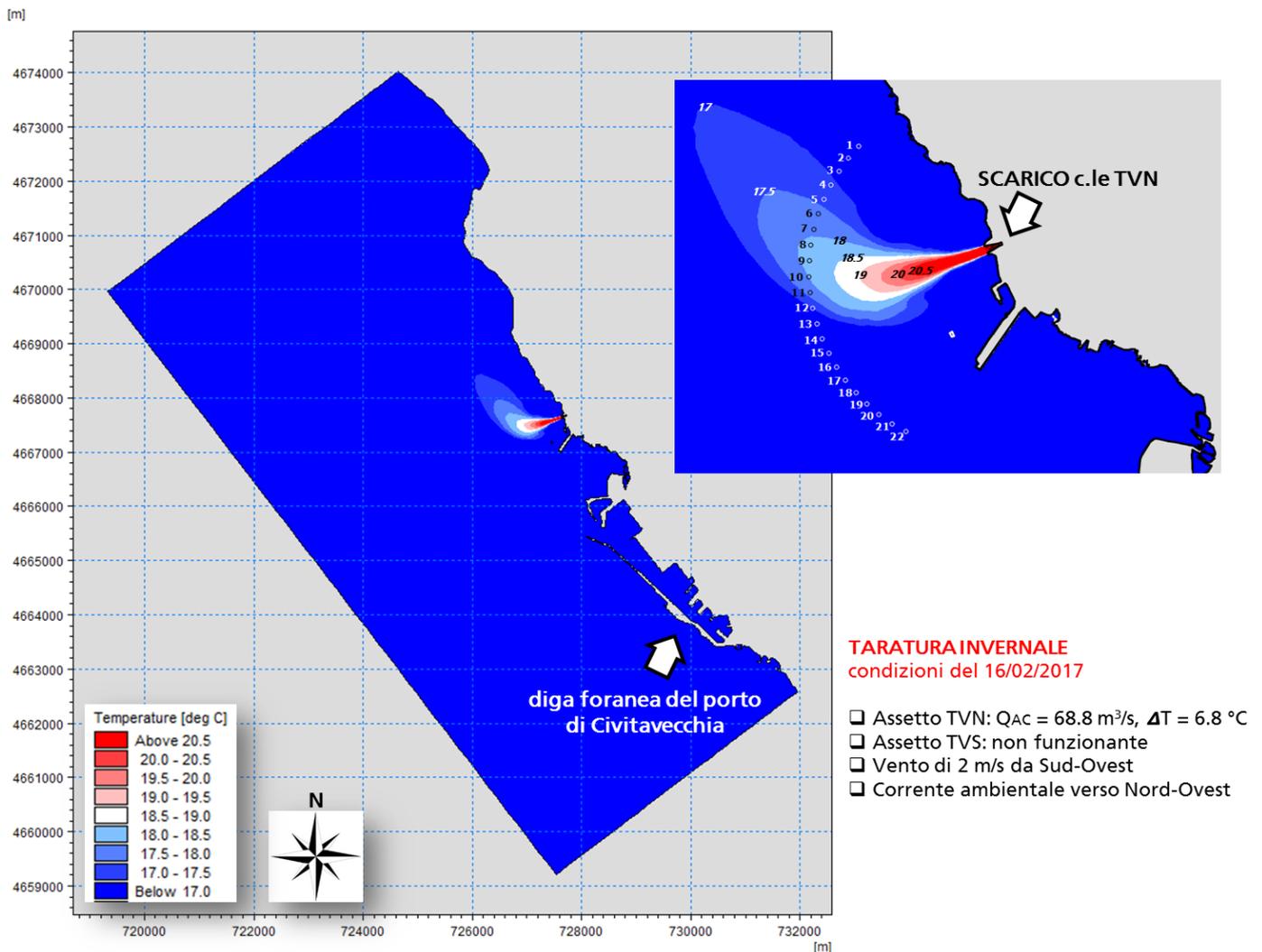


Figura 29 SCENARIO B: taratura INVERNALE. Condiz. del 16 febbraio 2017. Mappe di temperatura superf. (°C).

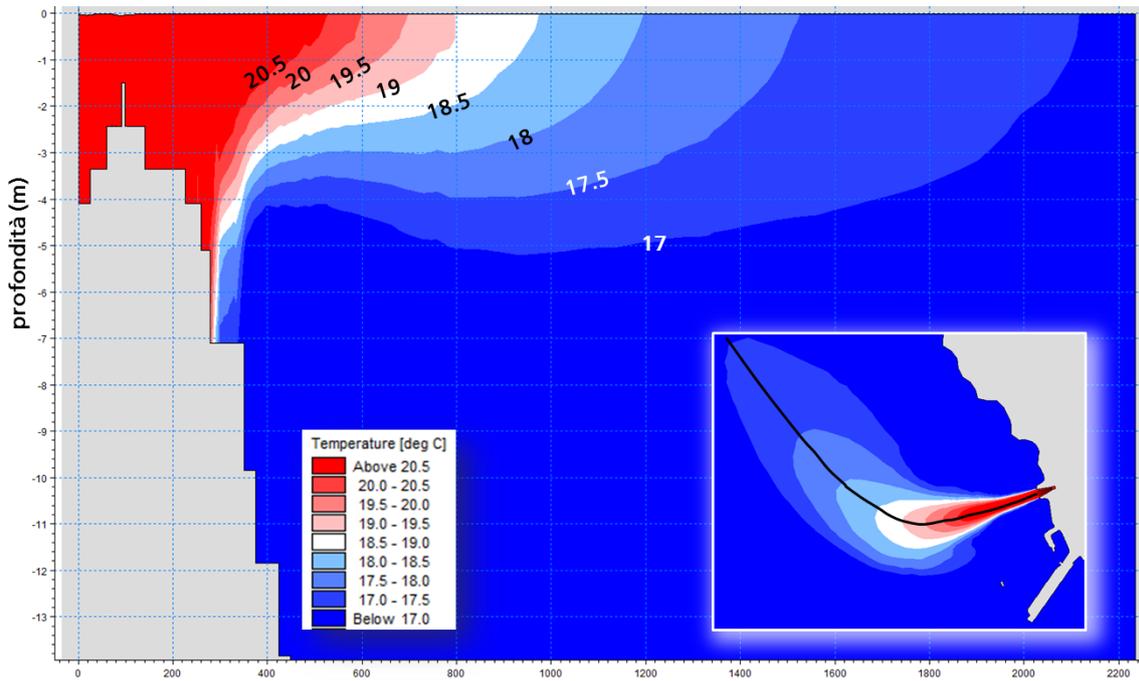


Figura 30 SCENARIO B: taratura INVERNALE. Condizioni del 16 febbraio 2017. Profilo verticale di temperatura (°C) in asse al pennacchio caldo della centrale di TVN.

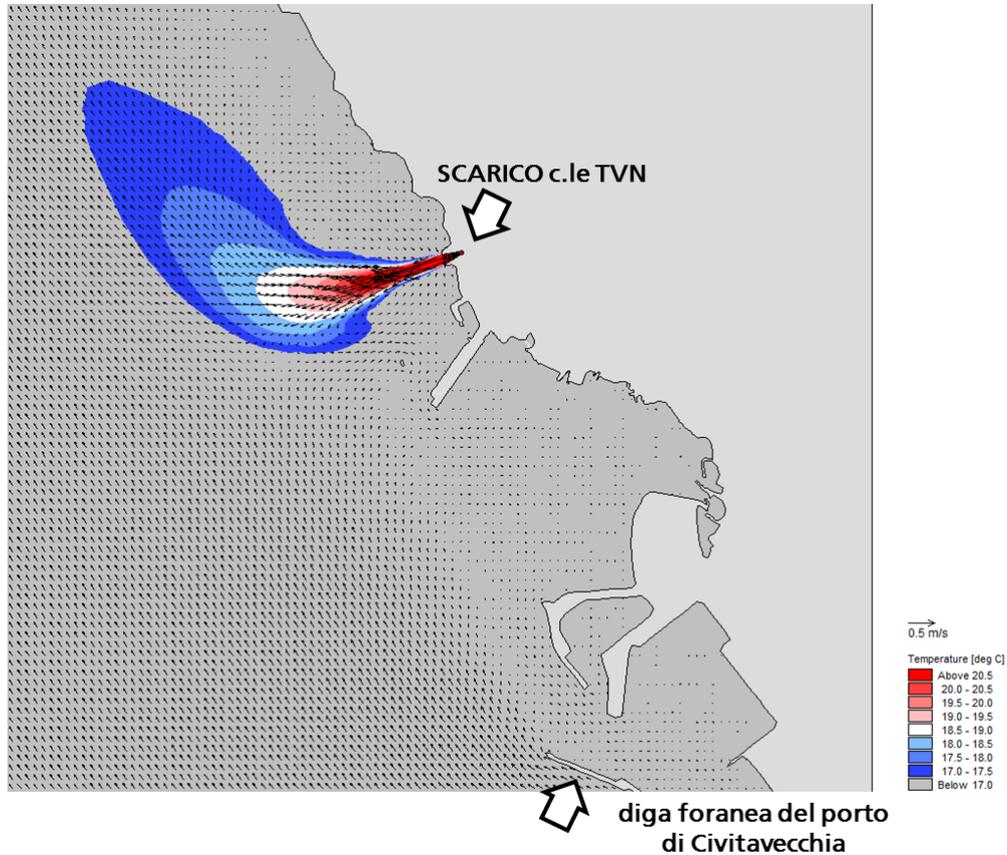


Figura 31 SCENARIO B: taratura INVERNALE. Condizioni del 16 febbraio 2017. Campo di moto superficiale (m/s).

Tabella 6 SCENARIO B: taratura INVERNALE. Calcolo dell'incremento termico a 1000 m dal punto di scarico secondo la metodica di legge (Rif. 23 e Rif. 24).

Incremento termico (°C) sull'arco a 1000 m (valori superficiali)					
N. punto	T calcolate il 16/2/2017	Punti C-F			repliche caldi
1	16.8607	C	Staz. C (Tj)	18.226	0.00
2	16.8462		2SC	0.0000	0.00
3	16.8854		Staz. F 1	16.208	0.00
4	17.0376		Staz. F 2	16.216	0.00
5	17.5266		Staz. F 3	16.221	0.00
6	17.6417		Tm	16.215	0.00
7	17.8479		2SF	0.014	0.00
8	18.1158		TR = Tm+2SF	16.23	0.00
9	18.2258		Incr. term.	2.00	0.00
10	18.0520				
11	17.8864		Incr.Term. = DTj = (Tj - 2SC) - TR		
12	17.0266	F1 F2 F3			
13	16.2269				
14	16.2080				
15	16.2163				
16	16.2214				
17	16.2295				
18	16.2345				
19	16.2384				
20	16.2407				
21	16.2398				
22	16.2359				

6.3.3 Scenario C (calibrazione primaverile)

Lo scenario C ha riprodotto le condizioni termiche e ambientali osservate il 17 aprile dell'anno 2013 tra le 08:30 e le 09:40 ai punti di controllo sull'arco a 1000 m dal diffusore di scarico della centrale di TVN; in particolare:

1. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Nord (Enel Produzione):*
 - funzionamento medio carico (circa 1150 MW); Q pompe AC: 44.9 m³/s,
 - Δ termico allo scarico pari a 5 °C.
2. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Sud (Tirreno Power):*
 - impianto considerato non operativo (la direzione della corrente ambientale rende ininfluyente la simulazione dello scarico di TVS);
3. *parametri ambientali:*
 - condizione primaverile caratterizzata da vento minimo di 1.5 m/s proveniente da NE (45 °N) e mare calmo;
 - temperatura T dell'aria = 17.1 °C e umidità relativa = 57%;
 - corrente ambientale entrante dal contorno Nord del dominio di calcolo (diretta verso SE con riferimento alle coordinate geografiche) costante lungo il profilo verticale e pari a 0.05 m/s;
 - T indisturbata iniziale del corpo idrico ricettore assunta pari a quella della corrente ambientale (Figura 11 al centro).

I parametri ambientali descritti presentano una condizione meteomarina, tipica per l'area in esame, caratterizzata da una corrente ambientale diretta verso Sud-Est. Tale circostanza è chiaramente visibile dall'andamento delle temperature superficiali ai punti di controllo sull'arco a 1000 m riscontrabile in Figura 32: le misure condotte la mattina del 17 aprile 2013, in blu nel grafico, evidenziano l'interessamento dei soli punti dal n. 9 al n. 22 confermando la deviazione del pennacchio caldo verso Sud-Est. Lo scenario riproduce, inoltre, condizioni complessivamente critiche per le tematiche in oggetto: temperature ancora fredde (invernali), che implicano un elevato galleggiamento del pennacchio caldo; diversamente dai due test di taratura precedenti, l'impianto di TVN funzionava al 60 % circa delle condizioni di massimo carico nominale.

La Figura 33, la Figura 34 e la Figura 35 mostrano, rispettivamente, la mappa termica superficiale, il profilo termico verticale in asse al pennacchio ed il campo di moto superficiale calcolati al termine della simulazione di calibrazione, al raggiungimento della condizione di stazionarietà.

L'analisi delle figure consente di osservare chiaramente:

- la deviazione del pennacchio caldo verso Sud-Est operata dalla corrente ambientale che prevale sulla corrente generata dallo scarico a mano a mano che ci si allontana dal punto di diffusione a riva; le isoterme più esterne del pennacchio si dispongono praticamente parallele alla riva (Figura 33); in virtù del funzionamento ridotto dell'impianto, l'impronta superficiale della perturbazione termica appare meno estesa di quelle riscontrate nei due precedenti scenari A e B;
- la penetrazione in profondità (Figura 34) della perturbazione termica che si mantiene nei primi metri della colonna d'acqua; tale circostanza, unitamente al funzionamento a ciclo ridotto dell'impianto, evita il verificarsi di fenomeni di ricircolo di acque calde alla presa dell'impianto;

- l'effetto di ridosso operato dal pennacchio stesso, prima, e dal molo carboni, poi, nell'area dello scarico di TVS: la corrente generata dallo scarico di TVN si esaurisce fino ad annullarsi nell'area di intersezione con la corrente ambientale proveniente da Nord-Ovest; ciò comporta la creazione di un'ampia area di calma ad Est del molo carboni che si mantiene anche in virtù del mancato funzionamento dei gruppi di TVS (Figura 33 e Figura 35);
- lo scarico della centrale di TVN costituisce, nella metà più vicina a riva, un ostacolo alla corrente ambientale che riesce a piegare il pennacchio verso i torrioni di presa e verso il molo carboni a servizio della centrale (Figura 35); tale deviazione, peraltro, non comporta ricircoli verso la presa di TVN come precedentemente osservato.

La Figura 32 mette a confronto le misure di temperatura nei punti di controllo sull'arco a 1000 m con le temperature calcolate nei medesimi punti al termine dello scenario di taratura estiva. L'aderenza dei valori calcolati a quelli misurati appare buona, con differenze massime, comunque inferiori al grado, localizzate nei punti a nord più vicini a riva.

La Tabella 7, infine, mostra il calcolo del delta termico sull'arco a 1000 m in base ai valori calcolati al termine della taratura secondo la procedura di legge descritta al precedente paragrafo 6.2. Il delta termico risultante dalle temperature calcolate è pari a 0.79 °C, mentre quello ricavato in base alle misure eseguite il 17 aprile 2013 è pari a 1.09 °C. Si fa nuovamente osservare che, diversamente dalla procedura di legge che prevede 10 misure di replica della temperatura nel punto più caldo dell'arco, nel caso di calcolo con mappe termiche derivate da simulazioni numeriche non è possibile eseguire tali repliche. A parità di condizioni, ciò comporta un aumento del delta termico a seguito dell'annullamento del termine 2SC, doppio della deviazione standard relativa alle repliche nel punto più caldo, che andrebbe sottratto nella formula di legge per il calcolo del delta termico.

È dunque possibile concludere che le incertezze della taratura finale e le inevitabili differenze nella procedura di calcolo del parametro di legge ΔT , si traducono in un risultato non conservativo per quest'ultimo, diversamente da quanto riscontrato nei due precedenti test. Peraltro, la condizione qui simulata produce risultati di ΔT largamente inferiori al limite di legge di 3 °C, sia nelle misure sia nei risultati del codice.

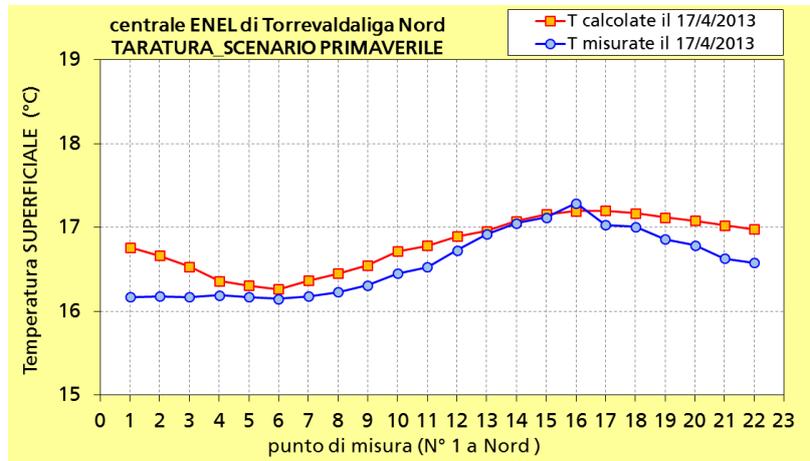


Figura 32 SCENARIO C: taratura PRIMAVERILE. Confronto tra le temperature (°C) calcolate e quelle misurate in corrispondenza dei 22 punti di controllo sull'arco a 1000 m.

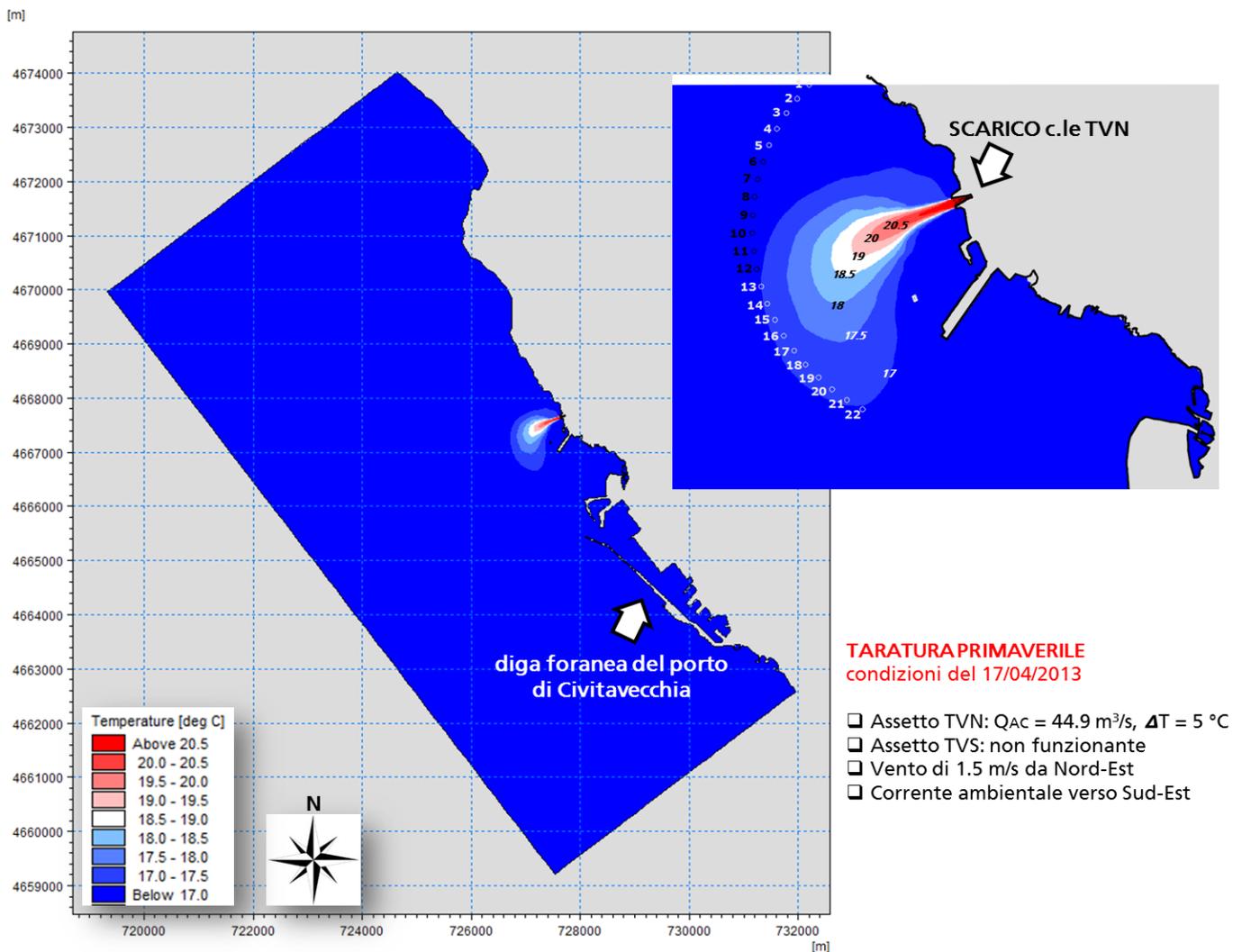


Figura 33 SCENARIO C: taratura PRIMAVERILE. Condiz. del 17 aprile 2013. Mappe di temperatura superf. (°C).

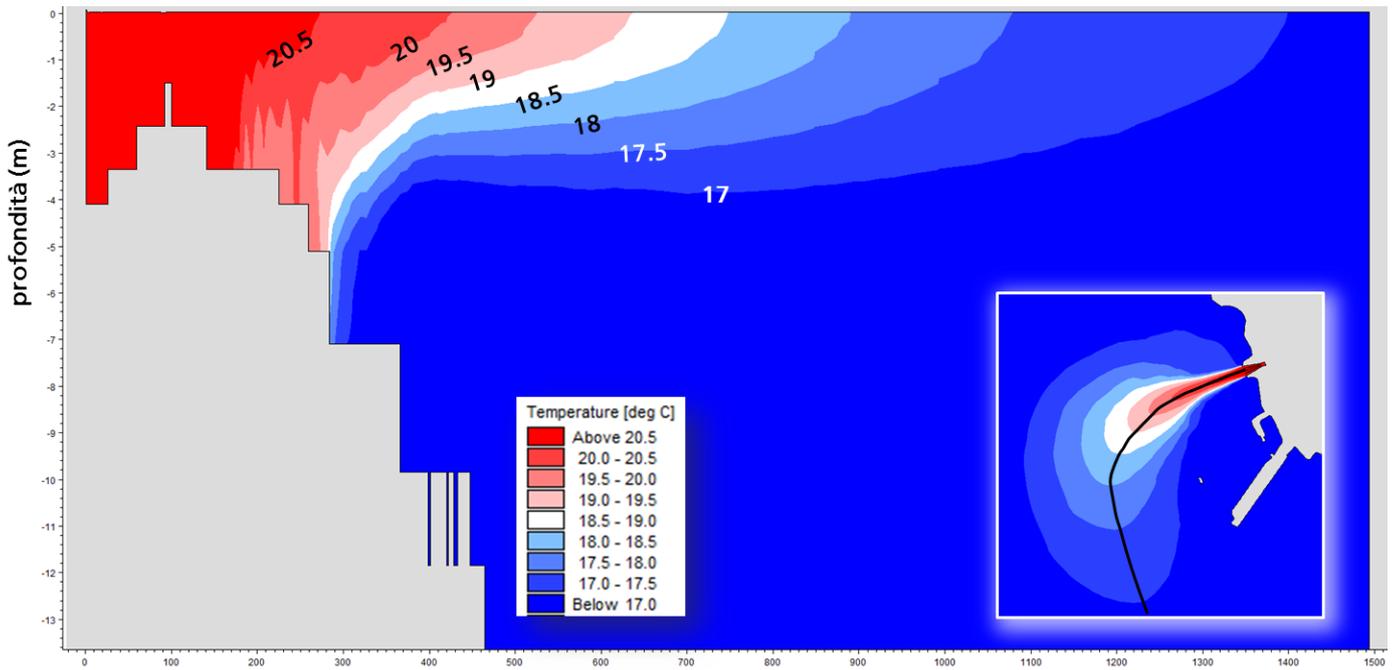


Figura 34 SCENARIO C: taratura PRIMAVERILE. Condizioni del 17 aprile 2013. Profilo verticale di temperatura (°C) in asse al pennacchio caldo della centrale di TVN.

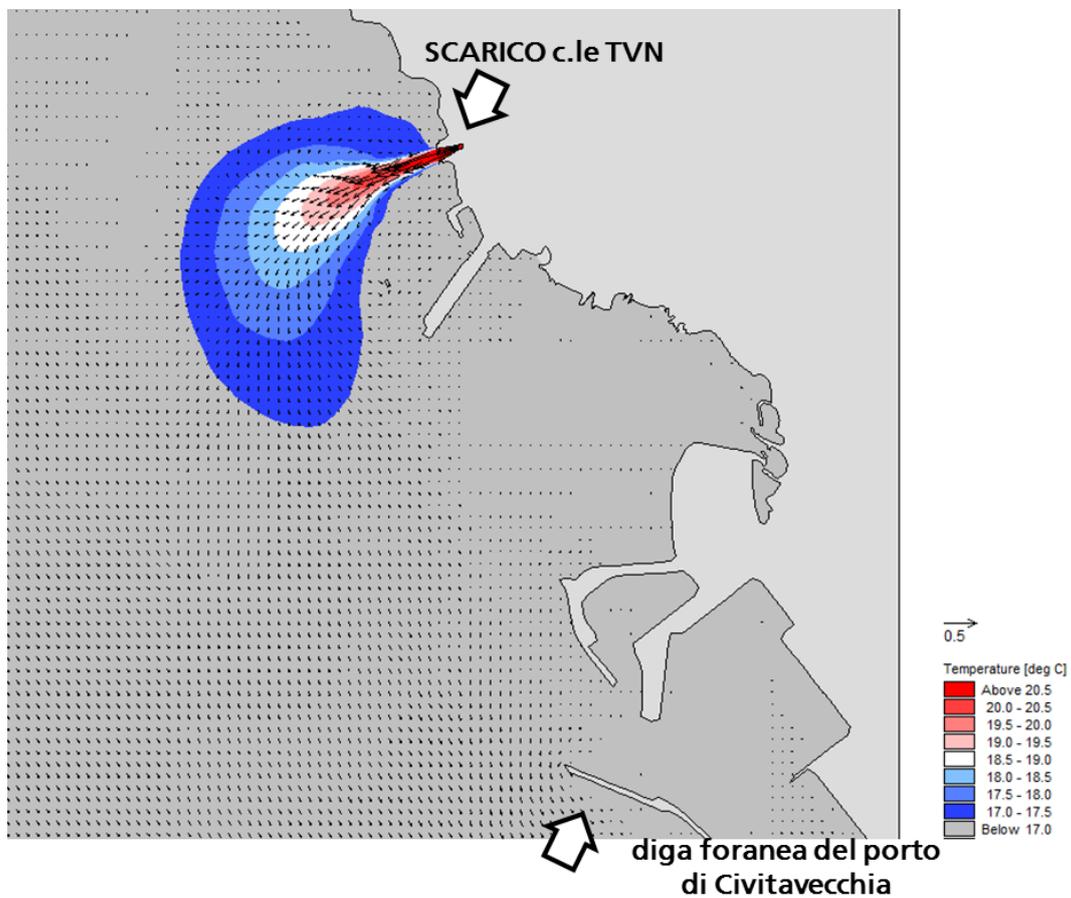


Figura 35 SCENARIO C: taratura PRIMAVERILE. Condizioni del 17 aprile 2013. Campo di moto superficiale (m/s).

Tabella 7 SCENARIO C: taratura PRIMAVERILE. Calcolo dell'incremento termico a 1000 m dal punto di scarico secondo la metodica di legge (Rif. 23 e Rif. 24).

Incremento termico (°C) sull'arco a 1000 m (valori superficiali)					
N. punto	T calcolate il 17/4/2013	Punti C-F			repliche caldi
1	16.7625		Staz. C (Tj)	17.201	0.00
2	16.6651		2SC	0.0000	0.00
3	16.5321		Staz. F 1	16.265	0.00
4	16.3633	F3	Staz. F 2	16.308	0.00
5	16.3078	F2	Staz. F 3	16.363	0.00
6	16.2649	F1	Tm	16.312	0.00
7	16.3658		2SF	0.099	0.00
8	16.4537		TR = Tm+2SF	16.41	0.00
9	16.5492		Incr. term.	0.79	0.00
10	16.7164		Incr.Term. = DTj = (Tj - 2SC) - TR		
11	16.7844				
12	16.8951				
13	16.9588				
14	17.0789				
15	17.1588				
16	17.1956				
17	17.2014	C			
18	17.1695				
19	17.1216				
20	17.0837				
21	17.0265				
22	16.9784				

6.4 Scenari di previsione

Fermo restando quanto osservato riguardo le inevitabili diversità alla base dei due approcci, numerico e sperimentale, si è assunto come definitivo l'insieme dei parametri di calibrazione che ha prodotto i risultati presentati al precedente capitolo. Si tratta, tra l'altro, dei parametri/coefficienti di viscosità turbolenta (*eddy viscosity*) e di dispersione termica entrambi da caratterizzare in direzione verticale e orizzontale.

Gli scenari previsionali elencati nella Tabella 4 e di seguito illustrati adottano, quindi, i medesimi valori dei parametri/coefficienti utilizzati per la calibrazione dei profili termici misurati a 1000 m dallo scarico, coerentemente con la condizione ambientale simulata.

La descrizione dei singoli scenari ricalca le modalità già adottate per gli scenari di calibrazione e si avvale di mappe di temperatura superficiale, di profili termici verticali (ricavati in asse al pennacchio caldo e lungo transetti trasversali a riva), di mappe del campo di moto superficiale e dell'analisi puntuale della temperatura superficiale nei 22 punti di controllo sull'arco a 1000 m dallo scarico per la verifica dei vincoli di legge vigenti in materia.

6.4.1 Scenario 1: estate, TVN a carbone

Lo scenario 1 ha riprodotto le condizioni ambientali e di assetto impianti qui di seguito elencate:

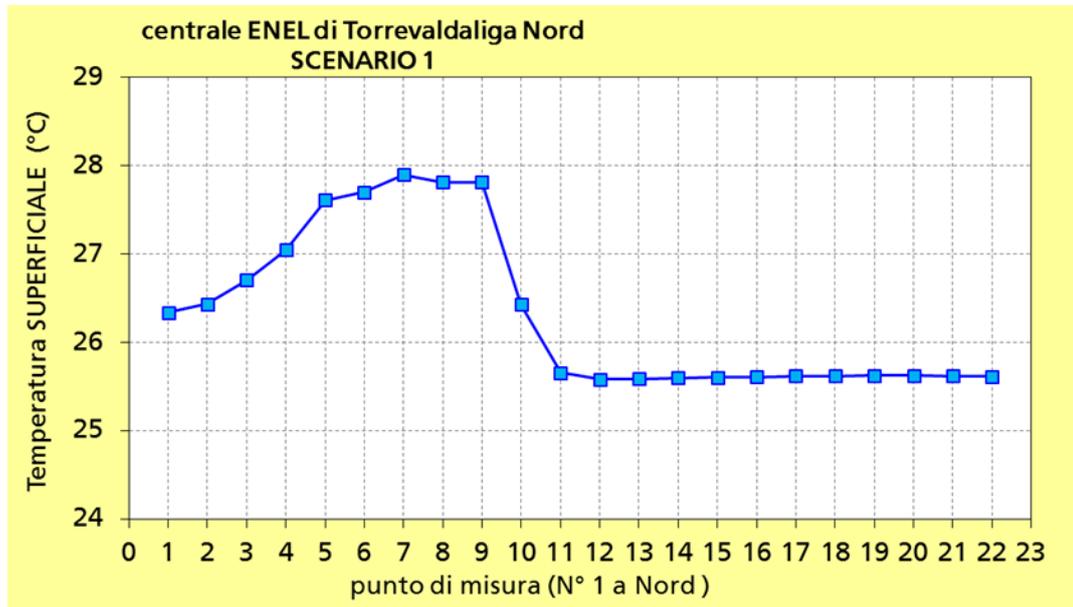
1. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Nord (Enel Produzione):*
 - attuale a carbone;
 - funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 73.5 m³/s; scarico attraverso tutti i quattro canali del diffusore;
 - Δ termico allo scarico pari a 7.65 °C;
2. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Sud (Tirreno Power):*
 - TV5: funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 15.6 m³/s e Δ termico allo scarico pari a 7.7 °C,
 - TV6: funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 15.6 m³/s e Δ termico allo scarico pari a 5.3 °C;
3. *parametri ambientali:*
 - condizione estiva caratterizzata da vento con provenienza Sud (180 °N) di intensità pari a 3 m/s e mare calmo;
 - temperatura T dell'aria = 26 °C e umidità relativa = 80%;
 - corrente ambientale entrante dal contorno Sud del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) variabile secondo il profilo verticale illustrato in Figura 4;
 - T indisturbata iniziale del corpo idrico ricettore assunta pari a quella della corrente ambientale illustrata in Figura 10 (a destra).

Le figure seguenti illustrano in particolare:

- la temperatura calcolata ai 22 punti dell'arco (Figura 36, in alto) e il corrispondente calcolo dell'incremento termico di legge (Figura 36, in basso) evidenziano il maggiore interessamento dei punti della metà superiore dell'arco (T_{max} calcolata in corrispondenza del punto 7) con un delta termico complessivo pari a 2.29 °C

inferiore al limite di legge di 3 °C; la leggera diminuzione della temperatura superficiale indisturbata di 26 °C (imposta alla corrente ambientale diretta verso NO) riscontrabile ai punti più a Sud dell'arco, non raggiunti dal pennacchio caldo, è probabilmente imputabile alla dispersione termica verticale;

- le mappe della temperatura superficiale, illustrate in Figura 37, evidenziano la deviazione del pennacchio di TVN concordemente all'andamento della corrente ambientale adottata; il pennacchio, infatti, tende ad allungarsi in direzione Nord-Ovest e a disporsi parallelamente alla linea di riva con particolare riferimento alle isoterme più avanzate, cioè quelle a minore incremento termico rispetto alla temperatura ambientale indisturbata; le isoterme più interne del pennacchio, a cui corrispondono i maggiori incrementi di temperatura rispetto alla condizione indisturbata, invece, si mantengono perpendicolari a riva senza però raggiungere i punti dell'arco; nella medesima figura si osserva il contenimento del pennacchio termico di TVS, specie nel suo nucleo più caldo, operato dal pontile carboni di TVN, a Nord, dal nuovo profilo in avanzamento assunto negli anni recenti dalla costa, a Sud, e dalla corrente ambientale in direzione *offshore*;
- il profilo mostrato in Figura 38 descrive la penetrazione della perturbazione termica indotta dallo scarico nel battente idrico in direzione verticale; il profilo, ricavato in asse al pennacchio come indicato nella pianta in basso a destra della figura, mostra chiaramente il galleggiamento del pennacchio caldo con interessamento dell'intero battente fino a breve distanza (200 m) dal lato esterno del diffusore; il nucleo interno più caldo (con temperatura superiore di oltre 2 °C rispetto a quella indisturbata superficiale di 26 °C) si estende, in superficie e in asse al pennacchio, per circa 950 m andando rapidamente ad assottigliarsi. La distanza superficiale, sempre misurata in asse al pennacchio, interessata da una perturbazione termica è di circa 3 km; la massima profondità raggiunta dal pennacchio è di poco inferiore a 5 m;
- il secondo profilo verticale in Figura 39 è stato ricavato lungo un transetto perpendicolare a riva collocato 200 m a Nord dell'asse del diffusore, come illustrato in basso a destra nell'immagine; l'impronta della perturbazione termica si manifesta a partire dalla riva e presenta un'estensione superficiale di poco più di 1 km e una profondità massima di circa 5 m; il nucleo più caldo della perturbazione raggiunge una temperatura compresa tra 28.5 e 29 °C (da 2.5 a 3 °C oltre i 26 °C indisturbati superficiali) con estensione superficiale di 200 m e profondità massima di poco superiore a 1 m;
- la Figura 40 mostra l'andamento del campo di moto superficiale nell'area di interesse ed evidenzia sia l'effetto di ridosso operato dalla diga foranea del porto di Civitavecchia, sia quello prodotto dal pennacchio stesso di TVN sulla corrente ambientale; la combinazione dei due effetti si traduce in una doppia deviazione della corrente ambientale secondo le due traiettorie schematicamente illustrate dalle frecce in figura; ne deriva un ripiegamento del pennacchio di TVN verso i propri torrini di presa e il molo carboni; i torrini sono raggiunti anche dalle isoterme più esterne del pennacchio di TVS; peraltro, la perturbazione si mantiene a livello superficiale evitando il ricircolo di acqua calda alla presa dell'impianto di TVN, come conferma il profilo verticale quasi indisturbato di Figura 41 ricavato proprio in asse ai torrini di presa dell'impianto di TVN.



Incremento termico (°C) sull'arco a 1000 m (valori superficiali)				repliche caldi	
N. punto	T calcolate	Punti C-F			
1	26.3345	C	Staz. C (Tj) 27.894	0.00	
2	26.4298		25C 0.0000	0.00	
3	26.7028		Staz. F 1 25.577	0.00	
4	27.0396		Staz. F 2 25.585	0.00	
5	27.6076		Staz. F 3 25.593	0.00	
6	27.6982		Tm 25.585	0.00	
7	27.8939		25F 0.017	0.00	
8	27.8072		TR = Tm+25F 25.60	0.00	
9	27.8077		Incr. term. 2.29	0.00	
10	26.4228		Incr.Term. = DTj = (Tj - 25C) - TR		
11	25.6523	F1 F2 F3			
12	25.5768				
13	25.5849				
14	25.5934				
15	25.6009				
16	25.6056				
17	25.6134				
18	25.6176				
19	25.6204				
20	25.621				
21	25.6178				
22	25.6104				

Figura 36 **SCENARIO 1** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a carbone e TVS operativo). Temperature (°C) calcolate in corrispondenza dei 22 punti di controllo sull'arco a 1000 m, in alto, e, in basso, calcolo dell'incremento termico a 1000 m dal punto di scarico secondo la metodica di legge (Rif. 23 e Rif. 24).

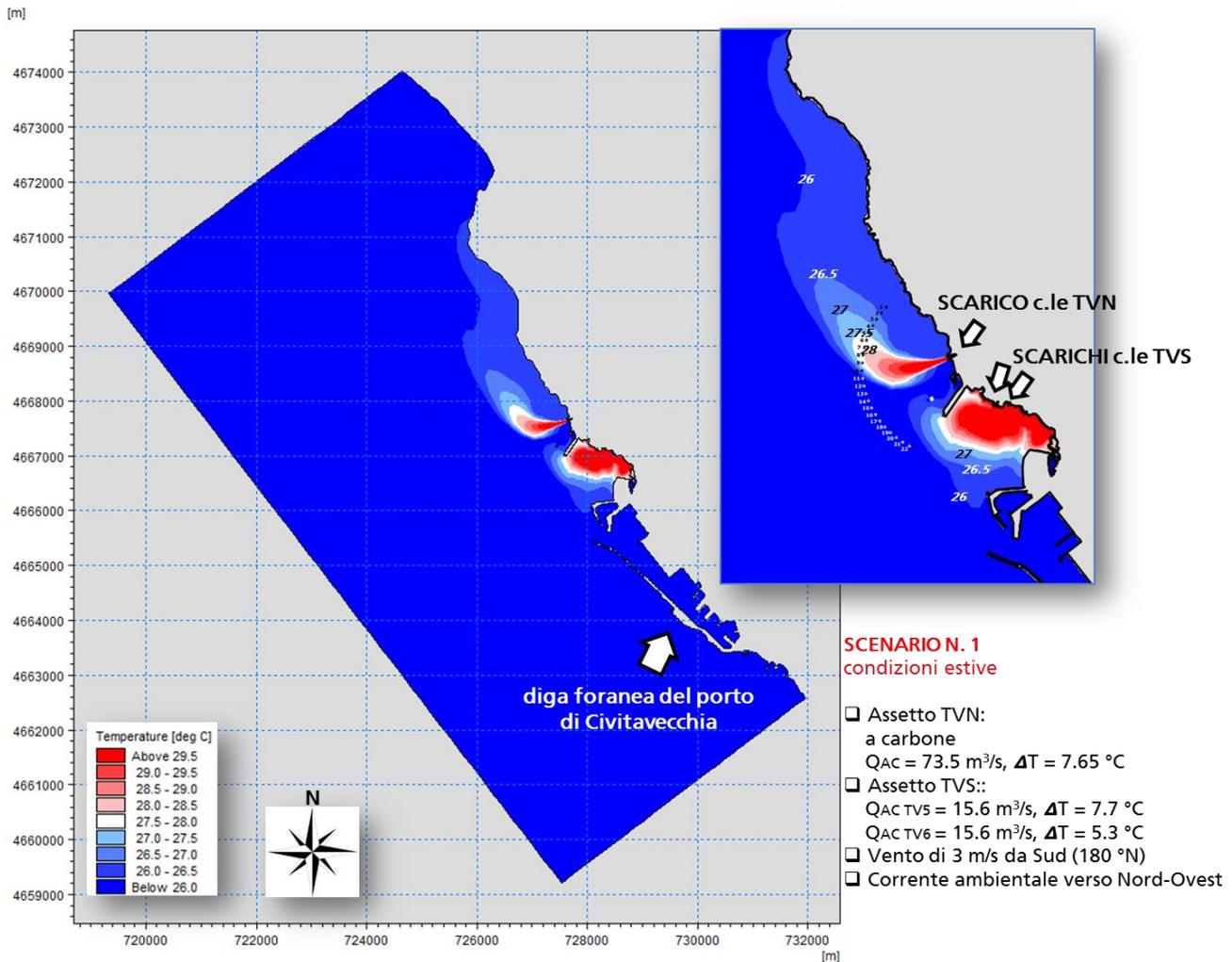


Figura 37 **SCENARIO 1** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a carbone e TV5 operativo). Mappe di temperatura superficiale (°C).

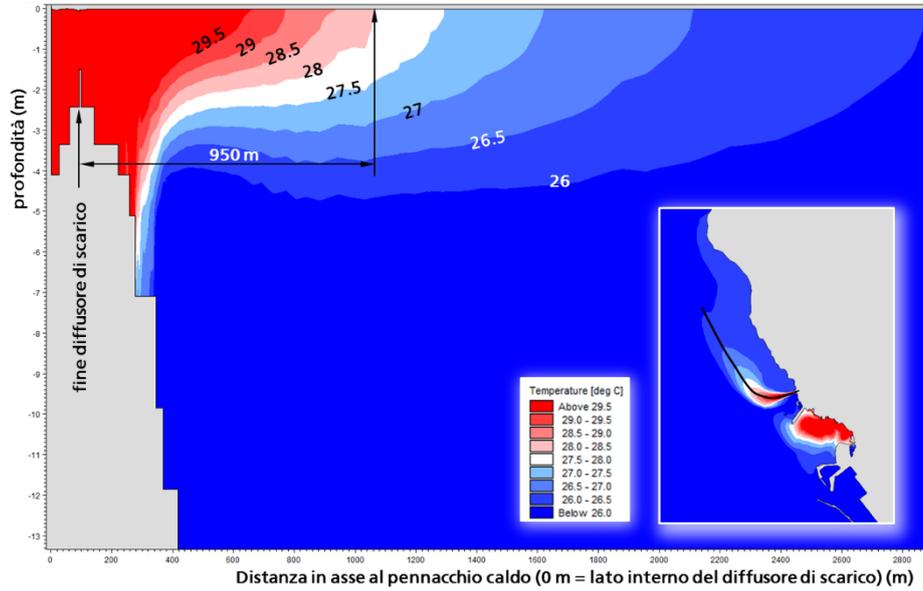


Figura 38 **SCENARIO 1** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a carbone e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) in asse al pennacchio caldo della centrale di TVN.

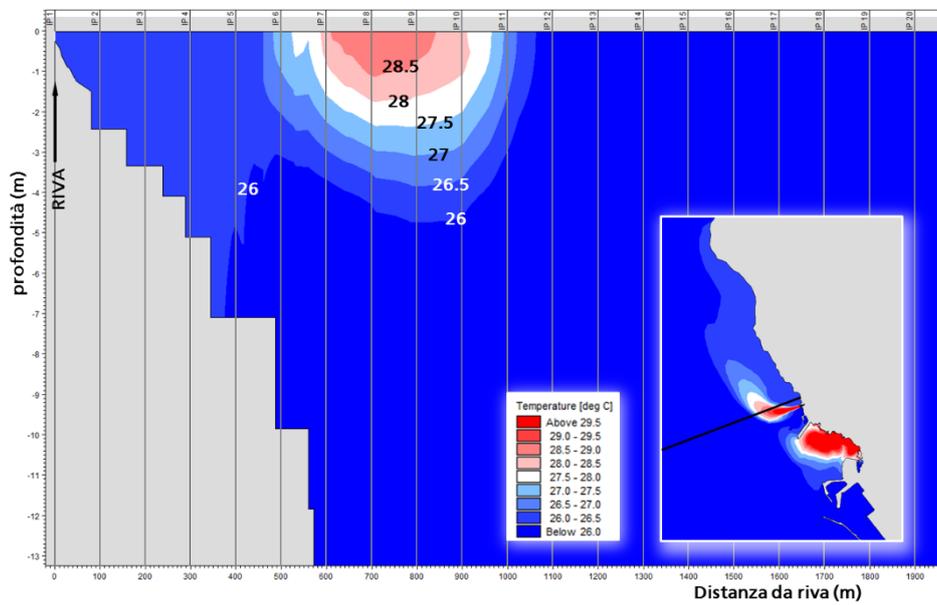


Figura 39 **SCENARIO 1** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a carbone e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) nel transetto perpendicolare a riva 200 m a Nord dall'asse del diffusore TVN.

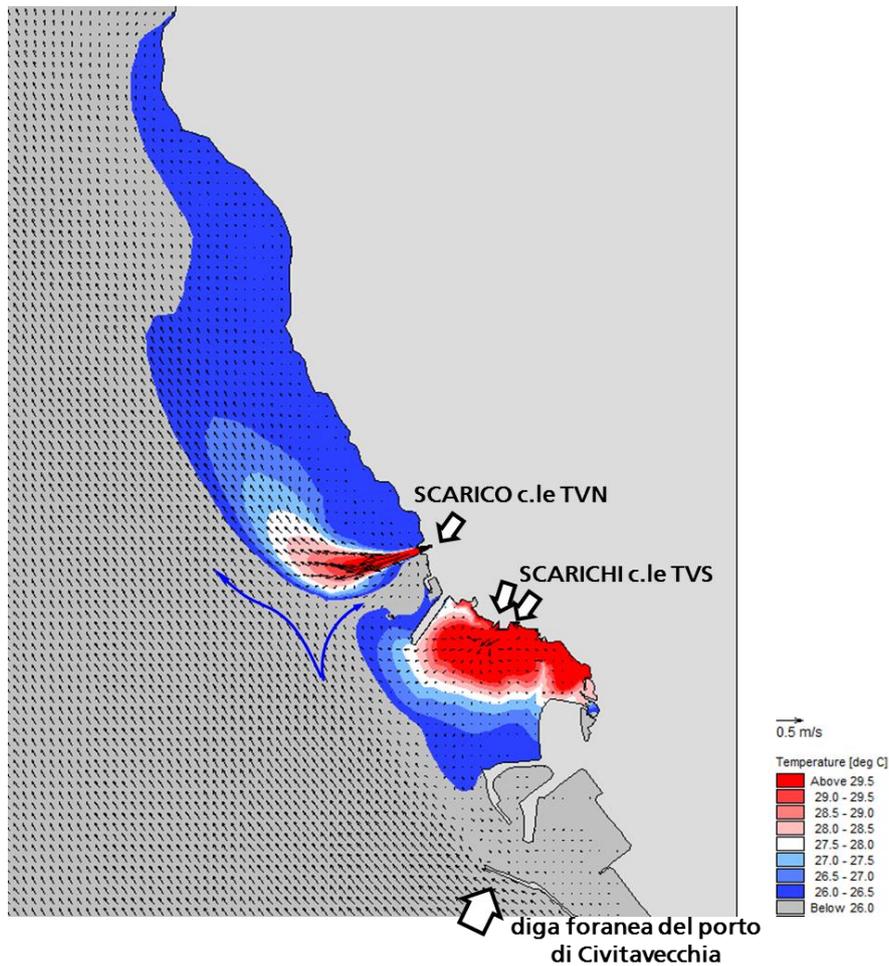


Figura 40 **SCENARIO 1** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a carbone e TVS operativo). Campo di moto superficiale (m/s).

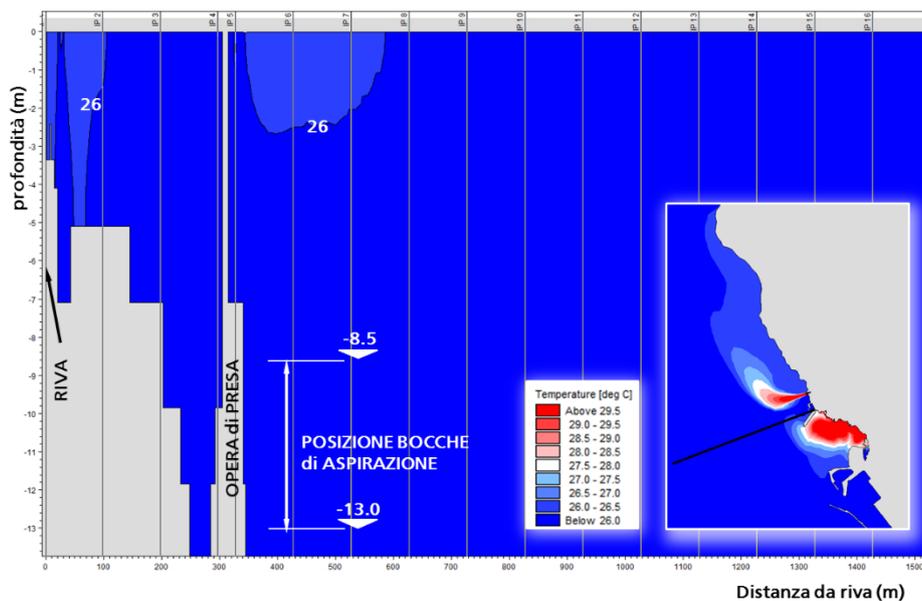


Figura 41 **SCENARIO 1** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a carbone e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) in asse ai torrini di presa della centrale di TVN.

6.4.2 Scenario 2: inverno, TVN a carbone

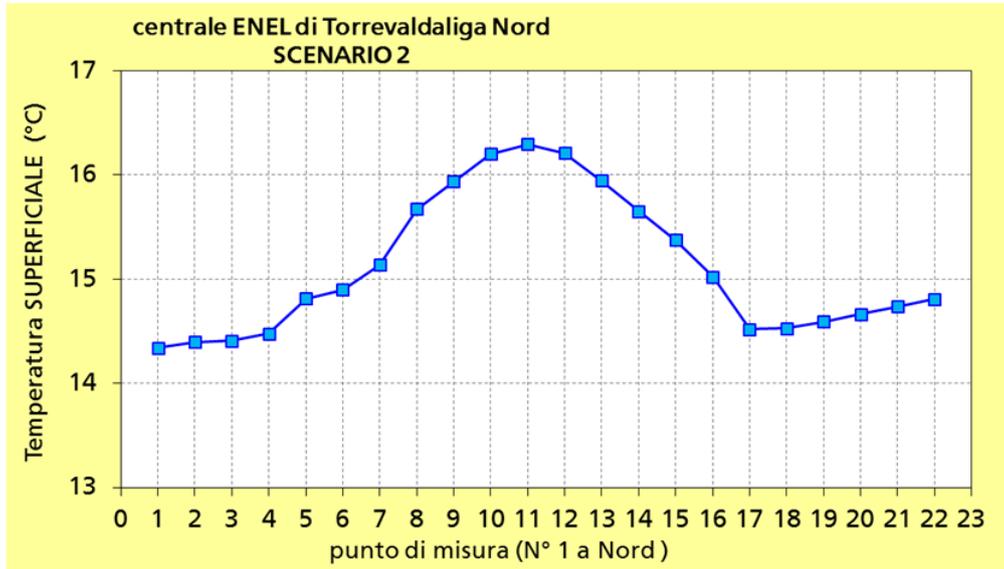
Lo scenario 2 ha riprodotto le condizioni ambientali e di assetto impianti qui di seguito elencate:

1. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Nord (Enel Produzione):*
 - attuale a carbone,
 - funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 73.5 m³/s; scarico attraverso tutti i quattro canali del diffusore;
 - Δ termico allo scarico pari a 7.65 °C;
2. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Sud (Tirreno Power):*
 - TV5: funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 15.6 m³/s e Δ termico allo scarico pari a 7.7 °C,
 - TV6: funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 15.6 m³/s e Δ termico allo scarico pari a 5.3 °C;
3. *parametri ambientali:*
 - condizione invernale caratterizzata da vento di 4 m/s da NE (30°N) e mare calmo;
 - temperatura T dell'aria = 8.2 °C e umidità relativa = 74%;
 - corrente ambientale entrante dal contorno Sud del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) variabile secondo il profilo verticale illustrato in Figura 4;
 - T indisturbata iniziale del corpo idrico ricettore assunta pari a quella della corrente ambientale illustrata in Figura 10 (a sinistra).

Le figure seguenti illustrano in particolare:

- la temperatura calcolata ai 22 punti dell'arco (Figura 42, in alto) e il corrispondente calcolo dell'incremento termico di legge (Figura 42, in basso) evidenziano il maggiore interessamento dei punti centrali dell'arco (T_{max} calcolata in corrispondenza del punto 11) con un delta termico complessivo pari a 1.84 °C inferiore al limite di legge di 3 °C;
- le mappe della temperatura superficiale, illustrate in Figura 43, evidenziano la deviazione del pennacchio concordemente all'andamento della corrente ambientale e del vento adottati; il pennacchio, infatti, per effetto della corrente tende ad allungarsi in direzione Nord-Ovest e a disporsi parallelamente alla linea di riva con particolare riferimento alle isoterme più avanzate, cioè quelle a minore incremento termico rispetto alla temperatura ambientale indisturbata; contemporaneamente il vento che spira da Nord-Est tende ad allontanare il pennacchio dalla riva portandolo ad interessare maggiormente i punti centrali dell'arco; si conferma, invece, la tendenza delle isoterme più interne del pennacchio, a cui corrispondono i maggiori incrementi di temperatura rispetto alla condizione indisturbata, a mantenersi perpendicolari a riva e ad interessare solo alcuni punti dell'arco. Analogamente a quanto osservato nel precedente scenario, si osserva il contenimento del pennacchio termico di TV5, specie nel suo nucleo più caldo, operato dal pontile carboni di TVN, a Nord, dal nuovo profilo in avanzamento assunto negli anni recenti dalla costa, a Sud, e dalla corrente ambientale, in direzione *offshore*;

- il profilo mostrato in Figura 44 descrive la penetrazione della perturbazione termica indotta dallo scarico nel battente idrico in direzione verticale; il profilo, ricavato in asse al pennacchio come indicato nella pianta in basso a destra della figura, mostra chiaramente il galleggiamento del pennacchio caldo con interessamento dell'intero battente fino a breve distanza (200 m) dal lato esterno del diffusore; il nucleo interno più caldo (con temperatura superiore di oltre 2 °C rispetto a quella indisturbata superficiale di poco meno di 14 °C) si estende, in superficie e in asse al pennacchio, per circa 1100 m andando rapidamente ad assottigliarsi. La distanza superficiale, sempre misurata lungo l'asse del pennacchio, interessata da una perturbazione termica è di circa 4.5 km; la massima profondità raggiunta dal pennacchio è pari a circa 7.5 m;
- il secondo profilo verticale in Figura 45 è stato ricavato lungo un transetto perpendicolare a riva collocato 200 m a Nord dell'asse del diffusore, come illustrato in basso a destra nell'immagine; l'impronta della perturbazione termica si manifesta a 300 m dalla riva fino ad una distanza di circa 2100 m e con una profondità massima di circa 7 m; il nucleo più caldo della perturbazione si mantiene nell'intervallo 16.5 – 17 °C (tra 2.5 e 3 °C oltre i 14 °C indisturbati superficiali) con estensione superficiale di circa 100 m e profondità inferiore a 1 m;
- la Figura 46 mostra l'andamento del campo di moto superficiale nell'area di interesse che, come nel precedente scenario, assume una doppia connotazione: la prima, all'esterno della diga foranea del porto di Civitavecchia, è uniforme con direzione costante verso Nord-Ovest; la seconda, all'interno della zona d'ombra creata dalla diga foranea, è più articolata. In tale area, infatti, gli scarichi delle due centrali subiscono gli effetti del molo carboni a servizio della centrale di TVN e della configurazione costiera stessa dell'area; ne deriva un ripiegamento del pennacchio verso i torrini di presa della centrale di TVN e il molo carboni che, peraltro, si mantiene lontano dalle quote di presa dell'acqua di circolazione della centrale evitando il ricircolo di acqua calda, come conferma il profilo verticale di Figura 47 ricavato proprio in asse ai torrini di presa dell'impianto di TVN.



Incremento termico (°C) sull'arco a 1000 m (valori superficiali)				repliche caldi
N. punto	T calcolate	Punti C-F		
1	14.34	F1	Staz. C (Tj) 16.292	0.00
2	14.393	F2	2SC 0.0000	0.00
3	14.4072	F3	Staz. F 1 14.340	0.00
4	14.4753		Staz. F 2 14.393	0.00
5	14.8108		Staz. F 3 14.407	0.00
6	14.8953		Tm 14.380	0.00
7	15.1331		2SF 0.071	0.00
8	15.6731		TR = Tm+2SF 14.45	0.00
9	15.9346		Incr. term. 1.84	0.00
10	16.1999			
11	16.2922	C	Incr.Term. = DTj = (Tj - 2SC) - TR	
12	16.207			
13	15.9426			
14	15.6502			
15	15.3737			
16	15.0186			
17	14.5166			
18	14.5265			
19	14.5923			
20	14.6629			
21	14.733			
22	14.8079			

Figura 42 **SCENARIO 2** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a carbone e TVS operativo). Temperature (°C) calcolate in corrispondenza dei 22 punti di controllo sull'arco a 1000 m, in alto, e, in basso, calcolo dell'incremento termico a 1000 m dal punto di scarico secondo la metodica di legge (Rif. 23 e Rif. 24).

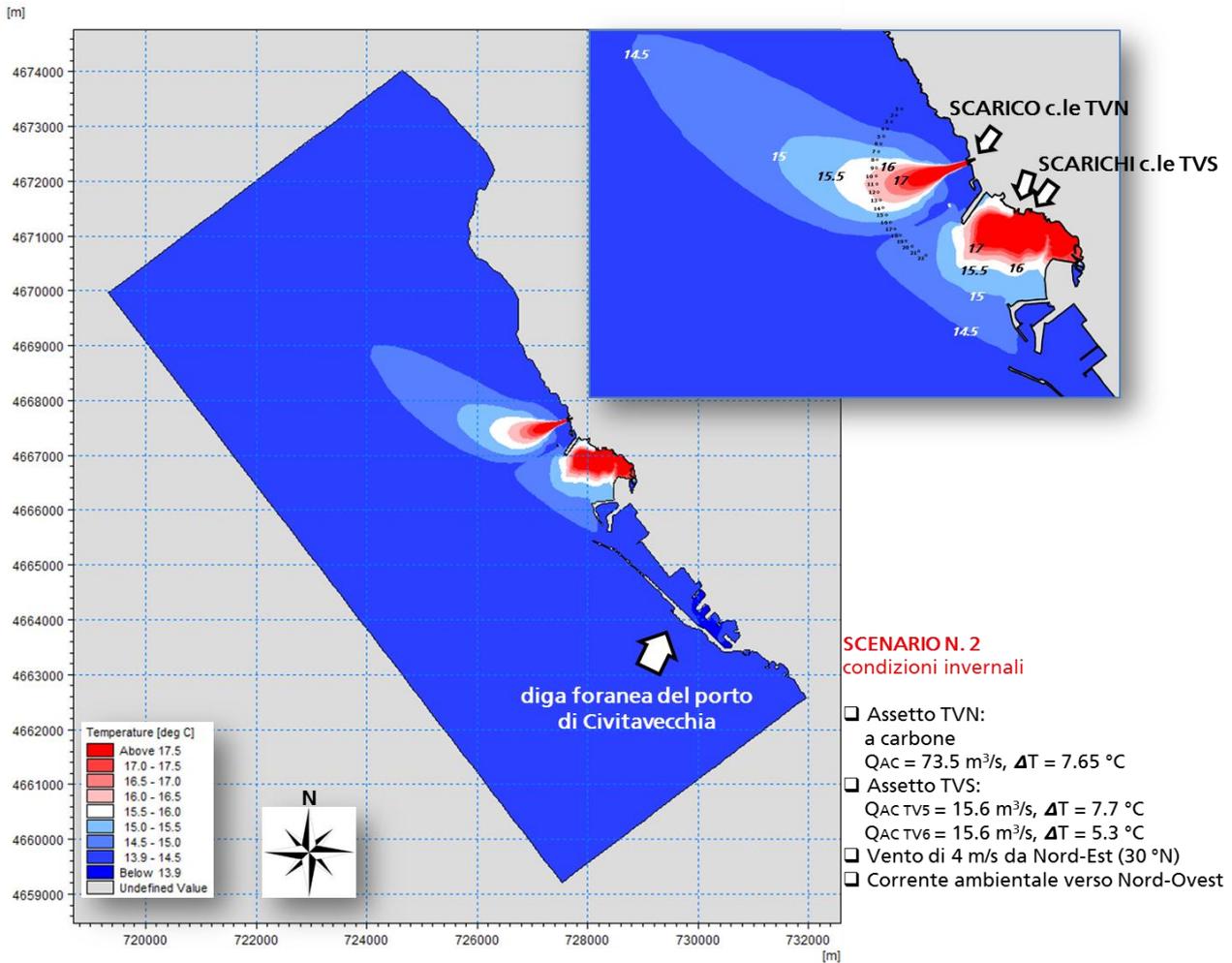


Figura 43 **SCENARIO 2** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a carbone e TV5 operativo). Mappe di temperatura superficiale (°C).

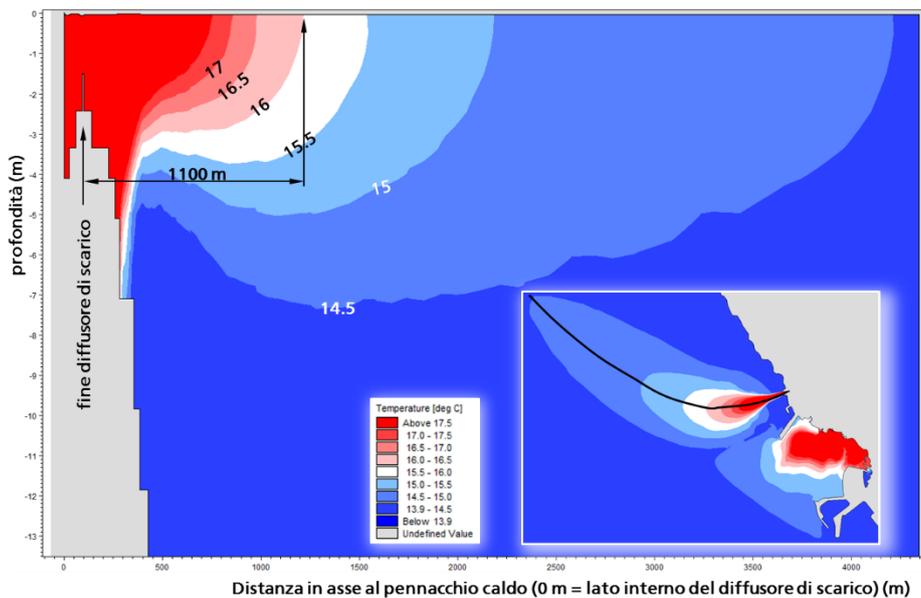


Figura 44 **SCENARIO 2** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a carbone e TV5 operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) in asse al pennacchio caldo della centrale di TVN.

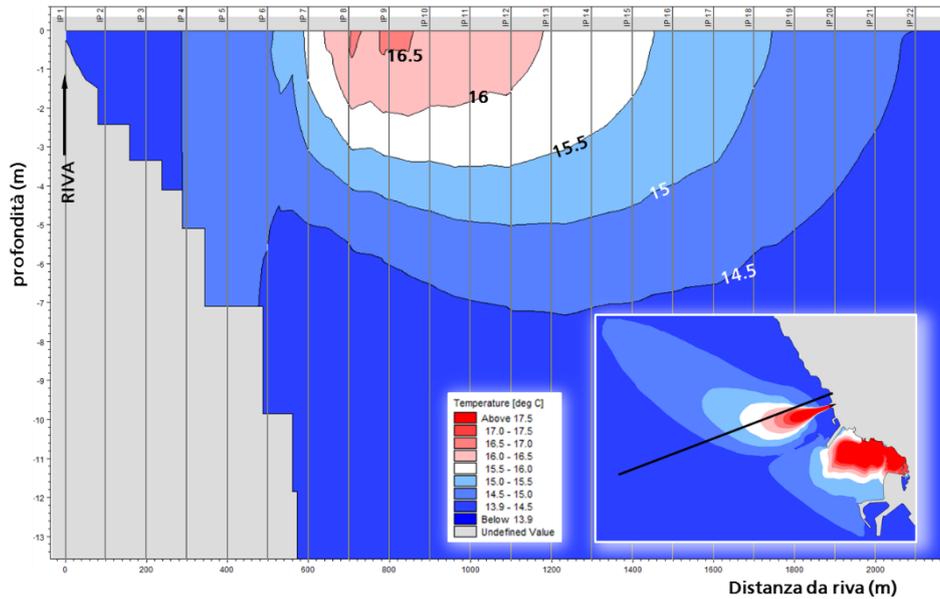


Figura 45 **SCENARIO 2** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a carbone e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) nel transetto perpendicolare a riva 200 m a Nord dall'asse del diffusore TVN.

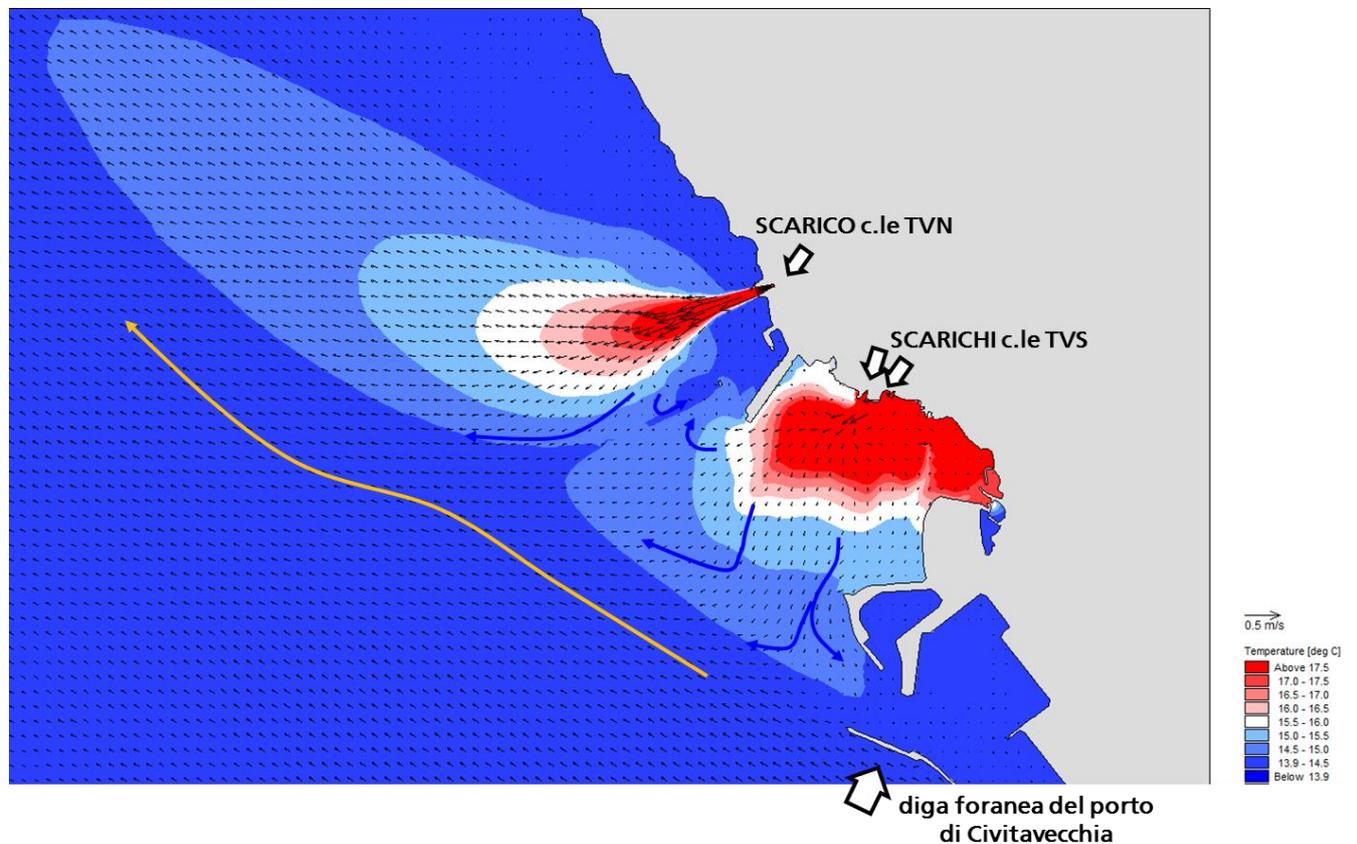


Figura 46 **SCENARIO 2** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a carbone e TVS operativo). Campo di moto superficiale (m/s).

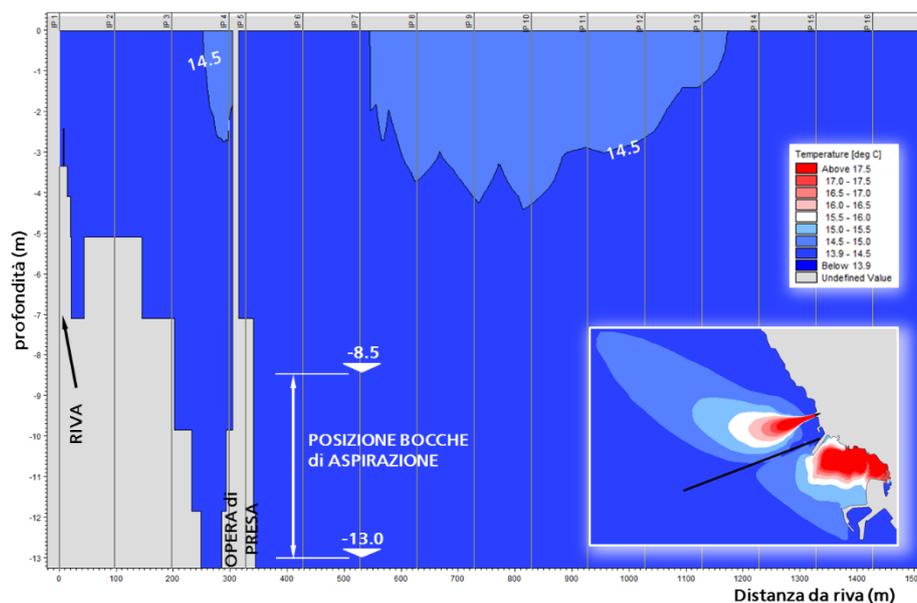


Figura 47 **SCENARIO 2** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a carbone e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) in asse ai torrini di presa della centrale di TVN.

6.4.3 Scenario 3: estate, TVN a gas

Lo scenario 3, identico al precedente scenario 1 a meno del funzionamento a gas anziché a carbone dell'impianto di TVN e a meno della parzializzazione della sezione di scarico da quattro a due canali, ha riprodotto le condizioni ambientali e di assetto impianti qui di seguito elencate:

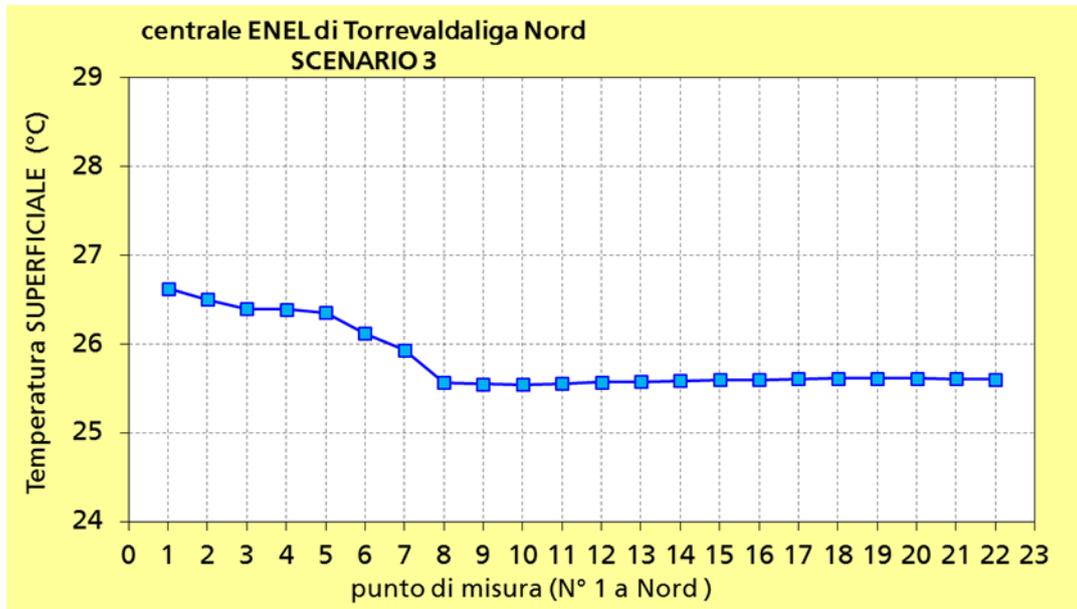
1. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Nord (Enel Produzione):*
 - futuro a gas
 - funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 25.9 m³/s, scarico attraverso 2 dei 4 canali in cui è diviso il diffusore;
 - Δ termico allo scarico pari a 8 °C;
2. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Sud (Tirreno Power):*
 - TV5: funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 15.6 m³/s e Δ termico allo scarico pari a 7.7 °C,
 - TV6: funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 15.6 m³/s e Δ termico allo scarico pari a 5.3 °C;
3. *parametri ambientali:*
 - condizione estiva caratterizzata da vento con provenienza Sud (180 °N) di intensità pari a 3 m/s e mare calmo;
 - temperatura T dell'aria = 26 °C e umidità relativa = 80%;
 - corrente ambientale entrante dal contorno Sud del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) variabile secondo il profilo verticale illustrato in Figura 4;
 - T indisturbata iniziale del corpo idrico ricettore assunta pari a quella della corrente ambientale illustrata in Figura 10 (a destra).

Le figure seguenti illustrano in particolare:

- la temperatura calcolata ai 22 punti dell'arco (Figura 48, in alto) e il corrispondente calcolo dell'incremento termico di legge (Figura 48, in basso) evidenziano il maggiore interessamento dei punti più a Nord dell'arco (T_{max} calcolata in corrispondenza del punto 1) con un delta termico complessivo pari a 1.06 °C ampiamente inferiore al limite di legge di 3 °C; la leggera diminuzione della temperatura superficiale indisturbata di 26 °C già osservata nel precedente scenario 1 (imposta alla corrente ambientale diretta verso NO) riscontrabile ai punti più a Sud dell'arco, non raggiunti dal pennacchio caldo, è probabilmente imputabile alla dispersione termica verticale;
- le mappe della temperatura superficiale, illustrate in Figura 49, confermano i riscontri di cui al punto precedente evidenziando un pennacchio perpendicolare a riva nelle isoterme più interne (più "calde") che non raggiunge i punti dell'arco e, limitatamente alle isoterme più esterne a cui corrispondono i minori incrementi termici, un allungamento in direzione Nord che interessa le acque adiacenti al profilo costiero in sponda destra al diffusore di scarico; a ciò contribuisce sia l'azione della corrente diretta verso Nord-Ovest, sia il vento da Sud, sia la riduzione a circa un terzo delle portate rilasciate rispetto al corrispondente scenario 1 oltre al dimezzamento della sezione di scarico; sostanzialmente invariata la dislocazione del pennacchio termico di TV5;

- il profilo mostrato in Figura 50 descrive la penetrazione della perturbazione termica indotta dallo scarico nel battente idrico in direzione verticale; il profilo, ricavato in asse al pennacchio come indicato nella pianta in basso a destra della figura, mostra chiaramente il galleggiamento del pennacchio caldo con interessamento dell'intero battente fino a breve distanza (150 m circa) dal lato esterno del diffusore; il nucleo interno più caldo (con temperatura superiore di oltre 2 °C rispetto a quella indisturbata superficiale di 26 °C) si estende, in superficie e in asse al pennacchio, per circa 500 m andando rapidamente ad assottigliarsi. La distanza superficiale, sempre misurata in asse al pennacchio, interessata da una perturbazione termica è di circa 1200 m; la massima profondità raggiunta dal pennacchio è di circa 5 m;
- il secondo profilo verticale in Figura 51 è stato ricavato lungo un transetto perpendicolare a riva collocato 200 m a Nord dell'asse del diffusore, come illustrato in basso a destra nell'immagine; l'impronta della perturbazione termica si manifesta a partire dalla riva e presenta un'estensione superficiale di poco meno di 800 m e una profondità massima di circa 5 m; il nucleo più caldo della perturbazione raggiunge una temperatura compresa tra 28 e 28.5 °C (da 2 a 2.5 °C oltre i 26 °C indisturbati superficiali iniziali) con estensione superficiale di circa 200 m e profondità massima di circa 1 m;
- la Figura 52 mostra l'andamento del campo di moto superficiale nell'area di interesse ed evidenzia l'effetto di ridosso operato dalla diga foranea del porto di Civitavecchia anche sul pennacchio di TVN ridotto ad un terzo della portata del corrispondente scenario a carbone; le perturbazioni termiche indotte dai due scarichi si allineano nelle parti più avanzate e dunque già rallentate, alla corrente ambientale diretta a Nord-Ovest; i torrini di TVN sono raggiunti anche dalle isoterme più esterne del pennacchio di TVN; peraltro, la perturbazione si mantiene a livello superficiale evitando il ricircolo di acqua calda alla presa dell'impianto di TVN, come conferma il profilo verticale quasi indisturbato di Figura 53 ricavato proprio in asse ai torrini di presa dell'impianto di TVN.

La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** pone a confronto le temperature superficiali calcolate per gli scenari 1 e 3, identici a meno dell'assetto di funzionamento dell'impianto (a carbone lo scenario 1 e a gas lo scenario 3) e dell'assetto del diffusore di scarico (a 4 canali per lo scenario 1 e a 2 canali per lo scenario 3), in corrispondenza dei punti di controllo sull'arco a 1000 m dallo scarico. Appare evidente che le temperature calcolate nei punti raggiunti dalle perturbazioni dell'arco nell'assetto a gas dello scenario 3 sono generalmente inferiori a quelle riscontrate negli stessi punti per lo scenario 1 con assetto a carbone dell'impianto. Fa eccezione il punto 1 che presenta una temperatura di poco superiore a quella registrata nello stesso punto nell'assetto a carbone (+0.3 °C); peraltro, l'incremento termico complessivo calcolato nel futuro assetto a gas (1.06 °C) ad 1 km dallo scarico risulta inferiore di oltre il 53 % di quello riscontrato nell'attuale assetto a carbone (2.29 °C).



Incremento termico (°C) sull'arco a 1000 m (valori superficiali)				repliche caldi
N. punto	T calcolate	Punti C-F		
1	26.6197	C	Staz. C (Tj) 26.620	0.00
2	26.4993		25C 0.0000	0.00
3	26.3923		Staz. F 1 25.540	0.00
4	26.3892		Staz. F 2 25.544	0.00
5	26.3495		Staz. F 3 25.551	0.00
6	26.1167		Tm 25.545	0.00
7	25.9277		25F 0.012	0.00
8	25.5603		TR = Tm+25F 25.56	0.00
9	25.5443	F2	Incr. term. 1.06	0.00
10	25.5398	F1		
11	25.5514	F3	Incr.Term. = DTj = (Tj - 25C) - TR	
12	25.5664			
13	25.5749			
14	25.5846			
15	25.593			
16	25.5957			
17	25.6043			
18	25.6085			
19	25.6104			
20	25.6098			
21	25.6056			
22	25.5967			

Figura 48 **SCENARIO 3** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Temperature (°C) calcolate in corrispondenza dei 22 punti di controllo sull'arco a 1000 m, in alto, e, in basso, calcolo dell'incremento termico a 1000 m dal punto di scarico secondo la metodica di legge (Rif. 23 e Rif. 24).

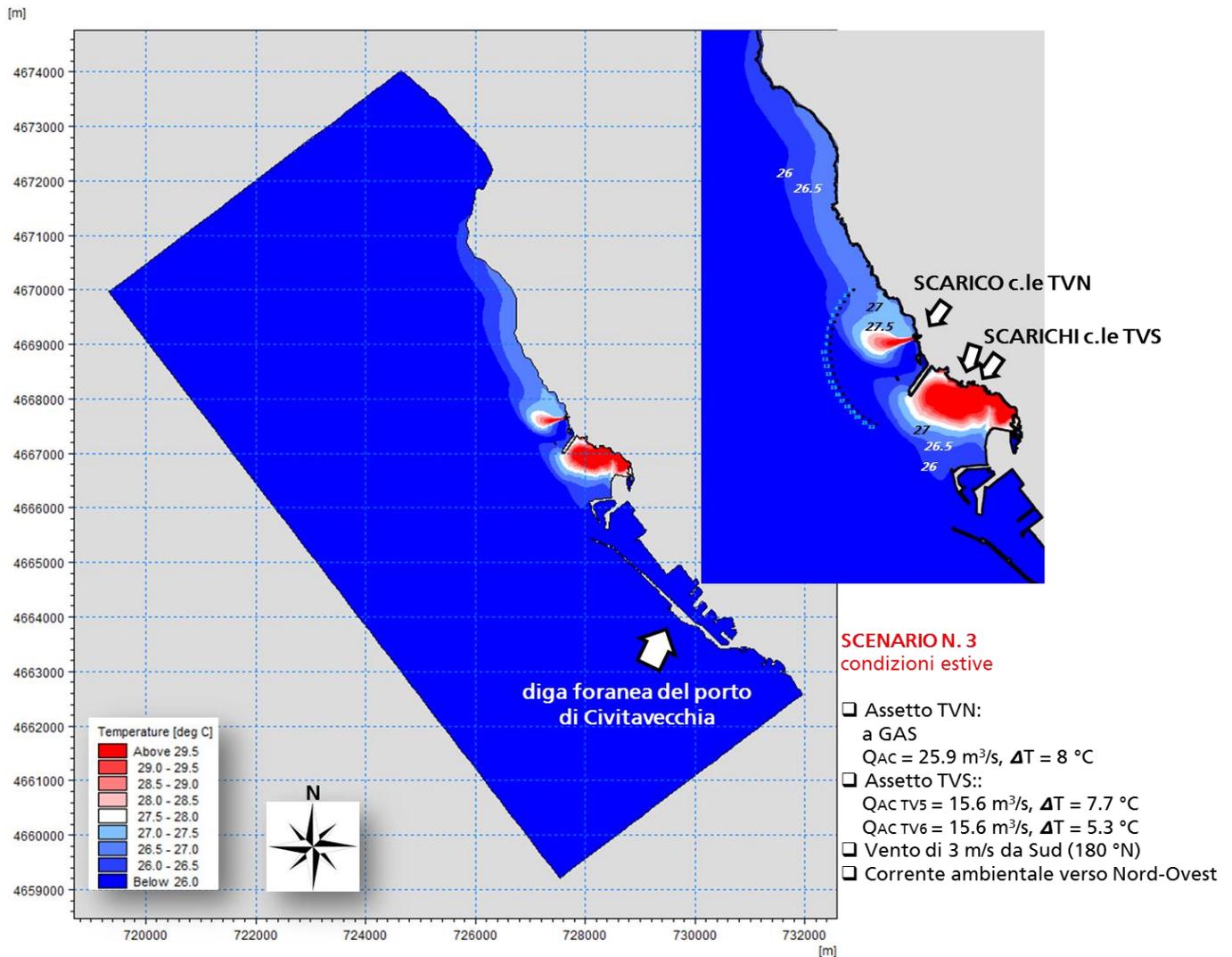


Figura 49 **SCENARIO 3** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo).
Mappe di temperatura superficiale ($^\circ\text{C}$).

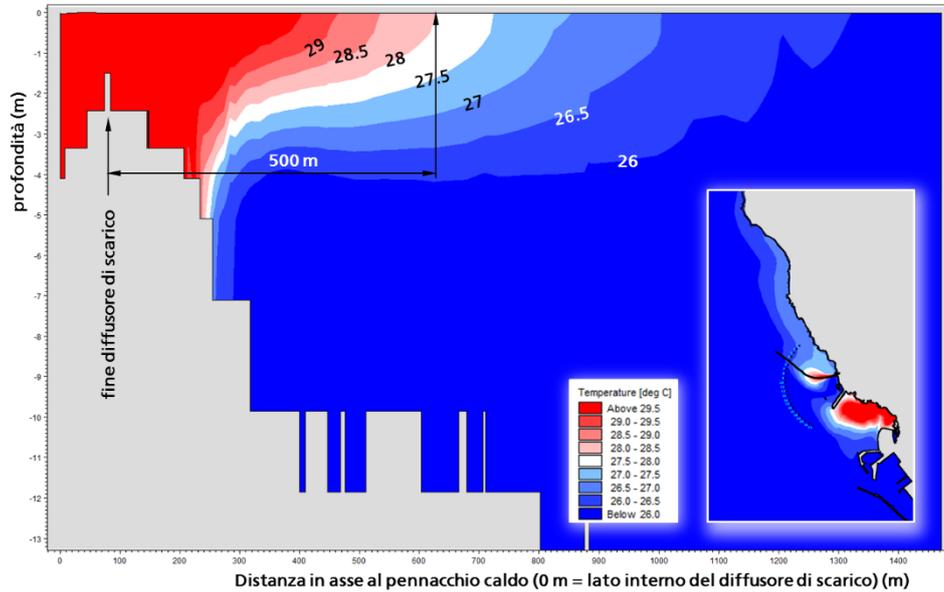


Figura 50 **SCENARIO 3** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) in asse al pennacchio caldo della centrale di TVN.

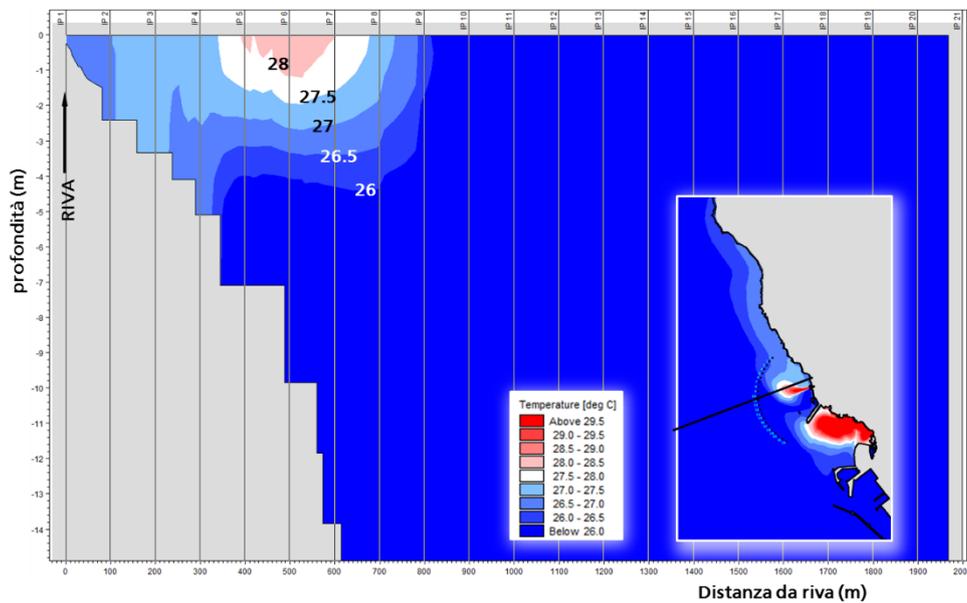


Figura 51 **SCENARIO 3** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) nel transetto perpendicolare a riva 200 m a Nord dall'asse del diffusore TVN.

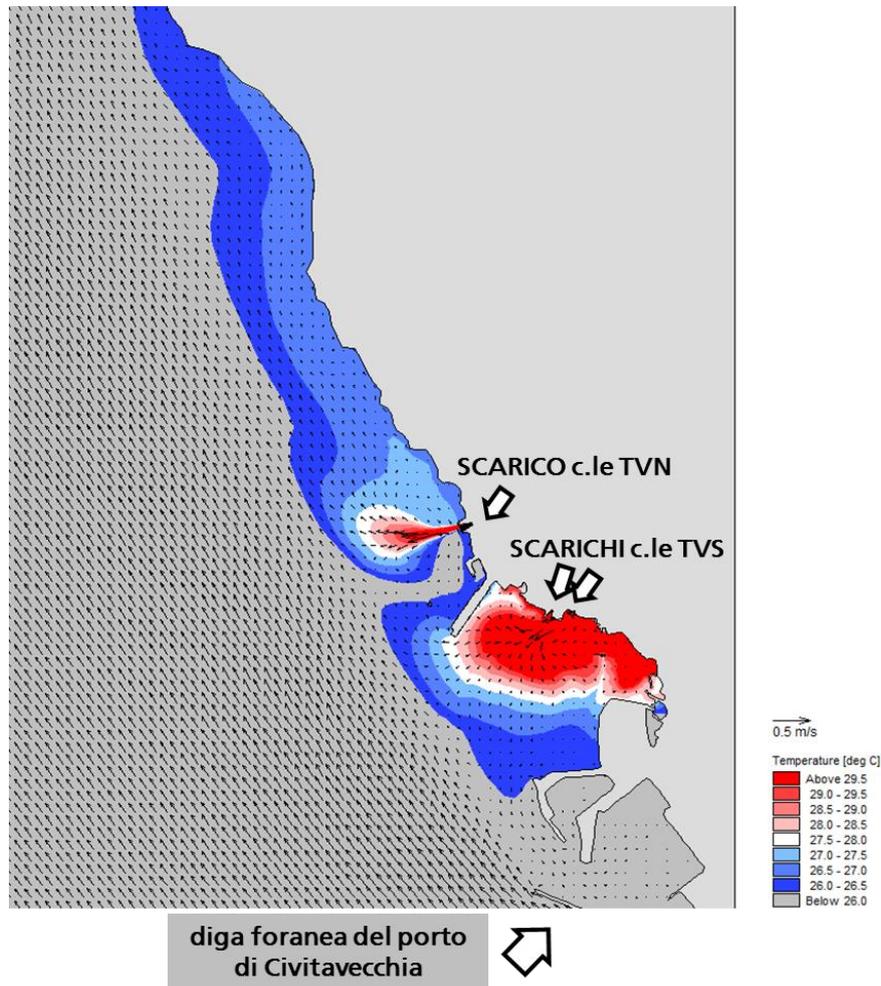


Figura 52 **SCENARIO 3** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Campo di moto superficiale (m/s).

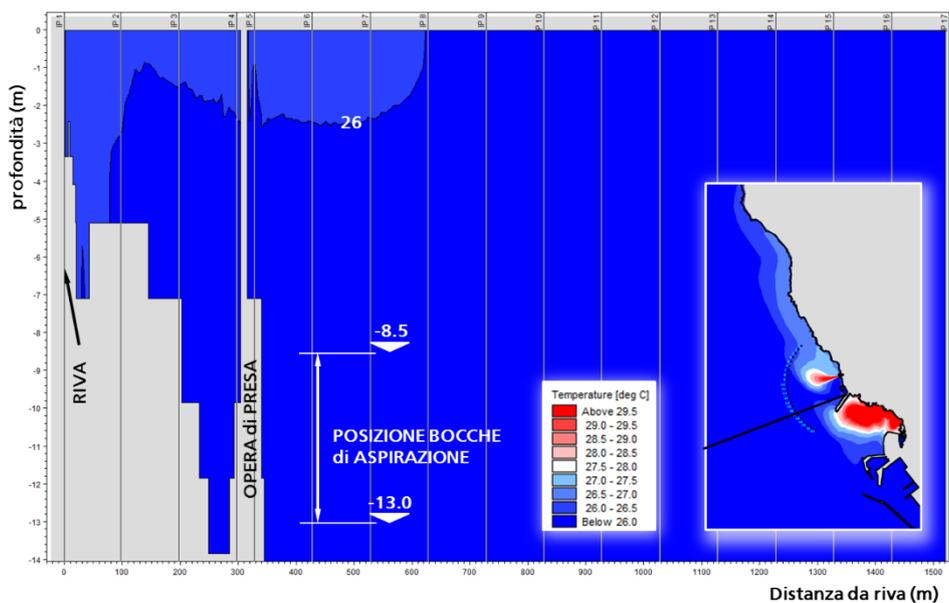


Figura 53 **SCENARIO 3** (estate, vento di 3 m/s da Sud, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) in asse ai torrini di presa della centrale di TVN.

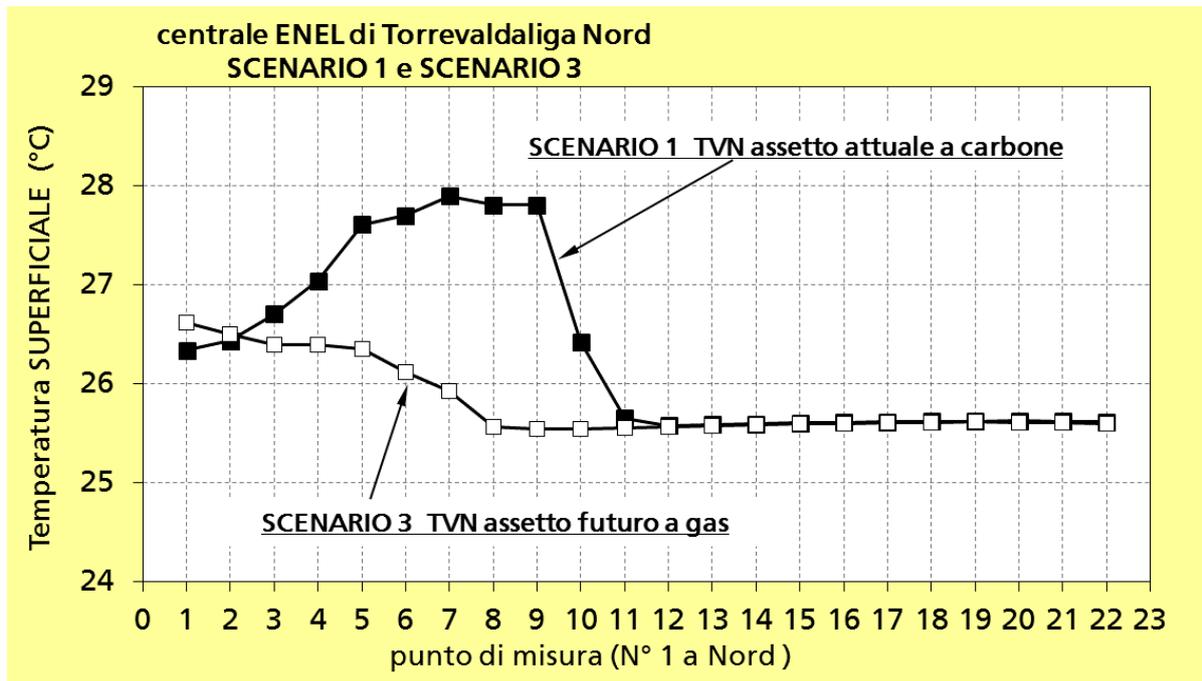


Figura 54 **SCENARI 1 e 3** (estate). Confronto delle temperature calcolate sull'arco a 1000 m nei due assetti di funzionamento a carbone e a gas in condizioni estive

6.4.4 Scenario 4: inverno, TVN a gas

Lo scenario 4, identico al precedente scenario 2 a meno del funzionamento a gas anziché a carbone dell'impianto di TVN e a meno della parzializzazione della sezione di scarico da quattro a due canali, ha riprodotto le condizioni ambientali e di assetto impianti qui di seguito elencate:

1. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Nord (Enel Produzione):*
 - futuro a gas,
 - funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 25.9 m³/s; scarico attraverso 2 dei 4 canali in cui è diviso il diffusore;
 - Δ termico allo scarico pari a 8 °C;
2. *assetto d'impianto di Torrevaldaliga Sud (Tirreno Power):*
 - TV5: funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 15.6 m³/s e Δ termico allo scarico pari a 7.7 °C,
 - TV6: funzionamento a pieno carico con Q pompe AC: 15.6 m³/s e Δ termico allo scarico pari a 5.3 °C;
3. *parametri ambientali:*
 - condizione invernale caratterizzata da vento di 4 m/s da NE (30°N) e mare calmo;
 - temperatura T dell'aria = 8.2 °C e umidità relativa = 74%;
 - corrente ambientale entrante dal contorno Sud del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) variabile secondo il profilo verticale illustrato in Figura 4;
 - T indisturbata iniziale del corpo idrico ricettore assunta pari a quella della corrente ambientale illustrata in Figura 10 (a sinistra).

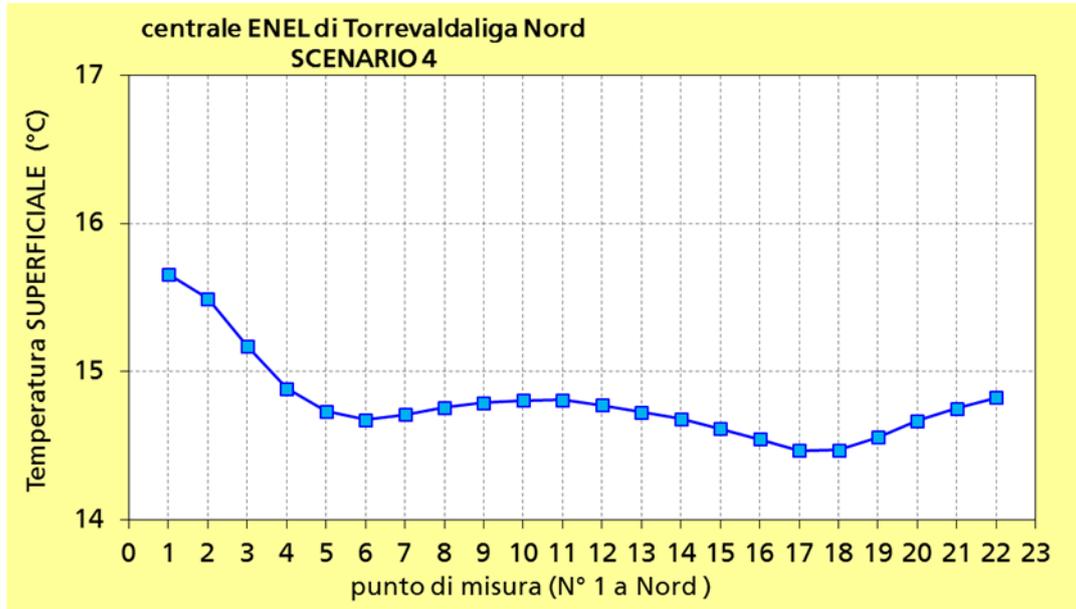
Le figure seguenti illustrano in particolare:

- come nel precedente scenario estivo n. 3 con TVN in assetto futuro a gas, la temperatura calcolata ai 22 punti dell'arco (Figura 55, in alto) e il corrispondente calcolo dell'incremento termico di legge (Figura 55, in basso) evidenziano il maggiore interessamento dei punti più a Nord dell'arco (T_{max} calcolata in corrispondenza del punto 1) con un delta termico complessivo pari a 1.08 °C ampiamente inferiore al limite di legge di 3 °C;
- le mappe della temperatura superficiale, illustrate in Figura 56, confermano i riscontri di cui al punto precedente evidenziando un pennacchio che si allunga verso Nord-Ovest mantenendosi adiacente alla riva con le isoterme più esterne, a cui corrisponde un minore incremento termico. La parte più calda del pennacchio si mantiene invece perpendicolare a riva senza però raggiungere i punti di controllo sull'arco a 1000 m dallo scarico. Anche in questo caso, come nel precedente scenario 3, l'effetto di allungamento verso Nord-Ovest deriva dal prevalere della corrente ambientale sulla velocità del pennacchio nella sua parte più esterna, già rallentata. Diversamente dallo scenario n. 3, caratterizzato da un vento proveniente da Sud, in questo caso il vento da Nord-Est non si somma superficialmente a quello della corrente, ma tende ad allontanare da riva il pennacchio che, infatti, appare più allargato in direzione *offshore* e meno allungato lungo riva di quello precedentemente osservato. La dislocazione del pennacchio di TV5 appare più

avanzata di quella del precedente scenario n. 3, sempre per effetto dell'azione superficiale del vento da Nord-Est qui simulato;

- il profilo mostrato in Figura 57 descrive la penetrazione della perturbazione termica indotta dallo scarico nel battente idrico in direzione verticale; il profilo, ricavato in asse al pennacchio come indicato nella pianta in basso a destra della figura, mostra chiaramente il galleggiamento del pennacchio caldo con interessamento dell'intero battente fino a breve distanza (circa 200 m) dal lato esterno del diffusore; il nucleo interno più caldo (con temperatura superiore di oltre 2 °C rispetto a quella indisturbata superficiale di poco meno di 14 °C) si estende, in superficie e in asse al pennacchio, per circa 550 m andando rapidamente ad assottigliarsi. La distanza superficiale, sempre misurata lungo l'asse del pennacchio, interessata da una perturbazione termica è di circa 1.6 km; la massima profondità raggiunta dal pennacchio è pari a circa 6 m;
- il secondo profilo verticale in Figura 58 è stato ricavato lungo un transetto perpendicolare a riva collocato 200 m a Nord dell'asse del diffusore, come illustrato in basso a destra nell'immagine; l'impronta della perturbazione termica si manifesta fino ad una distanza di circa 1400 m e con una profondità massima di circa 7 m; il nucleo più caldo della perturbazione si mantiene nell'intervallo 16 – 16.5 °C (2.5 °C oltre i 14 °C indisturbati superficiali) con estensione superficiale di circa 200 m e profondità di circa 2 m;
- la Figura 59 mostra l'andamento del campo di moto superficiale nell'area di interesse ed evidenzia l'effetto di ridosso operato dalla diga foranea del porto di Civitavecchia anche sul pennacchio di TVN ridotto ad un terzo della portata del corrispondente scenario a carbone; le perturbazioni termiche indotte dai due scarichi si allineano nelle parti più avanzate e, dunque già rallentate, alla corrente ambientale diretta a Nord-Ovest. Diversamente dal precedente scenario estivo, la perturbazione di TVS appare leggermente più avanzata probabilmente per l'effetto del vento da Nord-Est. Ciò comporta un maggiore coinvolgimento dei torrini di TVN che vengono raggiunti anche dalle isoterme più esterne del pennacchio di TVS; peraltro, come in tutti gli scenari precedenti la perturbazione non raggiunge le quote delle prese di TVN evitando il ricircolo di acqua calda, come conferma il profilo verticale di Figura 60 ricavato proprio in asse ai torrini di presa dell'impianto di TVN.

La Figura 61 pone a confronto le temperature superficiali calcolate per gli scenari 2 e 4, identici a meno dell'assetto di funzionamento dell'impianto (a carbone lo scenario 2 e a gas lo scenario 4) e dell'assetto del diffusore di scarico (a 4 canali per lo scenario 2 e a 2 canali per lo scenario 4), in corrispondenza dei punti di controllo sull'arco a 1000 m dallo scarico. Anche in condizioni invernali le temperature calcolate nei punti raggiunti dalle perturbazioni dell'arco nell'assetto a gas dello scenario 4 sono generalmente inferiori a quelle riscontrate negli stessi punti per lo scenario 2 con assetto a carbone dell'impianto. Fanno eccezione i primi quattro punti più a Nord dell'arco che, come precedentemente illustrato, vengono raggiunti dalla risalita del pennacchio in adiacenza al profilo di costa; peraltro, l'incremento termico complessivo calcolato nel futuro assetto a gas (1.08 °C) ad 1 km dallo scarico risulta inferiore di oltre il 41 % di quello riscontrato nell'attuale assetto a carbone (1.84 °C).



Incremento termico (°C) sull'arco a 1000 m (valori superficiali)				repliche caldi	
N. punto	T calcolate	Punti C-F			
1	15.6578	C	Staz. C (Tj)	15.658	0.00
2	15.4912		25C	0.0000	0.00
3	15.1726		Staz. F 1	14.465	0.00
4	14.8856		Staz. F 2	14.468	0.00
5	14.7301		Staz. F 3	14.541	0.00
6	14.6726		Tm	14.492	0.00
7	14.709		25F	0.086	0.00
8	14.7569		TR = Tm+25F	14.58	0.00
9	14.7889		Incr. term. 1.08		0.00
10	14.8049				
11	14.8078		Incr.Term. = DTj = (Tj - 25C) - TR		
12	14.7736				
13	14.7233				
14	14.6802				
15	14.6129				
16	14.5412	F3			
17	14.4651	F1			
18	14.4682	F2			
19	14.555				
20	14.6681				
21	14.7495				
22	14.8251				

Figura 55 **SCENARIO 4** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Temperature (°C) calcolate in corrispondenza dei 22 punti di controllo sull'arco a 1000 m, in alto, e, in basso, calcolo dell'incremento termico a 1000 m dal punto di scarico secondo la metodica di legge (Rif. 23 e Rif. 24).

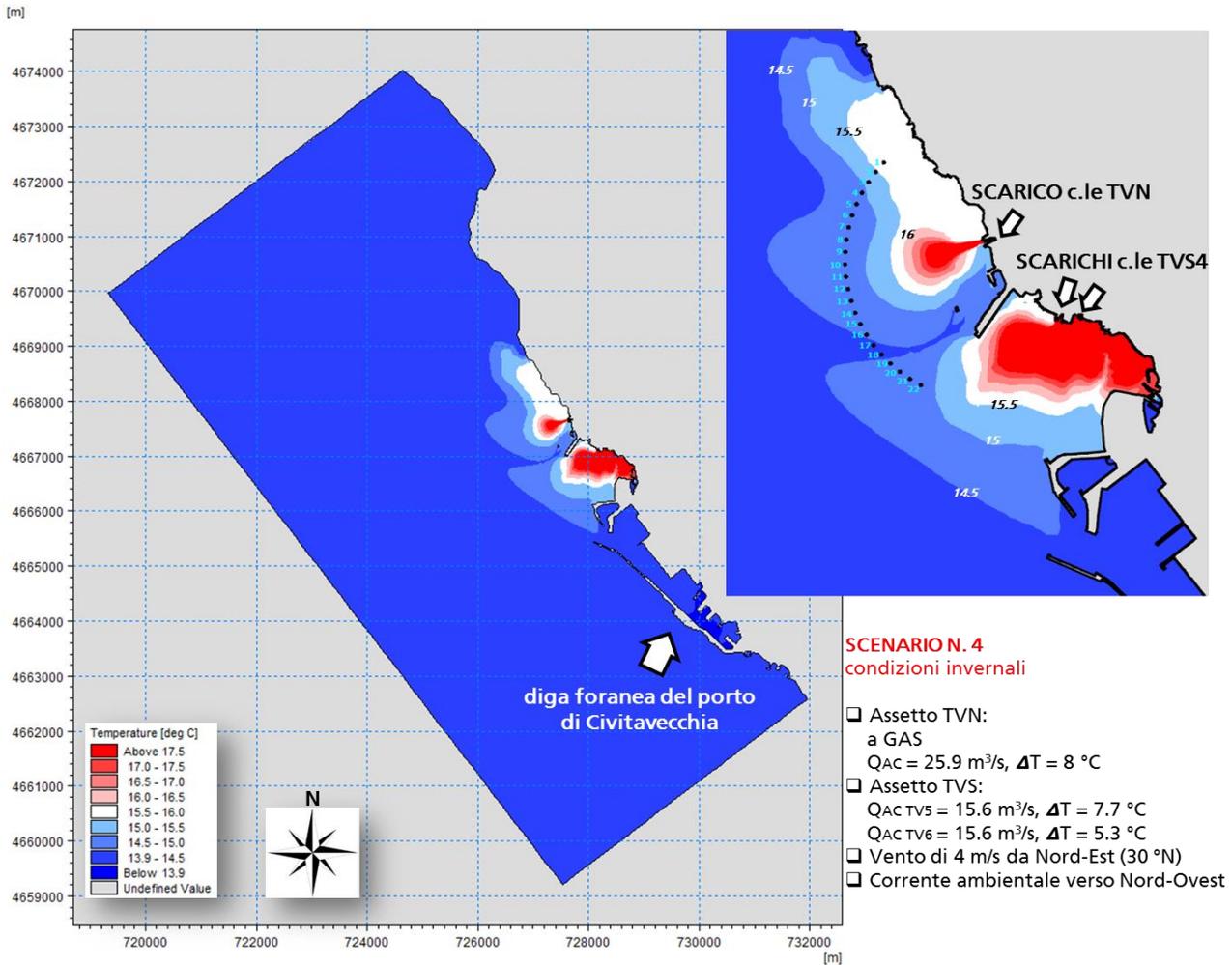


Figura 56 **SCENARIO 4** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Mappe di temperatura superficiale (°C).

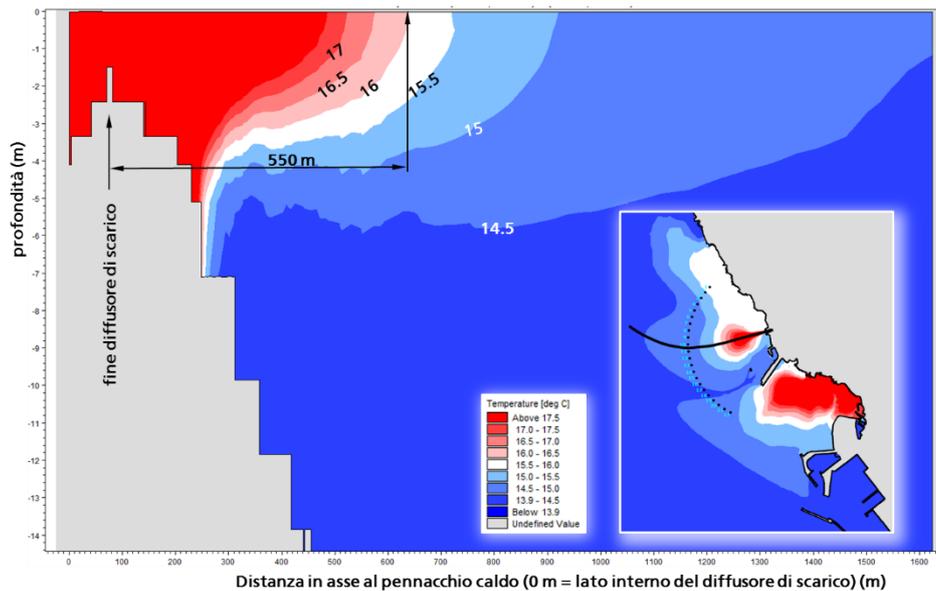


Figura 57 **SCENARIO 4** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) in asse al pennacchio caldo della centrale di TVN.

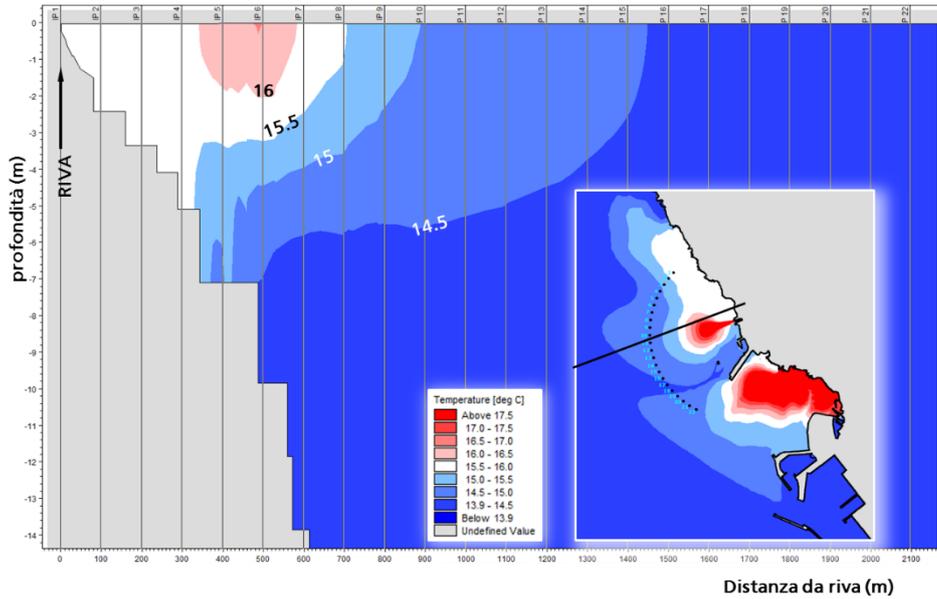


Figura 58 **SCENARIO 4** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) nel transetto perpendicolare a riva 200 m a Nord dall'asse del diffusore TVN.

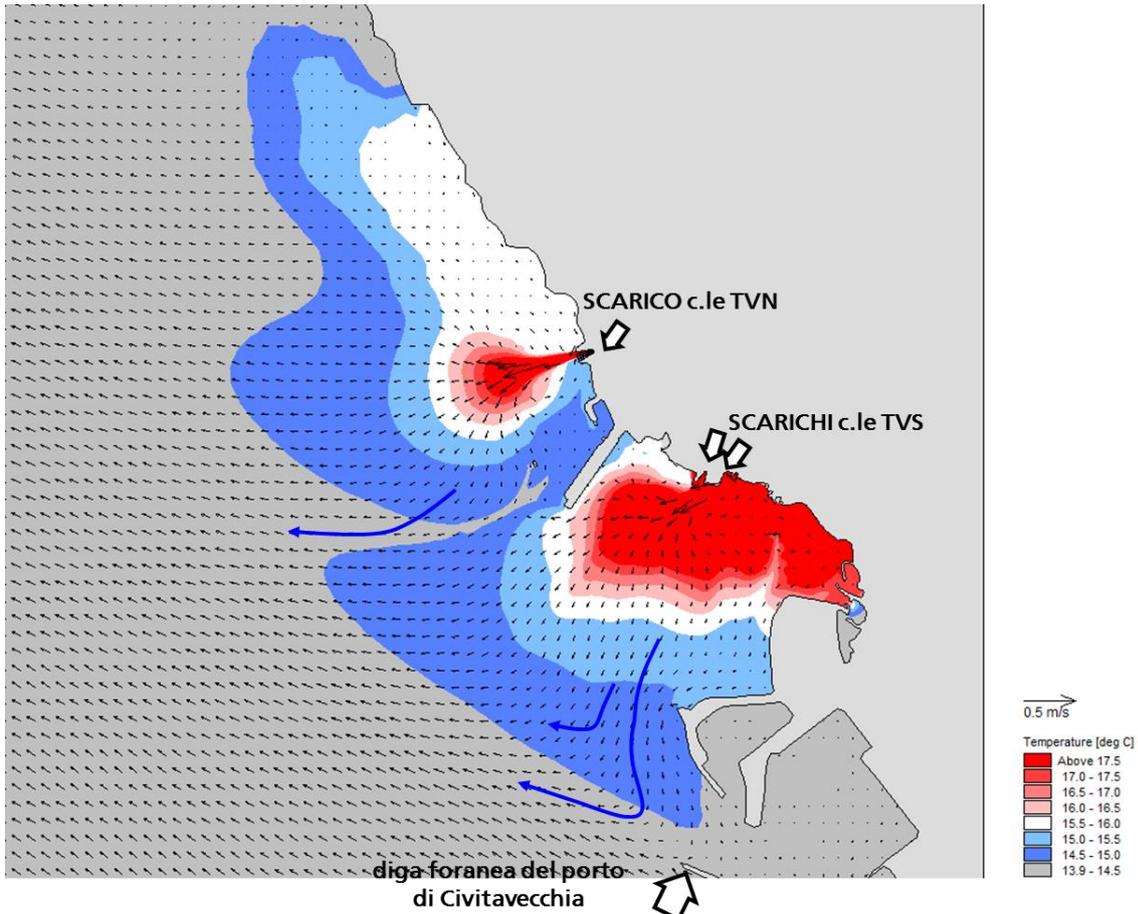


Figura 59 **SCENARIO 4** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Campo di moto superficiale (m/s).

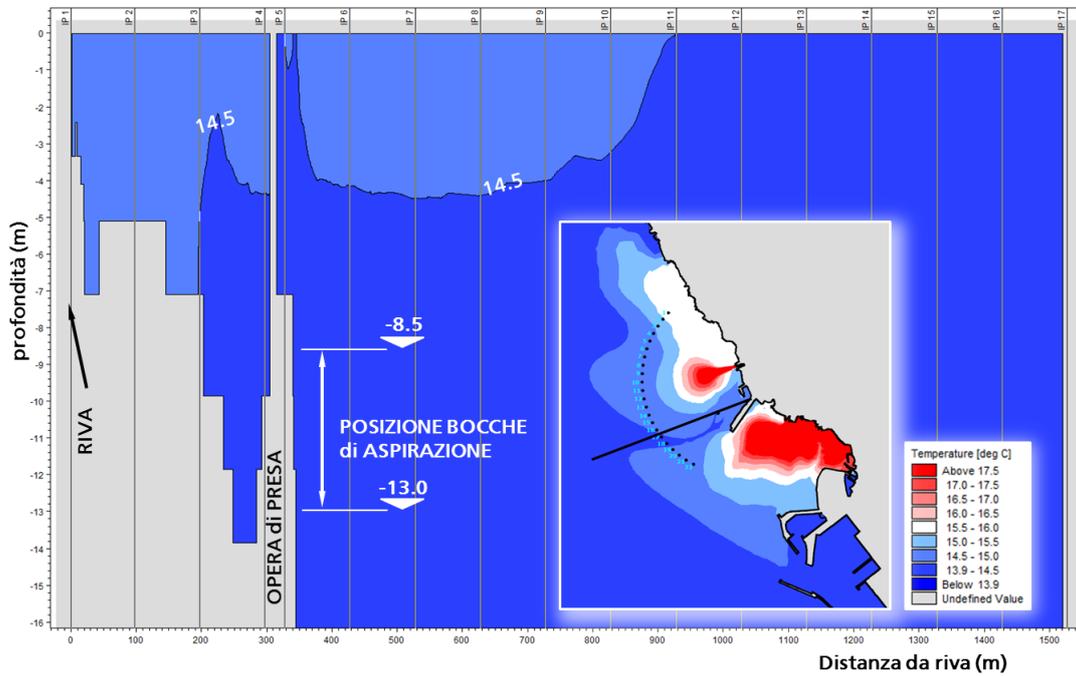


Figura 60 **SCENARIO 4** (inverno, vento di 4 m/s da NE, corrente ascendente, TVN a gas e TVS operativo). Profilo verticale di temperatura (°C) in asse ai torrini di presa della centrale di TVN.

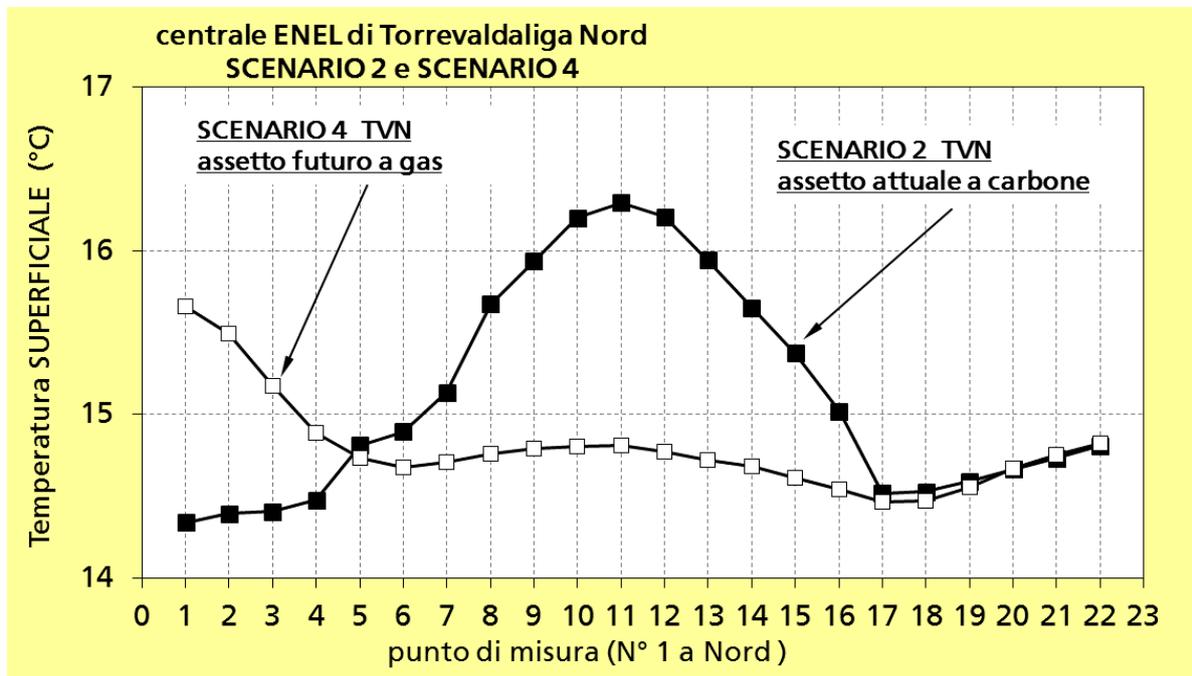


Figura 61 **SCENARI 2 e 4** (inverno). Confronto delle temperature calcolate sull'arco a 1000 m nei due assetti di funzionamento a carbone e a gas in condizioni invernali

7 SINTESI DEI RISULTATI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

7.1 Premessa

Nel Piano di Monitoraggio e Controllo contenuto nel Decreto MATTM n° 284 del 30/09/2019 (Rif. 1), relativo al rinnovo dell'Autorizzazione Integrata Ambientale per l'esercizio dell'impianto termoelettrico di Torrevaldaliga Nord, il Ministero prescrive, tra l'altro, che si eseguano periodici monitoraggi della temperatura del corpo idrico ricevente a 1000 m dal punto di scarico e che le misure debbano essere utilizzate per la calibrazione di un modello di calcolo che possa simulare il rilascio termico ogniqualvolta si prevedano variazioni del processo produttivo dell'impianto. In tale contesto Enel Produzione PP TN ha recentemente commissionato a CESI la messa a punto di tale strumento modellistico (Rif. 5).

In occasione del progetto di conversione a gas dell'impianto in oggetto, Enel Produzione ha commissionato a CESI l'applicazione del modello precedentemente messo a punto per le verifiche di legge in materia di rilascio di acque termicamente perturbate in mare.

In considerazione delle possibili interferenze con lo scarico caldo rilasciato dalla vicina centrale di Torrevaldaliga Sud l'analisi numerica è stata condotta con l'impianto Enel ipotizzato funzionante insieme all'adiacente impianto di proprietà di Tirreno Power.

L'analisi ha consentito di individuare la configurazione, l'estensione e la profondità dei pennacchi caldi generati dalle restituzioni delle acque di raffreddamento necessarie al funzionamento delle due centrali in condizioni ambientali e di assetto d'impianto scelte tra le più frequenti e/o conservative rispetto alle tematiche in oggetto con l'intento di verificare il rispetto dei limiti di legge e la valutazione degli eventuali ricircoli termici alla presa dell'impianto di Torrevaldaliga Nord.

Nel complesso, oltre a 3 scenari di calibrazione, sono stati esaminati 4 scenari previsionali, ciascuno dettagliatamente illustrato ai paragrafi precedenti a cui si rimanda per i necessari approfondimenti.

7.2 Risultati e considerazioni conclusive

Nei limiti di affidabilità del modello matematico utilizzato, opportunamente calibrato in base ai rilievi di campo periodicamente eseguiti da Enel Produzione nell'ambito del Piano di Monitoraggio e Controllo, l'analisi dei risultati complessivamente ottenuti nei 4 scenari previsionali simulati consente di trarre le seguenti considerazioni conclusive per quanto concerne:

1. **il rispetto dei limiti termici di legge:** tutti gli scenari previsionali, con assetti attuali a carbone e futuri a gas, hanno riscontrato il rispetto dei limiti termici di legge vigenti relativamente all'immissione in mare di scarichi caldi; il limite di +3 °C di sovrizzo termico rispetto alla temperatura ambientale valutato su un arco di raggio 1000 m a partire dal punto di scarico, e il limite assoluto di 35 °C nel punto di scarico stesso, non vengono mai superati nelle condizioni estreme estive e invernali riprodotte.
2. **i ricircoli alla presa:** la penetrazione del pennacchio in profondità non ha mai interessato le quote di aspirazione della centrale di Torrevaldaliga Nord, evitando condizioni di ricircolo di acqua calda al circuito di raffreddamento dell'impianto.
3. **la dislocazione della perturbazione termica** appare coerente con la direzione della corrente ambientale e del vento presenti. Ciò comporta, in generale, il maggiore

interessamento dei punti della metà superiore (più a Nord) dell'arco, nel caso della corrente ambientale diretta verso Nord-Ovest qui assunta perché potenzialmente capace di trascinare parte della perturbazione associata agli scarichi dell'impianto di Torrevaldaliga Sud verso i punti più a Sud dell'arco di controllo della Centrale Enel.

4. **il confronto tra i due assetti di funzionamento:** la coerenza tra la dislocazione del pennacchio e la direzione della corrente ambientale e del vento riguarda la parte più esterna del pennacchio nel caso di assetto a carbone che tende ad allungarsi in direzione concorde con la corrente e a disporsi parallelamente alla linea di riva in particolare nelle sue isoterme più avanzate, cioè quelle a minore incremento termico rispetto alla temperatura ambientale indisturbata; le isoterme più interne del pennacchio, a cui corrispondono i maggiori incrementi di temperatura rispetto alla condizione indisturbata, invece, si mantengono perpendicolari a riva senza raggiungere i punti dell'arco. Tale condizione è ovviamente giustificata dalla prevalenza delle velocità delle portate di scarico in uscita dal diffusore rispetto a quelle della corrente ambientale; a maggiore distanza da riva, quando il pennacchio è ormai rallentato, la velocità della corrente ambientale tende a prevalere su quella residua dello scarico che, quindi, ne subisce il trascinamento.

Nell'assetto a gas, invece, la forte riduzione della portata scaricata divenuta pari a circa un terzo della portata di rilascio nell'assetto attuale a carbone e la proporzionale riduzione della velocità alla bocca del diffusore di scarico (in parte controbilanciata dal dimezzamento della sezione di scarico con la riduzione da 4 a 2 dei canali attraverso cui avviene il rilascio) producono una minore penetrazione verso il largo del pennacchio caldo che tende a ripiegare maggiormente verso Nord-Ovest in adiacenza al profilo costiero.

In entrambi gli scenari simulati, estivo ed invernale, l'incremento termico a 1000 m dal punto di scarico nella configurazione futura a gas dell'impianto è risultato inferiore a quello calcolato nell'attuale assetto a carbone: -53 % in condizioni estive e -41 % in condizioni invernali.