





Convenzione DAR CUP E69D15001520001

# Convenzione ARPA – DAR per l'aggiornamento del quadro conoscitivo sullo stato di qualità delle acque sotterranee, superficiali interne, e marino- costiere, ai fini della revisione del Piano di Gestione del Distretto Idrografico della Regione Sicilia

## Piano Operativo Acque Sotterranee

## Task T.3 - Valutazione, per i corpi idrici interessati da superamenti puntuali dei VS o SQ, del probabile trasferimento degli inquinanti dai corpi idrici sotterranei ai corpi idrici superficiali connessi o agli ecosistemi terrestri che ne dipendono direttamente ed alla valutazione dei probabili relativi impatti



Report attività

Palermo - luglio 2018

#### Coordinamento del POA Acque sotterranee

Dott. Anna Abita - ARPA Direzione Generale - Direttore UOC ST2 Monitoraggi Ambientali

#### Coordinamento della Task T.3 del POA Acque sotterranee

Dott.ssa Virginia Palumbo - ARPA Direzione Generale - Funzionario ST2 Monitoraggi Ambientali

#### Redazione

## Sezioni 1 e 2

Dott.ssa Virginia Palumbo – ARPA Direzione Generale - Funzionario ST2 Monitoraggi Ambientali Dott. Marco Nicolosi – ARPA Direzione Generale - Collaboratore ST2 Monitoraggi Ambientali Dott. Santino Pellerito – ARPA Direzione Generale - Collaboratore ST2 Monitoraggi Ambientali Dott. Nunzio Costa – ARPA Direzione Generale - Collaboratore ST2 Monitoraggi Ambientali *Sezione 3* Dott.ssa Virginia Palumbo – ARPA Direzione Generale - Funzionario ST2 Monitoraggi Ambientali *Allegato 1* ARPA - UO Laboratorio della ST di Palermo - Responsabile Dott.ssa Vittoria Giudice *Appendice A* Biosurvey S.r.l. - Palermo

## **Ringraziamenti:**

Si ringraziano per la collaborazione nelle attività di campionamento: il Dott. Lorenzo Gentile (ARPA Sicilia – ST Trapani) e la Dott.ssa Stefania D'Angelo (RNI "Lago Preola e Gorghi Tondi"). Si ringrazia il Dott. Salvatore Pierini per la collaborazione nell'editing grafico delle sezioni geolitologiche e della colonna stratigrafica. Si ringraziano il Prof. Attilio Sulli (Università degli Studi di Palermo) ed il Dott. Fabrizio Parente per la loro collaborazione. Si ringraziano inoltre tutti gli Enti ed i Dipartimenti Regionali che hanno fornito i dati e la documentazione citata nel presente lavoro.

## INDICE

## **SEZIONE 1 – GENERALITA'**

1 Introduzione	5
2 Approccio metodologico generale	.9

## SEZIONE 2 – FASE CONOSCITIVA INIZIALE

3 Inquadramento dell'area di studio: analisi dei dati esistenti15
3.1 Inquadramento geologico e geomorfologico15
3.2 Inquadramento idrogeologico ed assetto idrodinamico20
3.3 Caratterizzazione termo-pluviometrica ed idrologica
3.4 Sintesi dell'analisi delle pressioni e dello stato ambientale dei corpi idrici della
Piana
4 Acquisizione ed elaborazione dei dati funzionali all'elaborazione del modello concettuale
idrogeologico dell'acquifero ed elaborazione del modello concettuale
preliminare44
4.1 Acquisizione ed organizzazione dei dati geologico-stratigrafici44
4.2 Elaborazione del modello geolitologico di sottosuolo e ricostruzione della
configurazione geometrica tridimensionale dell'acquifero47
4.3 Acquisizione dei dati relativi ai parametri idrodinamici dell'acquifero59
4.4 Esecuzione delle campagne di rilievo piezometrico del corpo idrico sotterraneo63
4.5 Sintesi dei dati acquisiti ed elaborazione del modello concettuale idrogeologico
preliminare dell'acquifero65
5 Acquisizione ed elaborazione dei dati funzionali all'analisi del bilancio idrico
dell'acquifero72
5.1 Elaborazione dei dati funzionali al calcolo della ricarica meteorica
dell'acquifero72
5.1.1 Calcolo dell'evapotraspirazione reale e dell'eccedenza idrica
5.1.2 Valutazione del coefficiente di infiltrazione potenziale
5.2 Acquisizione dei dati sui prelievi idrici da pozzi
5.2.1 Prelievi idropotabili
5.2.2 Prelievi irrigui
5.3 Acquisizione dei dati sugli apporti irrigui
1

## SEZIONE 3 – IMPLEMENTAZIONE MODELLISTICA

7 Impl	lementa	azione	del modello numerico integrato regionale del sistema idrogeologico	della						
Piana	di Cast	elvetra	ano – Campobello di Mazara	106						
	7.1	Obiettivi e struttura generale del modello integrato106								
	7.2 Modello idrologico del bacino del fiume Modione: modulo afflussi-deflussi									
		7.2.1	Caratteristiche generali del modulo NAM	109						
		7.2.2	Messa a punto del modello afflussi-deflussi	111						
			7.2.2.1 Schematizzazione del bacino	112						
			7.2.2.2 Dati meteorologici di input	113						
			7.2.2.3 Parametri del modello	117						
		7.2.3	Calibrazione del modello afflussi-deflussi	119						
		7.2.4	Risultati del modello afflussi-deflussi	120						
	7.3	Mode	llo idrodinamico per la simulazione del deflusso idrico nel re	ticolo						
i	idrogra	afico d	el fiume Modione	122						
		7.3.1	Caratteristiche generali del modulo HD	122						
		7.3.2	Messa a punto del modello idrodinamico	124						
			7.3.2.1 Sezioni topografiche	124						
			7.3.2.2 Condizioni al contorno	125						
			7.3.2.3 Condizioni iniziali	126						
		7.3.3	Risultati del modello idrodinamico	126						
	7.4	Mode	ello idrogeologico integrato dell'acquifero della Piana di Castelvet	rano-						
(	Campo	bello d	di Mazara	128						
		7.4.1	Caratteristiche generali del codice MIKE SHE	128						

7.4.2	Impostazione del modello idrogeologico integrato132
	7.4.2.1 Ricarica dell'acquifero134
	7.4.2.2 Deflusso nel reticolo idrografico135
	7.4.2.3 Flusso nella zona satura136
	7.4.2.4 Prelievi dall'acquifero136
7.4.3	Messa a punto del modello idrogeologico integrato137
	7.4.3.1 Precipitazioni nette139
	7.4.3.2 Frazione d'infiltrazione140
	7.4.3.3 Collegamento con il reticolo fluviale140
	7.4.3.4 Parametrizzazione della zona satura dell'acquifero141
	7.4.3.5 Condizioni iniziali di carico piezometrico143
	7.4.3.6 Condizioni al contorno esterne144
	7.4.3.7 Drenaggio in zona satura146
	7.4.3.8 Pozzi di emungimento146
7.4.4	Calibrazione del modello idrogeologico integrato149
7.4.5	Risultati del modello idrogeologico integrato158
	7.4.5.1 Carte di distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale e
	verticale dell'acquifero159
	7.4.5.2 Serie temporale della distribuzione dell'infiltrazione efficace
	nell'acquifero162
	7.4.5.3 Serie temporale dell'andamento della superficie piezometrica e
	dei deflussi idrici sotterranei nell'acquifero164
	7.4.5.4 Serie temporale dei flussi di scambio fiume-falda177
	7.4.5.5 Serie temporale dei flussi di drenaggio della zona satura
	dell'acquifero181
	7.4.5.6 Valutazione del bilancio idrico dell'acquifero186
	7.4.5.7 Definizione della condizione al contorno orientale per il modello di
	flusso locale relativo alla zona dei laghi189
8 Implementazione	e del modello di flusso e trasporto nell'area dei laghi Murana, Preola e
Gorghi Tondi	
8.1 Modello o	concettuale del settore occidentale del corpo idrico sotterraneo190
8.2 Messa a p	ounto e calibrazione del modello di flusso197
8.3 Implement	ntazione del modello di trasporto dei contaminanti

8.3.1 Modello di trasporto dell'arsenico: messa a punto e presentazione dei
risultati205
8.3.2 Modello di trasporto dei nitrati: messa a punto e presentazione dei
risultati213
intesi dei risultati e conclusioni226
oliografia

## ALLEGATI

Allegato 1 – Rapporti di prova delle analisi chimiche effettuate nelle acque dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi e nelle acque di falda prelevate dai piezometri P1 e PZ3 presso la discarica di C.da Misiddi-Campana

## APPENDICI

Appendice A – Report finale del servizio di rilievo topo-batimetrico dei laghi della Riserva Naturale Integrale Lago Preola e Gorghi Tondi – Mazara del Vallo (TP)

#### **SEZIONE 1 – GENERALITA'**

#### 1 Introduzione

Il Piano Operativo Attività acque sotterranee (d'ora in poi denominato POA acque sotterranee) allegato alla *"Convenzione ARPA-DAR per l'aggiornamento del quadro conoscitivo sullo stato delle qualità delle acque sotterranee, superficiali interne, superficiali marino-costiere ai fini della revisione del Piano di gestione del Distretto Idrografico della Regione Sicilia"* (Convenzione approvata con DDG del DAR n. 23 del 22/01/2016) ha avuto come obiettivo quello di dare attuazione sul territorio regionale agli adempimenti previsti dalla WFD (Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE) e dalla GWD (Direttiva sulle Acque Sotterranee 2006/118/CE), e rispettiva normativa nazionale di recepimento (D. lgs. 152/06, D. lgs. 30/2009, D.M. 260/2010), in materia di monitoraggio e valutazione dello stato chimico delle acque sotterranee, ai fini dell'aggiornamento del quadro conoscitivo sul loro stato qualitativo per la revisione del Piano di Gestione del Distretto Idrografico della Sicilia (PdG) e per il superamento della condizionalità 6.1 per la Programmazione 2014-2020.

Il POA acque sotterranee ha pertanto individuato le attività da porre in essere in materia di monitoraggio e valutazione dello stato chimico delle acque sotterranee, al fine di fornire i dati necessari al processo di revisione del PdG al Dipartimento Regionale Acque e Rifiuti cui compete l'attività.

In attuazione del POA acque sotterranee allegato alla citata Convenzione ARPA-DAR, sono state poste in essere le attività previste dalla task T.3 "Valutazione, per i corpi idrici interessati da superamenti puntuali dei VS o SQ, del probabile trasferimento degli inquinanti dai CIS ai corpi idrici superficiali connessi o agli ecosistemi terrestri che ne dipendono direttamente ed alla valutazione dei probabili relativi impatti".

Nel presente documento si riportano i risultati dell'attuazione della suddetta Task T3, finalizzata ad effettuare, nel corpo idrico sotterraneo pilota della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara (TP), le valutazioni di cui all'art. 4, comma 2, lettera c, punto 2 e All. 5, punti 4.b, 4.c del D. lgs. 30/2009, previste nei corpi idrici sotterranei connessi con le acque superficiali nei quali siano stati riscontrati dei superamenti puntuali di valori soglia (VS) o standard di qualità (SQ), nell'ambito dell'indagine finalizzata ad ottenere una valutazione complessiva dello stato chimico per l'intero corpo idrico sotterraneo.

La scelta di effettuare le valutazioni di cui alla Task T.3 sul corpo idrico sotterraneo "Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara" (codice WISE: ITR19CCCS01) deriva dalla necessità di effettuare le indagini integrative previste dal D.lgs. 30/2009 su un corpo idrico sotterraneo caratterizzato da uno stato chimico puntuale scarso<sup>1</sup>, il quale risulta essere in connessione con i corpi idrici superficiali "Lago della Preola" (codice WISE: IT19TW05529), "Gorghi Tondi Alto" (codice WISE: IT19TW055308), "Gorghi Tondi Medio" (codice WISE: IT19TW055310), "Gorghi Tondi Basso" (codice WISE: IT19TW055311), caratterizzati a loro volta da uno stato chimico non buono ed uno stato ecologico cattivo o non superiore a sufficiente. La valutazione dello stato ecologico di questi corpi idrici<sup>2</sup> soffre tuttavia dell'individuazione di queste acque, nel PdG, come acque di transizione, sebbene le stesse presentino caratteristiche non coerenti con le acque di transizione, e quindi dei relativi EQB da determinare per la loro classificazione.

I laghi suddetti rientrano comunque nella fattispecie di un ecosistema acquatico associato alle acque sotterranee, secondo la seguente definizione che di esso viene data dalla Commissione Europea nel documento "*Technical Report on Groundwater Associated Aquatic Ecosystems*" (TR n. 9, European Commission, 2015)

1. <u>Ecosistema acquatico associato alle acque sotterranee</u>: un ecosistema che è contenuto dentro uno o più corpi idrici superficiali (fluviali, lacustri, transizionali o costieri), il cui stato ecologico o chimico o i cui obiettivi ambientali potrebbero essere influenzati dalle alterazioni dei livelli idrici o dalle concentrazioni dei contaminanti che sono trasmessi attraverso l'acqua sotterranea (Figura 1.1).

L'identificazione dei corpi idrici superficiali sopra indicati come un ecosistema acquatico associato alle acque sotterranee del corpo idrico "Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara" è supportata da risultati di studi pregressi effettuati nell'area, da cui emerge che gli specchi lacustri di Preola, Gorghi Tondi e Murana, ubicati in corrispondenza di depressioni tipo sinkhole di natura carsica nell'area di Mazara del Vallo (TP), rappresentano delle aree umide alimentate oltre che dalle acque di precipitazione meteorica, anche dalla falda idrica sotterranea ivi affiorante (Di Maggio C. et al., 2010; Cusimano G. et al., 2006; Vassallo M., 2000). Lo stesso Piano di Gestione Rete Natura 2000 dei SIC e ZPS "Sciare e zone umide di Mazara e Marsala", nel richiamare i risultati dei principali studi pregressi condotti nell'area, indica come la principale fonte di alimentazione dei laghi di Preola e Gorghi Tondi sia rappresentata dalla falda freatica sottostante e come nei periodi di

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Si veda al riguardo il documento ARPA Sicilia "Monitoraggio e valutazione dello stato chimico delle acque sotterranee – Aggiornamento del Report attività 2016 con i risultati del monitoraggio e della valutazione dello stato chimico 2016 dei corpi idrici sotterranei Ragusano, Piana di Vittoria, Lentinese"

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Si veda al riguardo il documento ARPA Sicilia "Monitoraggio acque di transizione - attività 2015"

emungimento incontrollato della falda idrica sotterranea (in particolare fino al 1999) si sia verificato un abbassamento del livello dei laghi ed il prosciugamento del Preola e del Murana, con relativa scomparsa sia della vegetazione che della fauna caratteristica degli habitat lacustri (WWF, 2011). Ciò è indicativo del fatto che i laghi suddetti rappresentano dei corpi idrici superficiali il cui stato idrologico, ecologico e chimico è criticamente dipendente dal contributo delle acque sotterranee, in relazione al raggiungimento degli obiettivi ambientali per essi fissati dalla Direttiva 2000/60/CE. Per effettuare le valutazioni di cui alla Task T.3 del POA acque sotterranee è stata prevista l'implementazione di modelli di simulazione integrati acque sotterranee - acque superficiali, estesi all'intero corpo idrico sotterraneo oggetto di studio o soltanto alla porzione interessata dal superamento puntuale dei VS o SQ, con la finalità di stimare il contributo di inquinamento proveniente dal corpo idrico sotterraneo ai sistemi superficiali connessi, con particolare riferimento

ai laghi di Preola e Gorghi Tondi.



Figura 1.1 Modello concettuale di un ecosistema acquatico associato alle acque sotterranee e sue relazioni con il corpo idrico sotterraneo e le pressioni che su di esso insistono (European Commission, 2015)

Tali laghi, oltre ad essere individuati quali corpi idrici superficiali di transizione all'interno del Piano di Gestione 2015-2021, sono stati anche inseriti nel Registro delle Aree Protette dello stesso PdG, in quanto ricadenti in un SIC ed in una ZPS della Rete Natura 2000 (SIC ITA010005 "Laghetti di Preola e Gorghi Tondi e Sciare di Mazara", ZPS ITA 010031 "Laghetti di Preola e Gorghi tondi, Sciare di Mazara e Pantano Leone"), nonché in una Zona Vulnerabile ai Nitrati di origine agricola ai sensi della Direttiva 91/676/CEE (Direttiva Nitrati). Va inoltre evidenziato che il sistema lacustre di Preola e Gorghi Tondi, fa parte di una Riserva Naturale Integrale regionale (RNI

istituita con D.A. ARTA del 1998) e che le aree umide "Laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi", ecosistemi particolarmente sensibili e di notevole valore ambientale, sono state dichiarate, con Decreto MATTM del 28/06/2011, aree di importanza internazionale ai sensi della Convenzione Ramsar ("Convenzione relativa alle zone umide di importanza internazionale, soprattutto come habitat degli uccelli acquatici", firmata a Ramsar il 2 febbraio 1971).

La valutazione delle interazioni tra il corpo idrico sotterraneo della Piana ed i corpi idrici superficiali ad esso connessi è stata effettuata tramite strumenti modellistici di simulazione del flusso e del trasporto dei contaminanti.

I modelli matematici di simulazione del flusso e del trasporto nelle acque sotterranee consentono di rappresentare in modo semplificato un sistema idrogeologico reale, permettendo di analizzarne il comportamento in risposta a molteplici variabili, di migliorare la conoscenza dei parametri che governano un determinato fenomeno e di validare da un punto di vista fisico il modello concettuale del sistema. Essi si basano sulle equazioni che rappresentano i processi fisici che si verificano all'interno del dominio del modello e vengono detti numerici quando il sistema di equazioni viene risolto tramite tecniche di approssimazione algebrica.

Ai fini dell'implementazione del sistema modellistico relativo all'area di studio, è stata preliminarmente condotta una consistente attività di ricognizione e raccolta dati esistenti, di pianificazione e conduzione di rilievi sul campo e di interpretazione ed elaborazione dei dati, attraverso i quali è stato elaborato un preliminare modello concettuale idrogeologico dell'acquifero e sono state messe a punto le successive applicazioni modellistiche.

Nel presente documento, dopo la descrizione dell'approccio metodologico generale (capitolo 2), vengono descritti nella Sezione 2 i risultati delle attività di raccolta ed acquisizione dati finalizzate alla caratterizzazione ed alla modellizzazione concettuale del sistema (capitoli 3, 4, 5, 6), e nella Sezione 3 i risultati dell'attività di implementazione dei modelli di simulazione a scala regionale e locale della Piana, nonché le considerazioni conclusive relative allo studio effettuato (capitoli 7, 8, 9). Al termine vengono riportati i riferimenti bibliografici citati nel presente documento.

Nell'Allegato 1 sono riportati i Rapporti di prova delle analisi chimiche effettuate da ARPA Sicilia nelle acque dei laghi Murana Preola e Gorghi Tondi e nelle acque di falda prelevate dai piezometri P1 e PZ3 presso la discarica di C.da Misiddi-Campana.

Nell'Appendice A è riportato il Report finale del servizio di rilievo topo-batimetrico, svolto da Biosurvey S.r.l. per conto di ARPA Sicilia, dei laghi della Riserva Naturale Integrale Lago Preola e Gorghi Tondi – Mazara del Vallo (TP).

#### 2 Approccio metodologico generale

Le attività sviluppate per l'attuazione della Task T.3 del POA Acque sotterranee hanno avuto come finalità lo studio e l'analisi, nel sistema idrogeologico della Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara, delle interazioni tra acque sotterranee ed acque superficiali, con particolare riferimento alle interazioni tra l'omonimo corpo idrico sotterraneo (ITR19CCCS01) ed i corpi idrici superficiali "Lago della Preola" (IT19TW05529), "Gorghi Tondi Alto" (IT19TW055308), "Gorghi Tondi Medio" (IT19TW055310), "Gorghi Tondi Basso" (IT19TW055311), i quali possono essere considerati, sulla base dei dati esistenti, un ecosistema acquatico associato alle acque sotterranee, nell'accezione del termine fornita dal "*Technical Report on Groundwater Associated Aquatic Ecosystems*" della Commissione Europea (TR n. 9/2015).

Scopo delle attività di studio ed analisi della Task è quello di valutare, ai sensi del D. lgs. 30/2009 (art. 4, comma 2, lettera c, punto 2 e All. 5, punti 4.b, 4.c), lo stato chimico complessivo del corpo idrico sotterraneo in esame, caratterizzato, sulla base dei risultati del monitoraggio 2011-2016 condotto da ARPA, da superamenti puntuali dello standard di qualità del parametro nitrati e dei valori soglia dei parametri ammoniaca, cadmio e mercurio. In particolare, i superamenti puntuali di SQ/VS dei parametri nitrati, cadmio e mercurio, riscontrati nel 2016 nelle stazioni di monitoraggio "Ingrasciotta" e "Perez", sono localizzati in un settore del corpo idrico sotterraneo posto a monte idrogeologico dei laghi Preola e Gorghi Tondi (Figura 2.1), i quali, sulla base del monitoraggio effettuato da ARPA nel 2013 e nel 2015, risultano classificati in stato chimico non buono ed in stato ecologico cattivo o non superiore a sufficiente (ARPA Sicilia, 2016). Al riguardo l'attribuzione dello stato chimico non buono ai corpi idrici Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio e Gorgo Basso deriva dal superamento degli SQA del cadmio nella colonna d'acqua e del piombo nel sedimento (in Gorgo Alto il superamento riguarda solo il parametro piombo nel sedimento). L'attribuzione dello stato ecologico, che soffre dell'individuazione nel PdG di queste acque come acque di transizione, sebbene le stesse presentino caratteristiche non coerenti con tale tipologia, e quindi dei relativi EQB da determinare per la loro classificazione, risulta cattivo nei Gorghi, per l'assenza della comunità di macroinvertebrati bentonici, e non superiore a sufficiente nel lago Preola, per il superamento dello SQA del parametro arsenico nella matrice acqua. Per quanto riguarda quest'ultimo parametro, che rientra tra gli inquinanti specifici non appartenenti all'elenco di priorità presi in esame a supporto della valutazione dello stato ecologico (Tab. 1/B e 3/B del DM 260/2010), il superamento dello SQA-MA nella matrice acqua e/o nella matrice sedimento, emerso dai monitoraggi 2013-2015, è stato riscontrato in tutti e 4 i laghi.

Si evidenzia inoltre che, ai sensi del D. lgs. 30/2009 (All. 3, parte A, tabella 1), lo stato chimico di un corpo idrico sotterraneo si definisce buono quando "la composizione chimica del corpo idrico sotterraneo è tale che le concentrazioni degli inquinanti.... non sono tali da impedire il conseguimento degli obiettivi ambientali di cui agli articoli 76 e 77 del D. lgs. 152/06 per le acque superficiali connesse, né da comportare un deterioramento significativo della qualità ecologica o chimica di tali corpi idrici né da recare danni significativi agli ecosistemi terrestri direttamente dipendenti dal corpo idrico sotterraneo".



Figura 2.1 Stato chimico puntuale 2011-2016 del CIS Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara (in rosso sono indicate le stazioni in stato chimico scarso, in verde quelle in stato chimico buono; in blu sono perimetrati i corpi idrici lacustri Murana Preola e Gorghi Tondi; in marrone è indicata la perimetrazione del CIS riportata nel PdG)

Nello stesso decreto la procedura per la valutazione dello stato chimico delle acque sotterranee prevede che, nel caso in cui uno standard di qualità o un valore soglia sia superato in uno o più siti di monitoraggio del corpo idrico sotterraneo, che comunque rappresentino non oltre il 20 per cento della sua area totale o del suo volume, il corpo idrico si possa considerare in buono stato chimico qualora, sulla base di indagini specifiche finalizzate alle valutazioni di cui all'Allegato 5, risultino soddisfatte le condizioni concernenti il buono stato chimico delle acque sotterranee definite dal decreto.

Il documento "Guidance on Groundwater Status and Trend Assessment" (CIS Guidance n. 18, European Commission, 2009) ha definito, sulla base di quanto stabilito dalle Direttive WFD e GWD, la batteria di test da applicare ai corpi idrici sotterranei, in base alla tipologia di corpo idrico ed alle relazioni con i sistemi idrici superficiali connessi, per la verifica delle condizioni concernenti il buono stato chimico, nonché quantitativo, degli stessi. La suddetta batteria di test, che è stata richiamata nelle Linee guida ISPRA n. 157/2017 "Criteri tecnici per l'analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei" (ISPRA, 2017), comprende il test "Acque superficiali connesse" (Test 2) da utilizzare, laddove pertinente, come strumento per la valutazione dello stato chimico, oltre che dello stato quantitativo, dei corpi idrici sotterranei (Figura 2.2).



Figura 2.2 Batteria di test per la valutazione dello stato chimico e quantitativo delle acque sotterranee (European Commission, 2009 richiamato in ISPRA, 2017)

Nel caso del corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, visti i superamenti puntuali di SQ e VS riscontrati in alcune stazioni di monitoraggio rappresentative e vista la classificazione di stato chimico ed ecologico dei corpi idrici superficiali ad esso connessi, risulta pertinente, nell'ambito dell'indagine finalizzata ad ottenere una valutazione complessiva del suo stato chimico, effettuare, sulla scorta dei risultati del monitoraggio e di un idoneo modello concettuale del corpo idrico sotterraneo, le valutazioni di cui all'All. 5, punti 4.b, 4.c del D. lgs. 30/2009, riguardanti:

"- b) la quantità e le concentrazioni degli inquinanti che sono o che è probabile siano trasferiti dal corpo idrico sotterraneo alle acque superficiali connesse o agli ecosistemi terrestri che ne dipendono direttamente;

- c) l'impatto probabile delle quantità e concentrazioni degli inquinanti trasferiti alle acque superficiali connesse e agli ecosistemi terrestri che ne dipendono direttamente...".

Pertanto, nell'ambito dell'attuazione della Task T.3 del POA Acque sotterranee, è stata condotta un'indagine specifica sul sistema idrogeologico della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, articolata nelle seguenti 4 fasi di lavoro:

- Ricognizione ed analisi dei dati esistenti per la definizione dell'inquadramento geologico, idrogeologico, idrologico e ambientale del sistema;
- Acquisizione ed elaborazione dei dati funzionali all'elaborazione del modello concettuale ed all'implementazione dei modelli di simulazione ed elaborazione del modello concettuale idrogeologico preliminare dell'acquifero;
- Implementazione del modello numerico integrato del sistema idrogeologico della Piana per l'analisi a scala regionale dell'idrodinamica sotterranea dell'acquifero e delle sue interazioni con i corpi idrici superficiali connessi;
- 4. Implementazione del modello numerico di flusso e trasporto dei contaminanti per la valutazione a scala locale del probabile trasferimento degli inquinanti dal corpo idrico sotterraneo ai corpi idrici superficiali connessi dei laghi Preola, Murana e Gorghi Tondi.

Per le finalità della fase 1 è stata condotta un'attività di ricognizione e raccolta di dati esistenti sull'area di studio, al fine di costruire un primo quadro di conoscenza del sistema nelle sue componenti naturali ed antropiche. I risultati di tale attività sono illustrati nel capitolo 3 del presente documento.

Per le finalità della fase 2 è stata condotta un'attività di pianificazione ed esecuzione di rilievi sul campo, nonché un'attività di informatizzazione, interpretazione ed elaborazione dei principali dati raccolti, al fine di integrare il quadro di conoscenza derivante dalla fase 1, elaborare un preliminare

modello concettuale idrogeologico dell'acquifero e supportare le successive fasi dell'indagine. I risultati della fase 2 sono illustrati nei capitoli 4, 5 e 6 del presente documento.

Per quanto concerne le fasi 3 e 4 dello studio, sono stati messi a punto strumenti modellistici per la simulazione dei processi idrologici, idrogeologici e di trasporto dei contaminanti, con codici di calcolo differenti in base ai processi da simulare ed alla loro scala di rappresentazione, secondo un approccio "modelli in cascata" con un dettaglio di approfondimento crescente dalla scala regionale a quella locale. I codici di calcolo utilizzati sono stati quelli della suite MIKE DHI, sui quali ARPA ha effettuato uno specifico percorso di addestramento finalizzato all'utilizzo dei software per le valutazioni previste nella task T.3 del POA Acque sotterranee.

Le attività modellistiche sono state finalizzate a caratterizzare, mediante un approccio deterministico, il sistema idrogeologico della Piana di Castelvetrano - Campobello di Mazara.

Per le finalità della fase 3 è stato implementato un modello numerico integrato acque sotterranee - superficiali relativo al sistema idrogeologico della Piana, con la finalità di rappresentare l'idrodinamica sotterranea e la dinamica di interscambio tra l'acquifero ed il reticolo idrografico interagente, nonché per estrarre dal modello a scala regionale le condizioni al contorno per il modello locale relativo alla zona dei laghi. I suddetti processi sono stati simulati in un sistema modellistico integrato, relativo sia alle acque superficiali (con l'approfondimento dei processi idrologici ed idrodinamici relativi al bacino connesso con il corpo idrico sotterraneo), sia alle acque sotterranee (con l'analisi delle dinamiche del deflusso nella zona satura dell'acquifero), con particolare attenzione all'interconnessione superficiale - sotterraneo ed all'analisi del bilancio idrico dell'acquifero. I risultati della fase 3 sono illustrati nel capitolo 7 del presente documento.

Per le finalità della fase 4 è stato implementato un modello di simulazione del flusso e del trasporto dei contaminanti in falda riguardante solo il settore occidentale del corpo idrico sotterraneo della Piana, nella zona prossima ai laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi (modello a scala locale), con la finalità di stimare l'eventuale trasferimento dei contaminanti presenti in falda ai corpi idrici superficiali connessi. Sulla base del modello di flusso locale, a maggior dettaglio, è stato simulato il trasporto dei contaminanti arsenico e nitrati provenienti dalle fonti di pressione sia di tipo puntuale (discariche RSU), che di tipo diffuso (aree ad uso prevalentemente agricolo) presenti nell'area. I risultati della fase 4 sono illustrati nel capitolo 8 del presente documento.

Per l'implementazione del modello idrogeologico integrato di cui alla fase 3 sono stati utilizzati i seguenti codici di calcolo (Figura 2.3):

• MIKE SHE: per la simulazione del flusso nella zona satura dell'acquifero e per la simulazione delle relative interazioni con la rete idrografica superficiale;

- MIKE HYDRO River HD: per la simulazione dell'idrodinamica fluviale nella rete idrografica interagente con l'acquifero;
- MIKE HYDRO RR NAM: per simulare il processo idrologico di trasformazione degli afflussi in deflussi a scala di bacino.

Per l'implementazione del modello locale di cui alla fase 4 è stato utilizzato il codice di calcolo FEFLOW, un codice numerico agli elementi finiti per la modellazione dei processi di flusso e trasporto in mezzi porosi e fratturati, in condizioni sia sature che insature.



Figura 2.3 – Modelli implementati e relativi codici di calcolo utilizzati nello studio relativo alla Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara

## SEZIONE 2 – FASE CONOSCITIVA INIZIALE

## 3 Inquadramento dell'area di studio: analisi dei dati esistenti

## 3.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

L'area presa in esame ricade all'interno dell'attuale perimetrazione del corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara (d'ora in avanti chiamato CIS), secondo il Piano di gestione del Distretto Idrografico della Sicilia 2015-2021. L'area, che si estende per circa 227 km<sup>2</sup>, ricade interamente nelle seguenti tavolette IGM della Carta d'Italia: 257 II SO Castelvetrano, 257 II SE Partanna, 265 I NE Valle Belice, 265 I NO Campobello di Mazara, 265 I SE Porto Palo, 265 I SO Selinunte, 265 IV NE Mazara del Vallo, 265 IV SE Torretta Granitola. L'area è compresa nei territori comunali di Mazara del Vallo, Campobello di Mazara, Castelvetrano e Partanna e comprende da ovest verso est, alcune porzioni dei bacini idrografici del Fiume Delia-Arena, Modione e Belice (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Perimetrazione del CIS Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara riportata nel PdG 2015-2021. In blu sono evidenziati i limiti dei bacini idrografici afferenti al CIS. Sullo sfondo la carta geolitologica del Piano Territoriale Paesaggistico in scala 1:50.000 (La Rosa A., De Domenico R., 2006)

L'assetto geomorfologico dell'area in esame è il risultato delle differenti azioni modellanti che tettonica ed agenti erosivi hanno avuto sulle unità affioranti e subaffioranti. L'area presenta, sia ai margini che al suo stesso interno, delle importanti incisioni fluviali (Fiume Delia-Arena, Fiume Modione e Fiume Belice) che si impostano su discontinuità tettoniche, in accordo con gli schemi geologico-strutturali di diversi autori (Aruta et al., 1972; Bigi et al., 1992; Vassallo, 2000; D'Angelo et al., 2001). Il reticolo idrografico interno all'area afferisce in prevalenza al Fiume Modione ed assume un andamento da sub-dendritico a pinnato, per via delle basse pendenze dei versanti e del parziale controllo tettonico.

La morfologia è rappresentata prevalentemente da un paesaggio collinare, con quote che raramente superano i 250 m s.l.m. e con pendenze generalmente comprese entro il 20%, passante verso il mare ad una ampia piana costiera. Il settore più occidentale di questa piana costiera è caratterizzato dalla presenza di importanti fenomeni di subsidenza e sprofondamento (sinkhole) della calcarenite per dissoluzione carsica dei sottostanti gessi (Cipolla F. 1934; Trevisan & Di Napoli 1937; Cusimano et al., 2006), che localmente, nella zona a sud della Foce del F. Arena, determinano l'affioramento della superficie piezometrica con conseguente origine di bacini lacustri (laghi Murana, Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio, Gorgo Basso), che insistono su un'unica depressione allungata con direzione NO-SE, pressappoco parallela alla linea di costa. Tale assetto geometrico suggerisce la probabile presenza di una famiglia di discontinuità tettoniche orientate NO-SE che potrebbe aver guidato il processo di dissoluzione carsica nei gessi.

Per la caratterizzazione e la descrizione morfologico-topografica dell'area di studio è stato utilizzato il DTM a risoluzione 2m x 2m fornito dal Dipartimento Regionale Urbanistica della Regione Siciliana, a copertura dell'intera area della Piana, che è stato successivamente integrato, per finalità connesse all'implementazione del modello locale di flusso dell'acquifero, con un rilievo topo-batimetrico di dettaglio dei fondali dei 5 laghi Murana, Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio e Gorgo Basso, effettuato appositamente per le finalità del POA Acque sotterranee (cfr. paragrafo 6.2).

La geologia di superficie è stata studiata da numerosi autori, ma a scale e con dettagli differenti in diverse porzioni dell'acquifero. I riferimenti di cartografia geologica ufficiale, con caratteristiche arealmente uniformi, sono la Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000 (fogli Castelvetrano, Alcamo, Mazara del Vallo, Sciacca), che risulta datata (rilevamenti nell'area dell'acquifero tra 1880 e 1953) e la più recente Carta Geologica della Sicilia 1:250.000 (ISPRA, 2014). Il settore ovest è soltanto parzialmente coperto dalla carta geologica del Foglio 617 "Marsala" in scala 1:50.000 (D'Angelo, Vernuccio, 1994); per la restante parte dell'area di studio, è stata consultata la carta

geolitologica del Piano Territoriale Paesaggistico a scala 1:50.000 (La Rosa A., De Domenico R., 2006) e le carte geologiche dei Piani Regolatori dei comuni di Castelvetrano, Campobello di Mazara e Mazara del Vallo. Mettendo a confronto le varie carte geologiche reperite, sulla base dei dati di letteratura ed a seguito di un rilievo speditivo in campo in alcuni siti di maggiore complessità interpretativa, è stata adottata la carta geolitologica del Piano Territoriale Paesaggistico come base di partenza per l'elaborazione del modello geolitologico dell'acquifero che ospita il CIS (cfr. paragrafi 4.1 e 4.2); nonostante alcune approssimazioni fatte sulle distinzioni tra le formazioni litostratigrafiche, questa carta geolitologica riassume bene le frammentarie informazioni presenti in letteratura sull'area in esame.

Le unità poste alla base della successione stratigrafica che costituisce l'acquifero oggetto di studio sono quelle del Miocene superiore, rappresentate da sedimenti in prevalenza terrigeni della *Fm. Terravecchia* (Tortoniano sup.-Messiniano inf.); questa Formazione presenta importanti variazioni verticali e laterali di facies, a testimonianza della complessa morfologia del bacino di sedimentazione. Dal basso verso l'alto presenta un membro conglomeratico, seguito da uno sabbioso e, a chiusura della successione, un membro pelitico-argilloso; gli spessori vanno dai 300 ai 1200 m. Questa formazione affiora in maniera continua ed estremamente rappresentativa nel bacino del Fiume Delia-Arena, dal quale viene incisa e portata in affioramento.

A seguito della crisi di salinità del Messiniano sup, durante la quale per motivi tettonici il Mar Mediterraneo si isola dall'Oceano Atlantico, si instaurano le condizioni per la deposizione di evaporiti, che nell'area in esame sono costituite da gessi selenitici macrocristallini in grossi banchi, gessareniti biancastre e argille gessose. La successione evaporitica messiniana si deposita in discordanza sulla *Fm. Terravecchia*. L'assenza di affioramenti di Tripoli e di membri saliferi (cloruro di sodio, sali potassici e magnesiaci) ed il contatto al tetto con i Trubi, suggerisce l'attribuzione di questi gessi al secondo ciclo evaporitico (*Fm. Di Pasquasia*) nella accezione di Decima e Wezel del 1971 (Vassallo, 2000) e in accordo con la letteratura geologica delle aree limitrofe (Bommarito et al., 1992; Bommarito e Di Pietro, 2000). La zona di affioramenti di modeste entità si rinvengono nel settore ovest in prossimità della Foce del Fiume Delia-Arena in C.da Dubesi e C.da Gilletto (Vassallo, 2000; D'Angelo & Vernuccio, 1994); sempre nel settore occidentale sono presenti in sub affioramento in corrispondenza della depressione tipo sinkhole che ha generato i laghi della zona.

La sequenza gessosa è seguita in discordanza da depositi trasgressivi, del tipo calcari marnosi e marne bianco-grigiastre a globigerine (Trubi) del Pliocene inferiore (Zancleano-Piacenziano inf.), a

testimonianza della fine della crisi di salinità e dell'instaurarsi di un ambiente di sedimentazione pelagico. Gli affioramenti di maggiore rilievo si trovano in prossimità dell'abitato di Castelvetrano, nel versante in destra idrografica del fiume Belice nei pressi di Località Rocche di Donna Lucia, ed in prossimità della foce del Fiume Delia-Arena.

Sopra i Trubi si deposita la successione clastico-torbiditica della Fm. Marnoso-arenacea della Valle del Belice (d'ora in avanti denominata MAB) (Pliocene sup: Piacenziano - Gelasiano), con spessore complessivo affiorante fino a 700 m. Questo importante spessore è il frutto di differenti contesti ed eventi deposizionali che Vitale (1990) sintetizza in 6 diverse Unità Stratigrafico-Deposizionali. Semplificando la suddivisione operata da Vitale (1990), la MAB può essere suddivisa, in base alle caratteristiche granulometriche e composizionali, nei seguenti membri: membro arenaceo, costituito da alternanze di arenarie torbiditiche quarzose con livelli pelitici passanti verso l'alto a biocalcareniti ad Amphistegine, con uno spessore complessivo di circa 350 m; membro argillososabbioso, composto da argille marnose intercalate a sabbie contenenti foraminiferi planctonici e rari molluschi, con uno spessore complessivo di circa 300 m; membro calcarenitico, di spessore relativamente ridotto, prevalentemente costituito da calcareniti risedimentate ad Amphistegine. Questi depositi presentano importanti variazioni di spessore, con generale assottigliamento verso sud, controllate da una tettonica sinsedimentaria (Vitale, 1990; Vitale, 1998; Basilone, 2012). Sulla base degli affioramenti della carta geolitologica del Piano Territoriale Paesaggistico, di studi di dettaglio (Vitale, 1990; Vitale & Sulli, 1997) e dei riscontri con le numerose stratigrafie consultate, la MAB è stata suddivisa, in base alle caratteristiche granulometriche e di permeabilità, trascurando i rapporti cronostratigrafici, in un membro a prevalente litologia sabbioso-calcarenitica (MABc) ed uno più prettamente pelitico-argilloso (MABa). Il MABc è costituito prevalentemente dal membro calcarenitico s.s., dalla parte superiore del membro arenaceo (biocalcareniti ad Amphistegine ed areniti; si veda la descrizione delle unità MAB 4 e MAB 3 fatta da Vitale, 1990) e dalla porzione a prevalente litologia sabbiosa del membro argilloso-sabbioso. Il MABa è costituito in prevalenza dalla porzione più basale e meno permeabile del membro arenaceo (peliti e areniti quarzose; si veda la descrizione delle unità MAB 2 e MAB 1 fatta da Vitale, 1990). I litotipi della MAB nell'areale di studio si rinvengono in affioramento solo nel settore nord orientale, ma costituiscono in profondità la porzione più significativa dell'intero acquifero.

A partire dal Santerniano medio-superiore (manca nell'area la parte basale del Santerniano per hiatus erosivo) ha inizio la deposizione di Argille che prosegue fino all'Emiliano (Argille del Santerniano-Emiliano, d'ora in poi denominate ASE), in discordanza sulla *Fm. Terravecchia*, sui

depositi evaporitici e sui terreni pliocenici; queste argille sono state rinvenute nel settore sudorientale, in corrispondenza delle foci dei fiumi Modione e Belice (D'Angelo et al., 2001).

Sempre in discordanza sui terreni neogenici si ritrovano i depositi marini della "*Calcarenite di Marsala*" (CM), riferibili all'Emiliano – Siciliano e costituiti da calcareniti litoclastiche e bioclastiche e argille sabbiose con spessori che nella zona non superano generalmente i 40 m (D'Angelo et al., 2001; Basilone 2012). Lo spessore delle calcareniti aumenta in direzione della linea di costa e verso Ovest; verso Sud-Est le calcareniti passano eteropicamente a sedimenti sabbioso-argillosi progressivamente arricchiti nella frazione più fine (Figura 3.2; D'Angelo et al., 2001).

Nel settore sud-orientale i depositi indicano che a partire dal Santerniano medio-superiore fino al Siciliano (deposizione delle ASE e delle sovrastanti argille in eteropia con le Calcareniti di Marsala) l'ambiente deposizionale si approfondisce e la successione argillosa raggiunge spessori vicini ai 700 m (pozzo Marinella 2) (D'Angelo et al., 2001).

Segue una fase regressiva dovuta alla tettonica post-siciliana, che ha prodotto un generale sollevamento della costa occidentale siciliana; d'ora in avanti fenomeni di sollevamento tettonico e oscillazioni glacioeustatiche daranno origine ad una successione di terrazzi marini (TM) distinguibili in otto ordini. Il primo e più grande di questi terrazzi, conosciuto in letteratura come "Grande Terrazzo Superiore" (GTS), si deposita durante una fase interglaciale, nel pleistocene medio-superiore, a seguito di una trasgressione marina. Il GTS è costituito da calcarenite giallastra ben cementata e scarsamente fossilifera con giacitura sub orizzontale e spessore non superiore a 2 m; si sviluppa localmente tra 115 e 214 m slm. I successivi sette ordini di terrazzi, costituiti da strati sabbioso-calcarenitici e conglomeratici, si depositano su fasce altimetriche gradualmente più basse e con spessori appena decimetrici (D'Angelo et al., 2001).

I depositi attuali sono costituiti da sabbie costiere, depositi lacustri e palustri, depositi eluviali, colluviali ed alluvionali; sono accomunati da ridotti spessori, al massimo di alcuni metri, e distribuzioni areali limitate, ritenute poco significative alla scala dell'acquifero in esame.

Nell'area interessata dall'acquifero, la tettonica Pliocenica ha determinato una compressione che ha dato luogo ad una struttura sinclinalica che interessa i depositi pre-Pliocenici, con direzione dell'asse NE-SO ed immersione a SO, entro la quale si è depositata sintettonicamente la MAB e, più di recente, le CM ed i sovrastanti terrazzi marini.



Figura 3.2 - Schema dei rapporti stratigrafici dei terreni in facies calcarenitica e argillososabbiosa del Pleistocene inferiore (da D'Angelo et al., 2001)

## 3.2 Inquadramento idrogeologico ed assetto idrodinamico

Per la definizione dell'inquadramento idrogeologico della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, sono stati raccolti i dati idrogeologici disponibili in tutti gli studi specialistici pregressi reperiti sull'area di studio e relativi alle seguenti tipologie di dati:

- Carte idrogeologiche, colonne e sezioni idrogeologiche dell'acquifero della Piana;
- Carte degli spessori dell'acquifero della Piana;
- Carte isopiezometriche storiche e relativi tabulati di dati piezometrici storici dell'acquifero;
- Risultati del monitoraggio della soggiacenza del corpo idrico sotterraneo della Piana in corrispondenza dei siti della rete freatimetrica del DAR- Servizio Osservatorio delle Acque;
- Parametri idrodinamici dell'acquifero derivanti da prove di emungimento/portata effettuate nell'ambito di studi pregressi;
- Ubicazioni di pozzi e delle relative stratigrafie.

Sulla base dei dati raccolti è stato possibile, partendo dalle formazioni litostratigrafiche individuate e dalle loro specifiche caratteristiche di permeabilità (tipologia prevalente e grado), riconoscere nella Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara due complessi idrogeologici:

 <u>Complesso idrogeologico argilloso-marnoso</u>, comprendente la Fm. Terravecchia, la Fm. dei Trubi, il Membro argilloso della Fm. Marnoso-arenacea della Valle del Belice (MABa) e le Argille del Santerniano-Emiliano (ASE). Tale complesso, coincidente con il Complesso delle rocce impermeabili di Mouton (*Carta delle risorse idriche sotterranee*, Fried J.J., Mouton J., Mangano F., 1982), è caratterizzato da un grado di permeabilità basso per porosità e costituisce il substrato regionale dell'acquifero.

Complesso idrogeologico calcarenitico-sabbioso, comprendente il membro a prevalente litologia calcarenitico-arenacea della Fm. Marnoso-arenacea della Valle del Belice (MABc), le Calcareniti di Marsala (CM) ed i soprastanti terrazzi marini (TM). Tale complesso, coincidente con il Complesso delle Formazioni Detritiche Plio-Quaternarie di Mouton (Carta delle risorse idriche sotterranee, Fried J.J., Mouton J., Mangano F., 1982), è caratterizzato da un grado di permeabilità medio per porosità e secondariamente per fratturazione (grado di permeabilità medio-alto localmente ridotto specie nella Fm. Marnoso-arenacea per la presenza di livelli argilloso-limosi intercalati alle litofacies più permeabili). Esso è sede di un acquifero a falda libera superficiale che localmente, nell'area compresa tra C.da Bresciana (a sud-est dell'abitato di Campobello di Mazara) e C.da Canalotto Favata (a sud dell'abitato di Castelvetrano), caratterizzata presenza di una falda profonda localmente semiconfinata, passa ad un assetto multifalda. L'origine della falda profonda localmente semiconfinata è legata alla presenza, nell'area indicata, di intercalazioni e lenti argillose discontinue all'interno del membro sabbioso-calcarenitico della Fm. Marnoso-arenacea della Valle del Belice ed in parte delle soprastanti Calcareniti di Marsala, che svolgono complessivamente il ruolo di acquitardo locale interposto tra i terreni sabbioso-calcarenitici. Il complesso idrogeologico calcareniticosabbioso sede dell'acquifero risulta delimitato, sia lateralmente che alla base, dal Complesso idrogeologico argilloso-marnoso (depositi della Fm. Terravecchia, affioranti ad ovest lungo il Fiume Delia-Arena, Argille del Santerniano-Emiliano affioranti a sud-est, argille della Fm. Marnoso-Arenacea della Valle del Belice e Fm. Trubi affioranti a nord-est), che ne costituisce il substrato impermeabile. L'estensione dell'acquifero che deriva dalla sua perimetrazione effettuata sulla base dell'affioramento del substrato impermeabile è pari a 260.7 Km<sup>2</sup> (cfr. paragrafi 4.2 e 4.5). Il suo spessore è determinato dall'andamento del substrato impermeabile, influenzato dalla struttura sinclinalica regionale dei depositi pre-Pliocenici, con direzione dell'asse NE-SO ed immersione a SO. Lo spessore dell'acquifero è variabile ed in generale si riduce procedendo da est verso ovest, andando da spessori di circa 200 m in corrispondenza di C.da Bresciana a spessori di alcune decine di metri lungo la fascia costiera occidentale. Nelle restanti zone marginali del bacino (limite settentrionale, orientale e sud-orientale), gli spessori si riducono a qualche metro.

In base alla scala di studio, non è stato preso in esame il comportamento idrogeologico dei depositi attuali, in quanto di scarso rilievo ai fini dell'elaborazione del modello geolitologico ed idrogeologico regionale dell'acquifero. Per quanto concerne infine il *Complesso idrogeologico Gessoso*, presente solo localmente nella successione litostratigrafica della Piana (lungo una ristretta fascia a nord di Castelvetrano e nella zona dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi) e contraddistinto da un grado di permeabilità molto variabile (da basso, se ricco di componente gessarenitica e marnoso-argillosa, a localmente medio lungo i sistemi carsici), ai fini dell'elaborazione del modello concettuale idrogeologico dell'acquifero, è stato attribuito a tale complesso il grado di permeabilità basso riscontrato nei termini gessoso-marnosi descritti nei log stratigrafici che intercettano la Fm. Gessoso-Solfifera della successione litostratigrafica della Piana (ESA37, ESA29).

Pertanto, sulla base dei criteri per l'identificazione degli acquiferi di cui all'Allegato 1 del D. lgs. 30/2009 (Figura 3.3), è stato possibile, a partire dalle formazioni individuate, riconoscere nella Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara un sistema idrogeologico caratterizzato dalla presenza, all'interno del complesso idrogeologico *calcarenitico-sabbioso*, di un acquifero caratterizzato da assetti idrodinamici diversi, ed in particolare:

- <u>una falda libera superficiale</u> circolante nei terreni arenaceo-conglomeratici e sabbiosi dei terrazzi marini (TM) e delle Calcareniti di Marsala (CM) e, localmente, nella porzione calcarenitica superiore della Fm. Marnoso-arenacea della Valle del Belice (MABc). Tale falda è riconoscibile nell'area a sud ed a ovest di C.da Bresciana, dove le intercalazioni pelitico-marnose nei terreni calcarenitico-sabbiosi diminuiscono fino a scomparire, nonché nella fascia a nord di Castelvetrano fino a Partanna, dove la falda non mostra evidenze di confinamenti significativi. La potenzialità della falda libera superficiale è generalmente ridotta, specialmente nella porzione più occidentale della Piana, per via degli esigui spessori dell'acquifero saturo (da 1 m a circa 10-20 m), e nella porzione più meridionale della fascia risulta invece più alta nella fascia più a nord, in prossimità dei pozzi Staglio e Magaggiari, dove si raggiungono spessori di acquifero saturo di circa 50 m.
- <u>un sistema multifalda</u>, a falda superiore libera in continuità con quella sopradescritta, circolante nei terreni arenaceo-conglomeratici e sabbiosi dei terrazzi marini (TM) e delle Calcareniti di Marsala (CM), ed una falda semiconfinata in profondità, contenuta nel membro a prevalenza sabbioso-arenitica della Fm. Marnoso-arenacea (MABc). Come già descritto, tale sistema è presente localmente nell'area compresa tra C.da Bresciana (a sud-est dell'abitato di Campobello di Mazara) e C.da Canalotto Favata (a sud dell'abitato di Castelvetrano). La falda semiconfinata profonda presenta un'elevata potenzialità per via

degli importanti spessori di acquifero saturo, che in C.da Bresciana raggiungono i 150 m, restituendo valori di trasmissività compresi tra  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s (Cassa per il Mezzogiorno, 1982; Bonanno et al., 2000) Per un maggior dettaglio sui parametri idrodinamici dell'acquifero, si rimanda al paragrafo 4.3.



Figura 3.3 - Schema per l'identificazione degli acquiferi a partire dai complessi idrogeologici previsto dal D. lgs. 30/2009

L'analisi dei dati e dei risultati degli studi pregressi effettuati sull'acquifero, ha consentito di individuare alcune caratteristiche descrittive del modello concettuale del sistema, come meglio specificato di seguito. L'alimentazione dell'acquifero avviene per ricarica meteorica (infiltrazione efficace delle precipitazioni) attraverso un'area corrispondente all'estensione superficiale dello stesso, con prevalente zona di alimentazione posta nel settore nord-orientale, posto tra gli abitati di Castelvetrano e Partanna, caratterizzato da un maggiore rilievo altimetrico. Il deflusso sotterraneo generale procede da NE verso SO, in direzione del mare, ed è influenzato dall'andamento concavo del substrato (con asse allungato NE-SO), in parte determinato dalla struttura sinclinalica regionale. Localmente il deflusso subisce delle modificazioni a causa: 1) degli scambi idrici con il Fiume Modione; 2) degli emungimenti prolungati nel tempo (specialmente ad uso idropotabile, concentrati in C.da Staglio ed in C.da Bresciana).

La falda libera superficiale è in connessione idraulica con il fiume Modione nei tratti del reticolo che attraversano gli affioramenti calcarenitici dell'acquifero. In corrispondenza di tali tratti si verificano scambi idrici fiume-falda variabili nel tempo, con flussi alimentanti o drenanti l'acquifero in funzione delle variazioni temporali del locale assetto idrodinamico della falda e del regime dei deflussi superficiali. Dati di letteratura basati su studi pregressi effettuati nell'area negli anni '70-'80 indicano per il fiume Modione un comportamento prevalentemente alimentante la falda (Cassa per il Mezzogiorno, 1982; Giannotti et al., 1972). Tuttavia uno studio eseguito nel 1966 dall'Ente Minerario Siciliano e dal CNEN (Dall'Aglio M. e Tedesco C., 1968) mostra in

quegli anni una dinamica dei rapporti fiume-falda, in corrispondenza del fiume Modione, differente. Infatti in quel periodo è stata documentata l'esistenza lungo l'incisione del fiume Modione di alcune sorgenti di notevole importanza ubicate lungo l'incisione fluviale del Modione, come la sorgente Staglio di portata pari a circa 50 l/s (Figura 3.4), menzionata anche nello studio Arlab (Cassa per il Mezzogiorno, 1982) che la indica come esaurita già nel 1982.

Sulla base dei dati raccolti è possibile ipotizzare, come peraltro indicato nello studio Arlab, un'alterazione dei rapporti falda/fiume da parte dei prelievi successivamente attivati in quel settore dell'acquifero, con particolare riferimento ai prelievi del campo pozzi realizzato in C.da Staglio, che avrebbe comportato un abbassamento piezometrico della falda tale da portare all'estinzione della sorgente sopraindicata ed all'alterazione dei rapporti idrodinamici fiume-falda.



Figura 3.4 - Ubicazione della sorgente Staglio lungo l'asta del fiume Modione, oggi esaurita (immagine tratta da Dall'Aglio M. e Tedesco C., 1968)

Per quanto riguarda l'analisi dell'assetto piezometrico dell'acquifero, si è fatto riferimento alle carte idrogeologiche contenute negli studi pregressi effettuati sul sistema idrogeologico, nonché alle serie temporali dei dati di soggiacenza della falda rilevati dalle 3 stazioni della rete freatimetrica regionale realizzata dall'ex Ufficio Idrografico della Regione, oggi Dipartimento Regionale Acque e Rifiuti – Servizio Osservatorio delle Acque.

Secondo gli studi pregressi effettuati sull'acquifero, gli emungimenti esercitati dai pozzi per uso idropotabile ed irriguo diffusamente presenti nell'area ha causato fenomeni di sovrasfruttamento dello stesso, determinando importanti abbassamenti della superficie piezometrica: dal confronto tra l'andamento della superficie piezometrica relativa al 1981 (Figura 3.5) e quello relativo al 1999 (Figura 3.6) è emerso un abbassamento medio di 20 m con valori massimi di 40-45 m in corrispondenza del campo pozzi Staglio (Bonanno et al., 2000). Nella fascia costiera sono stati inoltre osservati fenomeni di ingressione marina, studiata più in dettaglio nel settore occidentale da Vassallo (2001) (Figura 3.7) e da Cusimano et al. (2006).



Figura 3.5 - Perimetrazione e carta isopiezometrica relativa all'anno 1981 dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara realizzata da Arlab – scala 1:100.000 (Cassa per il Mezzogiorno, 1982).



Figura 3.6 - Carta idrogeologica della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara relativa all'anno 1999 (Bonanno et al., 2000)



Figura 3.7 - Carta idrogeologica del settore occidentale dell'acquifero (Vassallo, 2000)

Per quanto concerne le 3 stazioni della rete freatimetrica regionale ricadenti nel CIS della Piana, le caratteristiche delle stazioni, realizzate nel 2002, sono riassunte in Tabella 3.1, mentre la loro ubicazione è riportata in Figura 3.8. Tra esse, la stazione "Bresciana TR11" è attrezzata per misure in continuo dei livelli di soggiacenza della falda.

Tabella 3.1 - Caratteristiche costruttive delle stazioni della rete freatimetrica regionale ricadenti nel CIS della Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara

Nome	Località	Quota piano campagna (m s.l.m.)	Altezza bocca piezometro (m da p.c.)	Profondità (m)	Diametro perforazione (mm)	Diametro piezometro (mm)	Zona fenestrata (m da p.c.)	Sistema di Telemisura
Bresciana TR11	Campobello di Mazara (TP)	58	0.24	80	250	100	40 - 45 60 - 75	installato
Staglio 11	Castelvetrano (TP)	228	0.24	80	250	100	50 - 75	non installato
Staglio 3	Castelvetrano (TP)	181	0.20	80	250	100	50 - 75	non installato



Figura 3.8 - Ubicazione delle stazioni della rete freatimetrica regionale ricadenti nel CIS della Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara

In figura 3.9 sono riportati gli andamenti temporali dei livelli di soggiacenza della falda registrati nei 3 piezometri della rete freatimetrica regionale ricadenti nel CIS della Piana, relativamente al periodo 2005-2017 preso in esame nelle successive elaborazioni modellistiche (cfr. paragrafo 7.4).

Per quanto concerne la misura dei livelli di soggiacenza registrati nei tre piezometri della rete freatimetrica, occorre precisare che i piezometri Bresciana TR11 e Staglio 11, ubicati in prossimità di pozzi in emungimento continuo per scopi idropotabili (distanze dell'ordine della decina di metri), ricadono all'interno del loro raggio di influenza, per cui le soggiacenze misurate in tali piezometri risultano influenzate dagli abbassamenti indotti dai prelievi. Il piezometro Staglio 3 invece, distante circa 350 m dal più vicino pozzo in emungimento continuo (Pozzo Clemente), risente in misura molto minore degli effetti degli emungimenti continui e risulta pertanto rappresentativo di condizioni relativamente meno disturbate dell'acquifero.



Figura 3.9 – Andamento temporale dei livelli di soggiacenza della falda misurata nei 3 piezometri della rete freatimetrica regionale ricadenti nel CIS (periodo 2005-2017)

Per quanto concerne la parametrizzazione idrodinamica dell'acquifero in esame, i dati disponibili sono molto limitati. Lo studio Arlab (Cassa per il Mezzogiorno, 1982) riporta i seguenti valori di trasmissività e coefficiente di immagazzinamento dedotti da prove eseguite in regime transitorio in due pozzi siti in C.da Bresciana (Tabella 3.2).

Tabella 3.2 - Parametri idrodinamici dell'acquifero tratti dallo studio Arlab (Cassa per il Mezzoggiorno, 1982)

Pozzi	Trasmissività (m²/s)	Permeabilità (m/s)	Coefficiente di immagazzinamento	Portata specifica (m²/s)
Pozzi Bresciana	1.1*10 <sup>-3</sup>	1.7 *10 <sup>-5</sup>	0.05%₀	
Altri pozzi disponibili				1.8*10 <sup>-3</sup>

## 3.3 Caratterizzazione termo-pluviometrica ed idrologica

Al fine di definire un primo inquadramento meteoclimatico ed idrologico della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara sono stati reperiti, omogeneizzati ed analizzati i seguenti dati:

- Serie storiche di precipitazione;
- Serie storiche di temperature;
- Serie storiche di evapotraspirazione;
- Serie storiche relative ai deflussi (livelli, portate).

Questa prima fase di raccolta dati è stata propedeutica anche all'impostazione dei modelli di simulazione, in quanto ha permesso di individuare il periodo di simulazione sulla base dei dati di input disponibili. Tale fase è stata particolarmente delicata, specie per l'impostazione del modello idrogeologico integrato acque sotterranee-superficiali, anche per aspetti legati all'evoluzione delle reti di monitoraggio, che ha comportato l'abbandono di qualche stazione tradizionale ed il passaggio da stazioni meccanografiche a quelle in teletrasmissione, con differenti coperture territoriali.

Per la caratterizzazione pluviometrica e termometrica del sistema idrogeologico della Piana si è fatto riferimento ai dati registrati dalle stazioni della rete termo-pluviometrica regionale gestita dal Servizio Osservatorio delle Acque della Regione Siciliana.

I dati pluviometrici e termometrici del periodo 2005-2017, da utilizzare per l'implementazione del modello idrogeologico integrato dell'acquifero della Piana a scala regionale (cfr. paragrafo 7.4)

sono stati estrapolati dalla relativa banca dati. In particolare i dati termo-pluviometrici utilizzati sono stati quelli relativi alle stazioni di seguito indicate, di cui è riportata in Tabella 3.3 la relativa anagrafica:

- Mazara del Vallo
- Castelvetrano
- Diga Trinità
- Santa Ninfa.

Tabella 3.3 – Anagrafica delle stazioni di monitoraggio selezionate per la caratterizzazione termo-pluviometrica recente di medio periodo del sistema idrogeologico della Piana (2005-2017)

Nome stazione	Quota (m s.l.m.)	Coord X (m) UTM 33N WGS84	Coord Y (m) UTM 33N WGS84
Mazara del Vallo	11	288309	4170506
Diga Trinità	71	301917	4174147
Castelvetrano	167	306644	4173314
Santa Ninfa	496	313335	4183679

Le stazioni sopra indicate sono state selezionate per la caratterizzazione pluviometrica recente di medio periodo del sistema idrogeologico (2005-2017), in quanto dotate di serie storiche quasi complete di pioggia in tale intervallo temporale e distribuite abbastanza uniformemente sul territorio in esame (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Aree di influenza, rappresentate dai poligoni di Thiessen, delle stazioni pluviometriche Mazara del Vallo, Diga Trinità, Castelvetrano, Santa Ninfa selezionate per la caratterizzazione pluviometrica della Piana relativa al periodo recente (2005-2017). In figura è mostrata anche l'ubicazione delle stazioni Menfi e Gibellina con le relative aree di influenza

La determinazione degli afflussi meteorici relativi alla Piana, da utilizzare nel modello idrogeologico integrato, è stata effettuata a partire dai dati di pioggia registrati dalle 4 stazioni sopraindicate, per le quali sono state calcolate, con il metodo dei Poligoni di Thiessen, le relative aree di influenza, a copertura dell'area in studio (Figura 3.10), e sono state predisposte le serie temporali dei dati di pioggia relativi all'intervallo 2005-2017, opportunamente aggregati per la successiva fase di calcolo dell'eccedenza idrica (cfr. paragrafo 5.1.1).

Nella Tabella 3.4 sono riportate le registrazioni medie mensili di pioggia per il periodo 2005-2017 relative alle stazioni selezionate.

Per quanto riguarda la caratterizzazione pluviometrica del bacino del fiume Modione, necessaria all'implementazione del modello afflussi-deflussi relativo a tale bacino (cfr. paragrafo 7.2), sono stati utilizzati, oltre ai dati di pioggia relativi al periodo recente (2005-2017), anche i dati storici relativi al periodo 1977-1981 rilevati dalle stazioni ubicate sul bacino o in prossimità dello stesso. L'esigenza di reperire dati pluviometrici storici relativi al periodo 1977-1981 è legata alla necessità di calibrare il modello afflussi-deflussi sulla base dei dati di portata osservati alla stazione idrometrica "Modione a Sant'Elia" disponibili solo per il periodo 1972-1978 e 1980-1981.

Le stazioni selezionate per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del fiume Modione sul periodo storico, attrezzate con i sensori della rete di monitoraggio meccanografica, sono state (Tabella 3.5):

- Castelvetrano
- Gibellina
- Menfi.

Le stazioni selezionate per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del fiume Modione sul periodo recente, attrezzate con sensori in teletrasmissione di recente installazione, sono state (Tabella 3.6):

- Castelvetrano
- Santa Ninfa
- Menfi.

In Figura 3.11 sono riportati gli istogrammi delle serie storiche di dati pluviometrici giornalieri relativi al periodo 1977-1981 per le stazioni Castelvetrano, Gibellina e Menfi.

PRECIPITAZIONI (mm)		100		130		Maa	ara del v	allo				1128	1
	G	F	М	A	M	G	L	A	5	0	N	D	toT
2005	91,4	85	33,6	101,4	7,6	7,6	8,6	6,8	21,8	8 11	1 92,	8 89,8	3 65
2006	113,2	46	20	18,4	27,4	3,8	4,4	19,2	138,8	8 7	6 27,	2 101,6	5 5
2007	11,2	87	139,4	75	2,4	29,8	0	0,6	64,4	4 109,	8 149,	2 79,8	3 74
2008	24,6	29	84,6	33,8	17,6	0	8	0	39,6	6 59,	4 45,	4 118,2	46
2009	180,2	45,6	62,4	69,6	47,4	2,4	0	0 0	116,6	6 13	4 38,9	9 104,2	2 801
2010	127,6	82	64,8	43	16,2	2,8	0	0	113,2	2 106,	6 5	2 32,8	3
2011	88,4	125,2	51,4	41,4	16,8	3	1,4	0	9,4	4 11	3 19,	6 97	7 56
2012	71,2	70,6	19,6	38,8	9,4	0	5,2	0	62,4	4 13	7 60,	8 65,6	5 54
2013	117	77,2	118,6	30,2	2,6	0		44	29,4	4 28,	6 106,	6 58,6	5 61
2014	80,2	42,2	93,2	88,2	24,6	10	0,6	0	2,6	6 13,	2 29,	4 57,6	5 44
2015	97,2	176,4	82,4	0,6	2,4	6,2	0	3	55,2	2 164,	4 66,	4 1,8	3
2016	47	35,6	86,2	21,2	27,6	13,6	0	1	13,8	8 31,	6 109,	8 21,6	5
2017	205,6	64,4	0,4	23,2	0	0	0,2	0	37	2 14,	4 80,	4 32,2	2 4
Media	96,52	74,32	65,89	44,98	15,54	6,09	2,18	5,74	53,78	8 84,5	4 67,5	8 66,22	2 583
							Trinita'						
PRECIPITAZIONI (mm)	G	F	М	A	М	G	L	Α	S	0	N	D	Tot.
2005	90,6	87	28,8	76,8	6,2	13	11	62,4	33	146,4	85,6	100,8	741,6
2006	95,4	53,4	26,2	28,4	23,4	10,2	13,8	11,2	133,6	95,4	41,8	146	678,8
2007	18,2	67,2	140,6	64,8	6,8	34,2	-	0,2	70,2	82,4	134,4	71,8	690,8
2008	25,6	28,2	84	43,4	10,4	0,2	3,8	-	39,4	49,6	53,4	140,2	478,2
2009	187	51,2	68,6	88,6	102,2	2,8	_	8 <u>11</u>	127	131,4	40,8	125	925,6
2010	119.4	107,4	67.8	48,4	20.8	3,2	-	-	112,6	80.8	43.6	34,2	638.2
2011	86.6	115	52.2	45.6	18.6	1	1.2	9 <u>00</u>	31.8	120	40.8	96.8	610.6
2012	63.2	101.4	39	62.8	14.2	-	2.4	-	49.2	132	112.4	57.6	634.2
2013	134	109.2	159	46	6.8	-		12.4	58.6	60.2	154.2	67.2	807.6
2014	112.4	60.8	118.4	99.4	36.8	2.6	0.4	-	2.6	18.2	52.6	97.4	501.6
2015	107.9	2/19 2	00.9	3.4	1.0	7		22.4	16.4	210,2	95.2	3.0	001,0
2015	0,101 A	50.6	110	20.4	4,0	17.4		1.4	140,4	213,0	120.6	246	507.2
2010	45	00,0	110	50,4	30,0	17,4	-	1,4	14,0	39,0	120,0	24,0	507,2
2017	269	83,6	1,8	60,4	-	-		-	38,8	39,0	128,6	24,6	646,4
						Cast	elvetra	10		1			
PRECIPITAZIONI (mm)	G	F	М	A	М	G	L	Α	S	0	N	D	Tot.
2005	114,80	109,60	42,80	80,00	26,00	13,00	3,80	23,60	14,20	102,80	69,80	95,80	696,20
2006	101,76	55,80	26,20	26,00	15,80	12,40	0,20	13,60	115,60	82,40	29,80	110,00	589,50
2007	17,60	65,60	115,80	50,40	4,00	28,60	0,00	0,00	104,20	54,60	124,80	97,60	663,20
2008	28,80	24,20	86,20	48,80	9,20	0,20	1,37	0,00	41,80	58,00	34,40	129,38	462,3
2009	162,89	66,80	81,40	116,20	77,20	1,60	0,00	5,20	101,20	150,40	43,00	131,40	937,29
2010	138,40	112,80	90,20	51,60	41,00	6,20	0,00	0,00	111,80	120,80	39,62	33,80	746,23
2011	81,40	129,00	62,39	39,00	31,60	0,60	0,40	0,00	8,80	84,60	26,20	108,00	571,99
2012	66,80	94.20	22.20	62,20	12.60	0.00	3.80	0.00	43.20	152.20	67,80	55.20	580.20
2013	160.00	100.00	147.60	37.40	3.40	0.00	3,20	54.60	37.00	60.00	113.40	96.40	813.00
2014	115.80	74.20	108.60	82.60	35.60	2.40	0.40	0.00	2.40	14.80	111.20	90.40	638.4
2015	106.80	249.40	92.20	5 20	2.00	9.40	7.60	19.40	64.20	188.60	75 40	2.00	822.24
2015	40.90	49.20	132.60	29.40	33.60	33.40	0.00	6.80	28.40	52.00	155.60	33.00	594 90
2010	252.60	82.20	4 40	37.40	0.00	0.00	0.00	0.00	62.40	17.00	91 20	39,00	589 6
Media	106.89	03,20	77.80	51.25	22.46	8.20	1.60	9,00	56 55	\$7.55	75 56	78.64	560,00
INICUID	100/00	ەدرد د	, , , , 9	وعردد	22,90	0,23	1,00	5,40	درور	ورراه	00,01	70,04	600,0
						Santa Ni	infa						
PRECIPITAZIONI (mm)	G F	M	A	M	G	L	A	S	1	0	N	D	Tot
	2		17.00	160.40	9,60	23,40	13,00	6,80	21,60	85,60	71,80	93,80	712,8
2005	100,20	79,00	47,00	200,40					51.00	7.00	39.00	89,20	506,
2005 2006	100,20 98,40	79,00 56,40	41,20	30,20	56,00	12,00	22,20	2,80	51,80		55,00	and the second se	
2005 2006 2007	100,20 98,40 14.20	79,00 56,40 73,60	47,80 41,20 146,40	30,20 84,40	56,00 13,20	12,00 13,60	22,20 0,00	2,80 0,00	51,80	75,60	99.00	82.20	660.
2005 2006 2007 2008	100,20 98,40 14,20 28,20	79,00 56,40 73,60 15,80	41,20 146,40 121,80	30,20 84,40 29,20	56,00 13,20 14.80	12,00 13,60 0.00	22,20 0,00 4,60	2,80 0,00 0,60	51,80 57,80 33,40	75,60 79,60	99,00 45.60	82,20 51.60	426
2005 2006 2007 2008 2009	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40	41,20 41,20 146,40 121,80 62,50	30,20 84,40 29,20 90,20	56,00 13,20 14,80 33,40	12,00 13,60 0,00 2,80	22,20 0,00 4,60	2,80 0,00 0,60 16,20	51,80 57,80 33,40 146,80	75,60 79,60 169.20	99,00 46,60 56 40	82,20 51,60 132,20	426, 908
2005 2006 2007 2008 2009 2010	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40 88,60	41,20 146,40 121,80 62,60 80,40	30,20 84,40 29,20 90,20 61,60	56,00 13,20 14,80 33,40 21.60	12,00 13,60 0,00 2,80	22,20 0,00 4,60 0,00	2,80 0,00 0,60 16,20	51,80 57,80 33,40 146,80	75,60 79,60 169,20 93,40	99,00 45,60 56,40	82,20 51,60 132,20 38,80	426, 908,
2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00 109,20	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40 88,60	47,80 41,20 146,40 121,80 62,60 80,40 81,00	30,20 84,40 29,20 90,20 61,60	56,00 13,20 14,80 33,40 21,60 32,60	12,00 13,60 0,00 2,80 10,40	22,20 0,00 4,60 0,00 0,00	2,80 0,00 0,60 16,20 0,00	51,80 57,80 33,40 146,80 125,20	75,60 79,60 169,20 93,40	99,00 46,60 56,40 65,40	82,20 51,60 132,20 38,80	660, 426, 908, 694,
2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2011	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00 109,20 88,80	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40 88,60 132,00	47,80 41,20 146,40 121,80 62,60 80,40 81,00	30,20 84,40 29,20 90,20 61,60 32,60	56,00 13,20 14,80 33,40 21,60 32,60	12,00 13,60 0,00 2,80 10,40 2,40	22,20 0,00 4,60 0,00 0,00 1,60	2,80 0,00 0,60 16,20 0,00 1,20	57,80 57,80 33,40 146,80 125,20 31,40	75,60 79,60 169,20 93,40 98,40	99,00 46,60 56,40 65,40 17,60	82,20 51,60 132,20 38,80 100,40	660, 426, 908, 694, 620,
2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2011 2012	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00 109,20 88,80 50,60	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40 88,60 132,00 104,40	47,80 41,20 146,40 121,80 62,60 80,40 81,00 31,20	30,20 84,40 29,20 90,20 61,60 32,60 54,60	56,00 13,20 14,80 33,40 21,60 32,60 30,20	12,00 13,60 0,00 2,80 10,40 2,40 0,40	22,20 0,00 4,60 0,00 0,00 1,60 17,40	2,80 0,00 0,60 16,20 0,00 1,20 0,00	57,80 57,80 33,40 146,80 125,20 31,40 36,60	75,60 79,60 169,20 93,40 98,40 112,40	99,00 46,60 56,40 65,40 17,60 107,20	82,20 51,60 132,20 38,80 100,40 75,00	660, 426, 908, 694, 620, 620,
2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2011 2012 2013	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00 109,20 88,80 50,60 149,40	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40 88,60 132,00 104,40 106,00	47,80 41,20 146,40 121,80 62,60 80,40 81,00 31,20 136,00	30,20 84,40 29,20 90,20 61,60 32,60 54,60 40,60	56,00 13,20 14,80 33,40 21,60 32,60 30,20 9,60	12,00 13,60 0,00 2,80 10,40 2,40 0,40 0,80	22,20 0,00 4,60 0,00 0,00 1,60 17,40 24,00	2,80 0,00 0,60 16,20 0,00 1,20 0,00 26,00	51,80 57,80 33,40 146,80 125,20 31,40 36,60 103,40	75,60 79,60 169,20 93,40 98,40 112,40 82,80	99,00 46,60 56,40 65,40 17,60 107,20 124,40	82,20 51,60 132,20 38,80 100,40 75,00 103,20	660, 426, 908, 694, 620, 620, 906,
2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2011 2012 2013 2014	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00 109,20 88,80 50,60 149,40 126,00	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40 88,60 132,00 104,40 106,00 70,00	47,80 41,20 146,40 121,80 62,60 80,40 81,00 31,20 136,00 143,40	30,20 84,40 29,20 90,20 61,60 32,60 54,60 40,60 104,40	56,00 13,20 14,80 33,40 21,60 32,60 30,20 9,60 39,00	12,00 13,60 0,00 2,80 10,40 2,40 0,40 0,80 3,40	22,20 0,00 4,60 0,00 0,00 1,60 17,40 24,00 3,20	2,80 0,00 0,60 16,20 0,00 1,20 0,00 26,00 0,00	51,80 57,80 33,40 146,80 125,20 31,40 36,60 103,40 7,40	75,60 79,60 169,20 93,40 98,40 112,40 82,80 66,20	99,00 46,60 56,40 65,40 17,60 107,20 124,40 40,60	82,20 51,60 132,20 38,80 100,40 75,00 103,20 92,80	660, 426, 908, 694, 620, 620, 906, 696,
2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2011 2012 2013 2014 2015	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00 109,20 88,80 50,60 149,40 126,00 132,80	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40 88,60 132,00 104,40 106,00 70,00 282,20	47,50 41,20 146,40 121,80 62,50 80,40 81,00 31,20 136,00 143,40 92,20	30,20 84,40 29,20 90,20 61,60 32,60 54,60 40,60 104,40 5,80	56,00 13,20 14,80 33,40 21,60 32,60 30,20 9,60 39,00 9,80	12,00 13,60 0,00 2,80 10,40 2,40 0,40 0,80 3,40 48,00	22,20 0,00 4,60 0,00 1,60 17,40 24,00 3,20 1,80	2,80 0,00 16,20 0,00 1,20 0,00 26,00 0,00 50,60	51,80 57,80 33,40 146,80 125,20 31,40 36,60 103,40 7,40 51,00	75,60 79,60 169,20 93,40 98,40 112,40 82,80 66,20 260,20	99,00 46,60 56,40 65,40 17,60 107,20 124,40 40,60 91,60	82,20 51,60 132,20 38,80 100,40 75,00 103,20 92,80 2,80	660, 426, 908, 694, 620, 620, 906, 696, 1028,
2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00 109,20 88,80 50,60 149,40 126,00 132,80 53,60	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40 88,60 132,00 104,40 106,00 70,00 282,20 56,40	47,50 41,20 146,40 121,80 62,60 80,40 81,00 31,20 136,00 143,40 92,20 147,60	30,20 30,20 84,40 29,20 90,20 61,60 32,60 54,60 104,40 5,80 21,00	56,00 13,20 14,80 33,40 21,60 32,60 30,20 9,60 39,00 9,80 46,20	12,00 13,60 0,00 2,80 10,40 2,40 0,40 0,80 3,40 48,00 19,60	22,20 0,00 4,60 0,00 1,60 17,40 24,00 3,20 1,80 0,00	2,80 0,00 0,60 16,20 0,00 1,20 0,00 26,00 0,00 50,60 5,60	51,80 57,80 33,40 146,80 125,20 31,40 36,60 103,40 7,40 51,00 49,20	75,60 79,60 169,20 93,40 98,40 112,40 82,80 66,20 260,20 72,80	99,00 45,60 56,40 17,60 107,20 124,40 40,60 91,60 78,00	82,20 51,60 132,20 38,80 100,40 75,00 103,20 92,80 2,80 2,80	660, 426, 908, 694, 620, 620, 620, 906, 696, 1028, 575,
2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017	100,20 98,40 14,20 28,20 123,00 109,20 88,80 50,60 149,40 126,00 132,80 53,60 53,60	79,00 56,40 73,60 15,80 75,40 88,60 132,00 104,40 106,00 70,00 282,20 56,40 89,00	41,50 41,20 146,40 121,80 62,60 80,40 81,00 31,20 136,00 143,40 92,20 147,60 3,80	30,20 30,20 84,40 29,20 90,20 61,60 32,60 54,60 104,40 5,80 21,00 65,00	56,00 13,20 14,80 33,40 21,60 32,60 30,20 9,60 39,00 9,80 46,20 0,20	12,00 13,60 0,00 2,80 10,40 2,40 0,40 0,80 3,40 48,00 19,60 21,40	22,20 0,00 4,60 0,00 1,60 17,40 24,00 3,20 1,80 0,00 1,60	2,80 0,00 0,60 16,20 0,00 1,20 0,00 26,00 0,00 50,60 5,60 0,00	51,80 57,80 33,40 146,80 125,20 31,40 36,60 103,40 7,40 51,00 49,20 53,20	75,60 79,60 169,20 93,40 98,40 112,40 82,80 66,20 260,20 72,80 72,80	99,00 46,60 56,40 65,40 17,60 107,20 124,40 40,60 91,60 78,00 78,00	82,20 51,60 132,20 38,80 100,40 75,00 103,20 92,80 2,80 2,80 2,500	660,0 426,2 908,2 694,6 620,0 620,0 906,2 696,4 1028,8 575,0 463,6

## Tabella 3.4 - Precipitazioni medie mensili relative alle stazioni selezionate - periodo 2005-2017

Tabella 3.5 - Anagrafica delle stazioni di monitoraggio selezionate per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del Fiume Modione relativa al periodo storico (1977-1981)

Stazione	Quota (m slm)	Coord Est (m) UTM 33N WGS84	Coord Nord (m) UTM 33N WGS84
Castelvetrano	190	306095	4173934
Gibellina	410	320722	4184369
Menfi	119	320209	4163614

Tabella 3.6 Anagrafica delle stazioni di monitoraggio selezionate per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del Fiume Modione relativa al periodo recente (2005-2017)

Storiono	Quota	Coord Est (m)	Coord Nord (m)
Stazione	(m slm)	UTM 33N WGS84	UTM 33N WGS84
Castelvetrano	167	306644	4173314
Santa Ninfa	496	313335	4183679
Menfi	100	320606	4162760



Figura 3.11 - Istogrammi delle serie storiche di dati pluviometrici giornalieri relativi al periodo 1977-1981 per le stazioni Castelvetrano, Gibellina e Menfi
Per quanto concerne la caratterizzazione termometrica del sistema idrogeologico della Piana, sono stati utilizzati i dati di temperatura registrati nelle stesse stazioni di monitoraggio utilizzate per la caratterizzazione pluviometrica recente di medio periodo del sistema, precedentemente descritte. Nella Tabella 3.7 sono riportati i dati di temperatura media mensile sul periodo 2005-2017 relativi a tali stazioni.

아카이는 것이 있는 것이 같아? 제 아파 영양 또 다	100				1020	ivia	zara del V	all0	100	12022	Poc -	1241	Distance of the
TEMPERATURE °C	G	F	M	A	M	G	L	A	5	0	N	D	Medie A
2005	9,48	9,15	12,35	14,98	19,43	22,45	25,31	24,28	22,66	19,49	14,87	11,14	17,1
2006	9,73	10,49	12,39	15,71	19,42	21,62	26,14	24,72	22,74	20,37	15,07	13,76	17,6
2007	12,46	11.50	13.02	16.11	18.79	23.69	24.79	25.63	21.53	18.94	14.97	11.66	17.7
2008	11.52	10.32	12.27	14.88	18.89	21.98	25.33	25.61	22.28	19.16	15.28	12.21	17.4
2009	12.37	9.22	11.92	14.85	19 14	21.63	25,00	26,00	22,20	18 16	14 32	12 61	173
2005	10.75	11.64	12.52	15 22	17.62	21,05	25,01	25,20	21/17	18,40	15 45	11 27	17.2
2010	10,70	0.71	12,55	14.00	17,05	21,00	23,40	25,30	21,47	17.04	15,45	11,27	100
2011	10,28	9,71	12,07	14,80	17,70	21,81	24,23	25,04	22,92	17,84	15,09	11,07	10,9
2012	9,51	8,14	12,12	14,/4	18,00	23,32	26,07	26,78	22,58	19,41	16,70	11,00	17,3
2013	10,71	8,92	13,08	16,22	18,43	21,08	25,20	26,38	22,61	21,17	14,53	11,23	17,4
2014	11,80	11,69	11,60	14,92	17,62	22,28	23,61	25,32	23,47	20,12	17,28	12,35	17,6
2015	10,18	9,91	12,08	14,45	19,23	22,64	26,74	26,30	23,23	19,57	15,48	11,51	17,6
2016	11,06	12,15	12,19	16,40	17,59	22,54	25,44	25,08	22,51	20,54	15,88	12,05	17,7
2017	8,76	11,91	12,81	14,52	18,98	23,42	25,18	27,22	22,57	19,44	15,46	11,87	17,6
Medie	10,66	10,36	12,34	15,22	18,53	22,31	25,27	25,69	22,57	19,44	15,46	11,87	17,4
							Trinita'						
TEMPERATURE °C	G	F	M	A	M	G	L	A	S	0	N	D M	edia A
2005	8,30	7,00	11,00	12,80	19,20	22,70	24,80	23,40	21,00	16,90	12,50	8,40	15,67
2006	9,70	9,40	10,50	14,10	18,00	23,20	25,10	23,90	21,40	17,90	12,90	10,80	16,41
2007	9,70	9,40	10,50	14,10	18,00	23,20	25,20	26,00	21,00	17,10	12,00	8,50	16,23
2008	8,80	8.10	9,70	12.60	17.70	22.00	25.10	25.60	21.70	19.50	15,40	11.70	16,49
2009	8.40	8.50	11.70	15.10	19.80	23.20	27.20	28.00	23.40	18.10	14.60	12.10	17.51
2010	10.70	11.80	12.80	16 30	19.50	23.80	28.10	28.00	23.00	20.10	17.00	13.20	18.69
2011	12 20	11 30	10.80	17.30	20,50	25,00	29.10	29,90	25.10	18 50	15.60	11.90	19.02
2012	0.20	2.00	12,60	15 20	10.20	25,50	29,10	20,00	23,10	20.90	16.00	11,50	19,02
2012	5,50	0,00	12,00	13,20	19,50	23,00	20,70	23,40	24,30	20,00	10,50	12,50	10,40
2013	10,70	9,40	13,80	17,40	20,50	23,00	26,10	27,70	24,50	25,10	16,40	13,40	18,85
2014	11,90	11,90	11,80	14,40	17,20	22,40	24,30	26,90	24,10	20,20	16,80	12,40	17,86
2015	10,60	10,10	12,40	14,50	19,30	23,70	28,70	27,70	24,50	20,60	16,70	12,80	18,47
2016	12,30	13,40	13,20	17,70	19,30	24,30	27,10	26,60	23,90	21,80	17,00	13,20	19,15
2017	9,20	11,90	12,80	14,20	19,20	24,90	26,90	26,60	23,90	21,80	17,00	13,20	18,47
Medie	10,14	10,02	11,82	15,05	19,05	23,68	26,65	26,90	23,23	19,72	15,45	11,78	17,79
						Ca	stelvetra	ano					
TEMPERATURE *C	6	F	M	A	М	G	L	Δ	5	0	N	D	Medie A
2005	912	8.40	11.79	14.15	19.38	22.64	25.32	23.69	22.11	19.31	14.67	10.49	16.76
2005	9,12	10.05	11,75	15.66	10.45	21.04	25,52	25,05	22,11	20.16	15.44	12 01	17.62
2000	12.49	11.57	12.00	15,00	19,45	21,00	20,40	25,00	22,51	10.16	10,44	11.10	17,05
2007	12,40	10.61	12,50	15,50	10,04	23,03	25,50	23,00	21,50	10.55	15.70	12.41	17,75
2006	11,00	10,01	12,24	15,08	19,04	22,72	20,15	20,55	22,30	19,55	15,70	12,41	17,04
2009	12,81	0,60	11,78	14,75	19,85	22,58	25,92	20,31	22,90	18,05	14,75	12,51	17,58
2010	10,57	11,49	12,51	15,72	17,79	22,04	25,90	26,14	21,94	18,51	15,68	11,29	17,47
2011	10,84	9,95	12,23	15,34	18,07	22,74	24,72	25,86	23,54	18,16	15,82	11,40	17,39
2012	9,28	8,09	12,07	14,69	18,46	23,59	26,77	27,14	23,17	19,57	16,13	10,72	17,47
2013	10,26	8,33	12,31	15,99	18,51	21,51	25,14	26,15	22,22	20,70	13,78	11,04	17,16
2014	11,02	11,20	11,01	14,35	17,11	22,15	23,48	25,09	22,91	19,79	16,45	11,41	17,16
2015	9,46	8,37	11,12	13,69	18,81	22,39	26,87	25,98	22,81	18,52	14,90	11,36	17,02
2016	10,44	11,52	11,44	16,00	17,25	22,67	25,28	25,08	22,05	19,43	14,54	11,15	17,24
2017	7,50	10,61	12,24	13,66	18,49	23,01	24,77	26,94	22,54	19,24	15,19	11,57	17,15
Medie	10,38	9,93	11,96	15,00	18,57	22,56	25,55	25,81	22,54	19,24	15,19	11,57	17,36
						Santa	Vinfa						
TEMPERATURE °C	G F	N	ι Δ	1		3		۵		0	N	D	Media A
2013	9.74	8 77	10.96	15.55	17 25	20.97	2/ 00	25.75	21.65	10.70	12 62	- 10.14	16.9
2015	0,74	10.22	10,90	13,33	16 42	20,07	24,39	25,75	21,00	19,28	12,02	10,14	10,3
2014	9,67	10,23	10,20	12,/3	10,43	22,03	23,19	25,20	23,05	19,48	15,/1	10,72	16,5
2015	9,17	7,54	10,40	13,19	18,61	22,25	26,99	25,45	22,58	17,99	14,32	11,94	16,7
2016	9,73	11,05	10,44	15,52	16,81	21,50	25,41	24,58	21,56	19,18	14,54	11,26	16,8
2017	7 20	10.40	12.04	12.40	10 54	24.06	25 41	27.76	20.02	17.67	1274	0.07	500

Tabella 3.7 - Temperature medie mensili relative alle stazioni selezionate - periodo 2005-2017

Per quanto riguarda la caratterizzazione idrologica del sistema della Piana, la ricognizione e la raccolta dei dati di portata disponibili ha riguardato fondamentalmente il Fiume Modione, corso d'acqua che, attraversando i terreni dell'acquifero della Piana, interagisce in modo sostanziale, per buona parte del suo sviluppo lineare, con il relativo corpo idrico sotterraneo, mentre il Fiume Delia-Arena ed il Fiume Belice non sono stati presi in considerazione ai fini della ricognizione e raccolta di dati utili alla caratterizzazione idrologica del sistema della Piana, in quanto ricadenti al di fuori della perimetrazione del CIS di cui al PdG 2015-2021 (cfr. Figura 3.12). Per quanto concerne il Fiume Belice, per il quale la riperimetrazione dell'acquifero, effettuata nell'ambito del presente studio, ha portato ad inserire un tratto della sua asta fluviale lungo il limite orientale dell'acquifero (cfr. paragrafo 4.2), la ricognizione dei dati idrologici e la modellizzazione dei processi afflussi-deflussi del bacino potrà essere effettuata, nell'ambito di un'eventuale prosecuzione dello studio, nel caso in cui si voglia rappresentare la dinamica di interscambio tra l'acquifero ed il reticolo idrografico del fiume Belice.

Per la caratterizzazione idrologica del sistema della Piana si è fatto riferimento ai dati registrati dalle stazioni della rete idrometrica regionale gestita dal DAR - Servizio Osservatorio delle Acque della Regione Siciliana.

La disponibilità di serie temporali di dati di portata relativi al Fiume Modione, o di altezze idrometriche con possibilità di conversione delle stesse in portate tramite scale di deflusso, risulta molto limitata, essendo disponibili, soltanto per il periodo 1972-1978 e 1980-1981, i dati di portata relativi alla stazione idrometrica "Modione a Sant'Elia" appartenente alla rete di misura tradizionale (Figura 3.12). Per il periodo recente, sebbene siano in corso da parte del Servizio Osservatorio delle Acque le attività necessarie alla definizione della scala delle portate, non sono ancora disponibili dati di portata del fiume Modione derivanti da scale di deflusso tarate, ma solo dati di altezza idrometrica acquisiti a partire dal 2015 dall'idrometro della nuova stazione in telemisura "Fiume Modione", installata in corrispondenza della sezione fluviale della precedente stazione della rete tradizionale.

È stata pertanto utilizzata, ai fini della calibrazione del modello afflussi-deflussi del bacino del Fiume Modione (paragrafo 7.2.3), la serie storica dei dati di portata registrati alla stazione idrometrica "Modione a Sant'Elia" nel periodo 1977-1981, il cui andamento è riportato in Figura 3.13.



Figura 3.12 – Ubicazione della stazione idrometrica Modione a Sant'Elia. In rosso sono indicati i limiti del CIS della Piana (da PdG); in giallo i limiti dei bacini idrografici afferenti al CIS; in blu le aste principali dei fiumi Delia-Arena, Modione, Belice



Figura 3.13 - Serie storica di portate  $(m^3/s)$  registrate alla stazione idrometrica Modione a Sant'Elia

#### 3.4 Sintesi dell'analisi delle pressioni e dello stato ambientale dei corpi idrici della Piana

Nell'ambito dell'aggiornamento del Piano di Gestione del Distretto Idrografico della Sicilia, relativo al II ciclo di pianificazione (2015-2021), è stata effettuata la ricognizione delle pressioni antropiche esistenti sul territorio del Distretto e sono state individuate quelle ritenute significative per la loro capacità di compromettere il raggiungimento/mantenimento degli obiettivi ambientali fissati dalla Direttiva 2000/60/CE per i corpi idrici sotterranei e superficiali. Sulla base del quadro delle pressioni antropiche definite nel precedente Piano di Gestione (2009-2015), il PdG 2015-2021 specifica le tipologie di pressione che possono influenzare lo stato ambientale dei corpi idrici, stabilisce criteri e relative soglie di significatività per categoria di corpi idrici (sotterranei e superficiali) ed elenca, per ciascuno di essi, le pressioni significative presenti e le categorie dei potenziali impatti significativi.

L'analisi delle pressioni e degli impatti applicata al corpo idrico sotterraneo "Piana di Castelvetrano - Campobello di Mazara" ed ai corpi idrici superficiali ricadenti all'interno della sua perimetrazione (corpi idrici di transizione dei laghi Preola e Gorghi Tondi e corpi idrici fluviali del Fiume Modione e del Canale Ricamino) ha portato all'individuazione delle tipologie di pressioni ed impatti riportate nella Tabella 3.8. Le pressioni significative che insistono sui corpi idrici, sotterranei e superficiali, della Piana, la cui ubicazione è riportata in Figura 3.14, sono:

- siti contaminati: 6 discariche RSU inserite nell'Aggiornamento del Piano Regionale delle Bonifiche;
- impianti soggetti alla Direttiva IED *Industrial Emission Directive*: 1 impianto ricadente in C.da Misiddi-Campana (Campobello di Mazara) che, in base alle verifiche effettuate da questa Agenzia, risulta coincidere con un impianto di trattamento meccanico-biologico dei rifiuti autorizzato e mai realizzato;
- depuratori reflui urbani: 3 depuratori di acque reflue urbane, di cui uno scarica sul Canale Ricamino;
- emungimenti da pozzi: elevata densità di pozzi di emungimento per uso prevalentemente irriguo ed idropotabile;
- pressioni agricole diffuse: elevata estensione di superficie agricola con apporto di nutrienti e contaminanti chimici (pesticidi).

Sono inoltre presenti, tra le pressioni significative, alterazioni idromorfologiche e fisiche in corrispondenza dei corpi idrici fluviali del canale Ricamino e del fiume Modione, in quest'ultimo a valle della confluenza con il Ricamino.

Per quanto riguarda gli impatti, le tipologie individuate di potenziali impatti significativi sono: inquinamento chimico, inquinamento da nutrienti, inquinamento organico, abbassamento dei livelli piezometrici, alterazione di habitat in corrispondenza dei corpi idrici fluviali.

Tabella 3.8 – Tipologie di pressioni e di impatti significativi individuati dal PdG 2015-2021 nel CIS della "Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara" e nei corpi idrici superficiali ricadenti all'interno della sua perimetrazione (continua)

corpo idrico sotterraneo "Piana di C	Castelvetrano – Campobello di Mazara"		
Tipi di Pressione	Tipi di Impatto		
1.3 - Point - IED plants	CHEM - Chemical pollution		
1.5 - Point - Contaminated sites or abandoned industrial sites	CHEM - Chemical pollution		
2.2 - Diffuse - Agricultural	CHEM - Chemical pollution		
3.7 - Abstraction or flow diversion - Other	NUTR - Nutrient pollution		
2.10 - Diffuse - Other	NUTR - Nutrient pollution		
2.10 - Diffuse - Other	LOWT - Abstraction exceeds available groundwater resource (lowering water table)		
Altre Pressioni Significative IPNOA, Nitrati, Abstraction or flow Agriculture+PublicWater+Industries			
corpo idrico di transiz	ione "Lago della Preola"		
Tipi di Pressione	Tipi di Impatto		
2.2 - Diffuse - Agricultural	CHEM - Chemical pollution		
2.10 - Diffuse - Other	CHEM - Chemical pollution		
Altre Pressioni Significative IPNOA			
corpo idrico di transizi	one "Gorghi Tondi Alto"		
Tipi di Pressione	Tipi di Impatto		
1.5 - Point - Contaminated sites or abandoned industrial sites	CHEM - Chemical pollution		
2.2 - Diffuse - Agricultural	CHEM - Chemical pollution		
2.10 - Diffuse - Other	CHEM - Chemical pollution		
Altre Pressioni Significative IPNOA			
corpo idrico di transizio	ne "Gorghi Tondi Medio"		
Tipi di Pressione	Tipi di Impatto		
1.5 - Point - Contaminated sites or abandoned industrial sites	CHEM - Chemical pollution		
2.2 - Diffuse - Agricultural	CHEM - Chemical pollution		
2.10 - Diffuse - Other	CHEM - Chemical pollution		
Altre Pressioni Significative IPNOA			

### continua da Tabella 3.8

corpo idrico di transizione "Gorghi Tondi Basso"				
Tipi di Pressione	Tipi di Impatto			
1.5 - Point - Contaminated sites or abandoned industrial sites	CHEM - Chemical pollution			
2.2 - Diffuse - Agricultural	CHEM - Chemical pollution			
2.10 - Diffuse - Other	CHEM - Chemical pollution			
Altre Pressioni Significative IPNOA				
corpo idrico fluviale "F, Modione" (tratto d	a monte della confluenza con il C. Ricamino)			
Tipi di Pressione	Tipi di Impatto			
2.2 - Diffuse - Agricultural	CHEM - Chemical pollution			
2.10 - Diffuse - Other	CHEM - Chemical pollution			
Altre Bressieni Similiative (DNC)A				
Artre Pressioni Significative IPNOA				
corpo idrico fluviale "F. Modione" (tratto	a valle della confluenza con il C. Ricamino)			
Tipi di Pressione	Tipi di Impatto			
2.2 - Diffuse - Agricultural	CHEM - Chemical pollution			
2.10 - Diffuse - Other	CHEM - Chemical pollution			
4.4 - Hydromorphological alteration - Physical loss of whole or part of the water body	HMOC - Altered habitats due to morphological changes (includes connectivity)			
4.1.2 - Physical alteration - agriculture	HHYC - Altered habitats due to hydrological changes			
4.1.4 - Physical alteration - Other				
1.1 - Point - Urban waste water n.t.				
Altre Pressioni Significative IPNOA, Modifica della zona riparia e/o della piana alluvionale per attività agricole e zootecniche				
corpo idrico fluvi	iale "C. Ricamino"			
Tipi di Pressione	Tipi di Impatto			
1.1 - Point - Urban waste water	NUTR - Nutrient pollution			
2.1 - Diffuse - Urban run-off	ORGA - Organic pollution			
2.5 - Diffuse - Contaminated sites or abandoned industrial sites	CHEM - Chemical pollution			
2.10 - Diffuse - Other	CHEM - Chemical pollution			
4.1.2 - Physical alteration - agriculture	CHEM - Chemical pollution			
4.1.4 - Physical alteration - Other	HMOC - Altered habitats due to morphological changes (includes connectivity)			
1.1 - Point - Urban waste water n.t.				
Altre Pressioni Significative IPNOA, Modifica della zona riparia e/o della piana alluvionale per attività agricole e zootecniche				



Figura 3.14 – Ubicazione delle pressioni significative nella Piana di CCM: siti contaminatidiscariche (triangoli fucsia), depuratori reflui urbani (cerchi verdi), impianto IED (stella azzurra), emungimenti da pozzi (cerchi rossi), aree soggette a pressioni agricole diffuse (aree colorate in giallo trasparente)

Per quanto concerne la valutazione dello stato ambientale dei corpi idrici del Distretto ai sensi della Direttiva 2000/60/CE, il PdG 2015-2021 riporta il risultato della valutazione dello stato quantitativo e chimico dei corpi idrici sotterranei e della valutazione di stato ecologico e chimico dei corpi idrici superficiali del Distretto, aggiornata all'anno 2014.

Lo stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei è stato valutato dal Servizio Osservatorio delle Acque della Regione Siciliana sulla base dei risultati del monitoraggio effettuato in corrispondenza della rete freatimetrica regionale, e dell'analisi di bilancio idrico dei corpi idrici sotterranei. In particolare esso è stato valutato attraverso l'analisi dei trend dei livelli di soggiacenza media annua rilevati dalla rete di monitoraggio freatimetrica nel periodo 2009-2013 e l'analisi dei trend dei risultati del bilancio idrico dei corpi idrici sotterranei calcolati su base annua per il periodo 2009-2013.

Lo stato chimico dei corpi idrici sotterranei, così come lo stato ecologico e chimico dei corpi idrici superficiali, è stato valutato da ARPA Sicilia sulla base dei risultati dei monitoraggi effettuati in corrispondenza delle reti rappresentative di detti corpi idrici, secondo specifici programmi definiti ai sensi dell'Allegato 1 del D. lgs. 152/06 e ss.mm.ii. e, per quanto riguarda le acque sotterranee, anche ai sensi del D. lgs. 30/2009.

Successivamente all'anno 2014, ARPA ha continuato ad effettuare il monitoraggio dello stato di qualità dei corpi idrici sotterranei e superficiali del Distretto, integrando o aggiornando la valutazione riportata nel Piano di Gestione del II ciclo, sulla base dei risultati dei monitoraggi effettuati negli anni successivi.

Nella Tabella 3.9 si riporta il risultato della valutazione dello stato quantitativo del corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, desunta dal PdG 2015-2021, nonché il risultato della valutazione del suo stato chimico aggiornata sulla base dei monitoraggi effettuati da ARPA negli anni 2015 e 2016. Analogamente si riporta il risultato della valutazione dello stato chimico ed ecologico dei corpi idrici superficiali ricadenti all'interno della perimetrazione del CIS della Piana, basato sui risultati dei monitoraggi effettuati da ARPA nel 2013 e 2015.

Tabella 3.9 – Stato ambientale del CIS "Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara" e dei corpi idrici ricadenti all'interno della sua perimetrazione

Corpo idrico sotterraneo	Stato Quantitativo	Stato Chimico	Note
"Piana di Castelvetrano- Campobello di Mazara"	Non buono	Scarso	Stato quantitativo valutato in base a trend all'aumento dei livelli di soggiacenza media annua rilevati nei siti della rete freatimetrica (periodo 2009-2013). Stato chimico scarso per superamenti puntuali in alcune stazioni rappresentative dello SQ e dei VS di nitrati, ammoniaca, cadmio, mercurio di cui al D. lgs. 30/2009 (periodo 2011-2016)
Corpo idrico superficiale	Stato Ecologico	Stato Chimico	Note
"Lago della Preola"	Sufficiente	Non buono	Stato ecologico sufficiente per superamento dello SQA dell'arsenico nella matrice acqua (Tab. 1/B - DM 260/2010). Stato chimico non buono per superamento degli SQA del cadmio nella colonna d'acqua e del piombo nel sedimento (Tabb. 1/A e 2/A – DM 260/2010) (anno 2015)
"Gorghi Tondi Alto"	Cattivo	Non buono	Stato ecologico cattivo per l'assenza della comunità di macroinvertebrati. Stato chimico non buono per superamento dello SQA del piombo nel sedimento (Tab. 2/A – DM 260/2010). NB. superamento dello SQA dell'arsenico nella matrice acqua e/o nella matrice sedimento (Tab. 1/B e 3/B - DM 260/2010) (anno 2013)
"Gorghi Tondi Medio"	Cattivo	Non buono	Stato ecologico cattivo per l'assenza della comunità di macroinvertebrati. Stato chimico non buono per superamento degli SQA del cadmio nella colonna d'acqua e del piombo nel sedimento (Tabb. 1/A e 2/A – DM 260/2010). NB. superamento dello SQA dell'arsenico nella matrice acqua e/o nella matrice sedimento (Tab. 1/B e 3/B - DM 260/2010) (anno 2015)
"Gorghi Tondi Basso"	Cattivo	Non buono	Stato ecologico cattivo per l'assenza della comunità di macroinvertebrati. Stato chimico non buono per superamento degli SQA del cadmio nella colonna d'acqua e del piombo nel sedimento (Tabb. 1/A e 2/A – DM 260/2010). NB. superamento dello SQA dell'arsenico nella matrice acqua e/o nella matrice sedimento (Tab. 1/B e 3/B - DM 260/2010) (anno 2015)
"Fiume Modione" (tratto a monte della confluenza con C. Ricamino)	Non buono	-	Valutazione di stato ecologico ottenuta per estensione del giudizio (anno 2015)
"Fiume Modione" (tratto a valle della confluenza con C. Ricamino)	Non buono	-	Valutazione di stato ecologico ottenuta per estensione del giudizio (anno 2015)
"Canale Ricamino"	Non buono	-	Valutazione di stato ecologico ottenuta per estensione del giudizio (anno 2015)

#### 4 Acquisizione ed elaborazione dei dati funzionali all'elaborazione del modello concettuale idrogeologico dell'acquifero ed elaborazione del modello concettuale preliminare

#### 4.1 Acquisizione ed organizzazione dei dati geologico-stratigrafici

L'obiettivo di questa fase è stato quello di ricostruire l'assetto geologico ed idrostratigrafico dell'acquifero della Piana, ridelinearne i confini sulla base dell'analisi dei dati geologici ed idrogeologici reperiti e definire lo sviluppo tridimensionale dell'acquifero. A tal fine particolare importanza ha ricoperto l'acquisizione e l'informatizzazione dei dati geologici, idrogeologici, stratigrafici e geofisici disponibili sull'area di studio, i quali, per la tipologia e/o l'eterogeneità dei formati d'origine, hanno richiesto un consistente lavoro di informatizzazione, omogeneizzazione e georeferenziazione, finalizzata alla loro gestione, visualizzazione ed analisi anche in ambiente GIS. Sono stati raccolti e preprocessati diverse tipologie di dati. Tra i dati geologico-stratigrafici ed idrogeologici sono stati informatizzati e georeferenziati principalmente dati cartografici (carte geologiche prodotte in ambito universitario, carta geolitologica a supporto del Piano Territoriale Paesaggistico degli ambiti regionali 2 e 3 ricadenti nella provincia di Trapani, carte idrogeologiche dell'acquifero derivanti da studi specifici quali lo studio prodotto dalla Cassa del Mezzogiorno del 1982, lo studio condotto da Bonanno et al. nel 1999-2000, ecc...) e numerosi log stratigrafici di pozzi e perforazioni geognostiche raccolti presso diversi enti (Dipartimento Regionale Acque e Rifiuti, Dipartimento Regionale Territorio e Ambiente, Genio Civile di Trapani, ESA, Università degli studi di Palermo e Catania, ecc...). Oltre all'informatizzazione e georeferenziazione dei dati è stata effettuata la digitalizzazione degli elaborati documentali prodotti nell'ambito dei singoli studi raccolti.

Ai fini dell'acquisizione dei dati stratigrafici relativi all'area di studio, si è fatto riferimento primariamente al database del Genio Civile di Trapani "GIS Gras" (GIS per la Gestione del Regime delle Acque Sotterranee), contenente i dati anagrafici delle pratiche di concessioni idriche rilasciate sul territorio di competenza, messo a disposizione dal Dipartimento Regionale Acque e Rifiuti nell'ambito dell'attuazione del POA Acque sotterrane. A partire dai dati anagrafici delle singole pratiche di concessione da pozzo, archiviate nel suddetto database, sono state innanzitutto generate, tramite applicativo GIS, le geometrie puntuali ad esse connesse, con le quali è stata effettuata la loro georeferenziazione cartografica. Mediante interrogazioni spaziali in ambiente GIS sono stati quindi filtrati i pozzi ricadenti all'interno dell'area di studio e la selezione effettuata è stata utilizzata come base dati di riferimento per la ricerca, presso gli archivi del Genio Civile di Trapani e del Dipartimento Regionale Acque e Rifiuti, delle pratiche di concessione idrica da pozzo relative al territorio dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara. A tale proposito la

perimetrazione dell'acquifero della Piana utilizzata per l'estrazione dei dati relativi ai pozzi è stata quella definita nell'ambito del presente studio (cfr. paragrafo 4.2).

La ricerca delle pratiche presso gli uffici regionali è stata effettuata con l'obiettivo di coprire il territorio dell'acquifero della Piana con una distribuzione quanto più possibile omogenea di informazioni stratigrafiche, nei limiti della disponibilità dei dati d'origine. Pertanto le pratiche rinvenute sono state analizzate in loco, estrapolando da esse solo le informazioni di interesse ed in particolare le stratigrafie dei terreni attraversati e gli stralci cartografici riportanti le localizzazioni di dettaglio dei pozzi (Figura 4.1). Sono stati contestualmente acquisiti, ove disponibili, ulteriori dati ed informazioni utili presenti all'interno delle pratiche consultate, quali quelli desumibili da eventuali relazioni idrogeologiche a corredo delle stesse.



Figura 4.1 – Formato tipo dei dati stratigrafici e di localizzazione cartografica delle pratiche di concessione idrica da pozzi consultate presso gli archivi del Genio Civile di Trapani e del DAR

La ricerca eseguita ha consentito di verificare, ed in alcuni casi modificare sulla base degli stralci cartografici allegati alle pratiche, le coordinate dei pozzi inserite nel database originario "Gis Gras". Le ubicazioni, così verificate o modificate, sono state registrate in una feature class puntuale relativa ai pozzi rinvenuti, ed i dati stratigrafici ad essi correlati sono stati informatizzati,

agganciandoli alle geometrie dei pozzi rinvenuti, attraverso il codice istruttoria, che ha assunto il valore di chiave primaria.

Il set di dati stratigrafici ottenuto dall'informazione delle pratiche di concessione idrica, consultate presso gli archivi del Genio Civile di Trapani e del Dipartimento Regionale Acque e Rifiuti, è stato quindi integrato con ulteriori dati stratigrafici relativi all'area in esame, desunti da:

- sondaggi geognostici effettuati dall'ESA (Ente Sviluppo Agricolo);
- sondaggi geognostici effettuati nell'ambito dello studio geologico a supporto del Piano Regolatore Generale del Comune di Campobello di Mazara;
- sondaggi geognostici realizzati nell'ambito delle attività di caratterizzazione della discarica di C.da Rampante Favara (Castelvetrano);
- sondaggi geognostici profondi archiviati nell'ambito del progetto ViDEPI (Visibilità dei dati afferenti all'attività di esplorazione petrolifera in Italia) realizzato dal Ministero dello sviluppo economico ed Assomineraria.

Complessivamente sono state raccolte, informatizzate e georeferenziate circa 275 stratigrafie relative a pozzi e perforazioni geognostiche presenti sul territorio della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara. In Figura 4.2 è illustrata la mappa con l'ubicazione dei pozzi, ricadenti nella Piana, di cui sono stati acquisiti ed informatizzati i dati descrittivi ed un estratto della tabella contenente i relativi dati stratigrafici.



Figura 4.2 – Ubicazione dei pozzi di cui sono stati acquisiti i dati descrittivi ed informatizzazione dei dati stratigrafici acquisiti

# 4.2 Elaborazione del modello geolitologico di sottosuolo e ricostruzione della configurazione geometrica tridimensionale dell'acquifero

L'elaborazione del modello concettuale idrogeologico dell'acquifero si è basata innanzitutto sulla ricostruzione della sua configurazione geometrica tridimensionale, attraverso l'individuazione dei limiti che definiscono i confini della roccia serbatoio secondo criteri idrogeologici (limiti di permeabilità).

Il primo passo per la ricostruzione della configurazione geometrica dell'acquifero è stato la perimetrazione in planimetria del *complesso idrogeologico calcarenitico-sabbioso*, coincidente nell'area di studio con il Complesso delle Formazioni Detritiche Plio-Quaternarie di Mouton (*Carta delle risorse idriche sotterranee*, Fried J.J., Mouton J., Mangano F., 1982) e descritto nel paragrafo 3.2.

La perimetrazione è stata effettuata, tramite applicativi GIS, utilizzando come base di riferimento la carta geolitologica in scala 1:50.000 del Piano Territoriale Paesaggistico – Ambiti Regionali 2 e 3 (La Rosa A., De Domenico R., 2006) e l'attribuzione, specificata nel paragrafo 3.2, delle formazioni litostratigrafiche al *complesso idrogeologico calcarenitico-sabbioso*.

In Figura 4.3 è riportato il risultato della perimetrazione effettuata, che delimita planimetricamente l'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara.



Figura 4.3 - Perimetrazione dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara effettuata sulla base della carta geolitologica del PTP - Ambiti regionali 2 e 3

Al fine di valutare anche l'estensione in profondità dell'acquifero, e quindi ricostruire tridimensionalmente la sua configurazione geometrica, è stato utilizzato principalmente il criterio litostratigrafico, basato sull'analisi di dati stratigrafici per la ricostruzione del modello geolitologico del sottosuolo e l'individuazione della superficie basale dell'acquifero.

In particolare sono state esaminate le 275 stratigrafie di pozzi idrici e perforazioni geognostiche relative al territorio della Piana raccolte ed informatizzate nell'ambito dello studio (cfr. paragrafo 4.1). Un importante lavoro interpretativo è stato fatto per l'assegnazione delle litologie descritte nelle stratigrafie alle Formazioni litostratigrafiche presenti nell'area. Soltanto una parte dei dati stratigrafici raccolti ha consentito di definire, con un buon livello di confidenza, l'andamento in profondità della superficie limite dell'acquifero (substrato costituito dal *complesso idrogeologico argilloso-marnoso* a bassa permeabilità); la maggior parte delle stratigrafie, nonostante non si attestassero al substrato, ha comunque consentito di definire gli spessori minimi dell'acquifero e la natura dello stesso.

Ad integrazione dei dati stratigrafici, sono stati utilizzati anche i risultati delle indagini geofisiche effettuate su alcune porzioni dell'acquifero della Piana, nell'ambito dello studio idrogeologico condotto da Arlab nel 1981 (Cassa per il Mezzogiorno, 1982). I risultati di tali indagini, ed in particolare le carte del tetto del substrato conduttore relative al settore occidentale dell'acquifero ed al settore nord-orientale, sono stati estremamente utili ai fini dell'identificazione del substrato dell'acquifero nella zona dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, e nella zona a sud-ovest di Partanna (Figure 4.4, 4.5, 4.6).



Figura 4.4 - Carta del tetto del substrato conduttore nell'area dei laghi (Casmez, 1982)



Figura 4.5 - Carta del tetto del substrato conduttore nell'area a sud-ovest di Partanna (Casmez. 1982)



Figura 4.6 - Sezioni elettriche interpretative nell'area a sud di Partanna (Casmez, 1982)

Una prima elaborazione del modello geolitologico del sottosuolo è stata effettuata attraverso la realizzazione di 14 sezioni, a copertura della superficie dell'acquifero e passanti per le zone di maggiore rilevanza idrogeologica. Successivamente la ricostruzione analitica della successione geolitologica del sottosuolo è stata effettuata in corrispondenza di 10 sezioni, scelte tra quelle passanti per le aree maggiormente coperte da dati stratigrafici o da dati geofisici (Figura 4.7).



Figura 4.7 - Stratigrafie (punti in blu) e tracce delle 10 sezioni geolitologiche (linee in rosso) utilizzate per la ricostruzione dal modello geolitologico del sottosuolo

Nelle sezioni sono state individuate le unità litostratigrafiche presenti nell'area (cfr. paragrafo 3.1), ricostruendo la loro successione verticale ed i relativi spessori, con l'obiettivo principale di ricostruire l'andamento del substrato a bassa permeabilità dell'acquifero.

Le sezioni più rappresentative (A-B, Z-Z', I-L, G-H) sono state digitalizzate e vengono riportate nelle Figure 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, unitamente ad una loro breve descrizione. Le sezioni fanno riferimento, per la legenda dei termini, alla Figura 4.12, riportante la colonna stratigrafica dell'area di studio, con l'attribuzione delle unità litostratigrafiche riscontrate ai relativi complessi idrogeologici descritti nel paragrafo 3.2.



Figura 4.8 - Sezione geolitologica A-B

#### Descrizione

Ubicata nel settore centrale dell'acquifero, ha direzione NNE-SSO e attraversa da monte verso mare C.da Staglio, C.da Canalotto, C.da Bresciana, per arrivare quindi lungo la costa all'altezza di Case Di Giorgi. Da monte verso valle, il substrato, inizialmente affiorante (MABa), si immerge raggiungendo già a breve distanza (C.da Staglio) una profondità di almeno 140 m; a parte un locale rialzo, il substrato mantiene grossomodo la stessa profondità (140-150 m) per poi approfondirsi nei pressi di C.da Bresciana dove supera i 200 m dal p.c.. Fino a questo punto è stato possibile ricostruire l'andamento del substrato a bassa permeabilità con le informazioni delle stratigrafie dei pozzi (specialmente quelli ad uso idropotabile). Da C.da Bresciana verso mare i pochi dati stratigrafici disponibili, che indicano spessori di unità permeabili (CM+TM e MABc) superiori a 110 m (pozzo TP1084), non hanno consentito di seguire l'andamento del substrato, pertanto sono stati ipotizzati spessori di CM+TM e MABc, confrontabili con le aree più a monte e compresi fra 140 e 110 m, in diminuzione verso mare.



Figura 4.9 - Sezione geolitologica Z-Z'

#### Descrizione

Ubicata nel settore occidentale dell'acquifero, ha direzione NE-SO e passa da Piano Messina e per il Gorgo Medio, fino ad arrivare al mare in C.da San Nicola Soprano; a partire da NE, il substrato è subaffiorante (*Fm. Terravecchia*) e immergente verso mare con spessori importanti che si mantengono verso SO, come confermano le stratigrafie del pozzo ESA72, ESA39, ma soprattutto ESA14. Nel tratto di nord-est gli spessori di *Calcarenite di Marsala* e Terrazzi Marini (CM+TM), sede dell'acquifero, non superano i 25 m. All'altezza dei Gorghi Tondi la *Fm. Terravecchia* lascia il posto ai Gessi di Pasquasia (pozzo ESA37 e pozzo ESA29), la cui dissoluzione di tipo carsico ha generato lo sprofondamento delle sovrastanti CM+TM ed ha dato origine alle depressioni lacustri soprastanti. Ancora verso mare il substrato si approfondisce e cambia natura litologica (Trubi), sovrastato da spessori di acquifero (CM+TM) di circa 85 m. Lungo la linea di costa il substrato risale con conseguente assottigliamento dell'acquifero, in accordo con i dati geofisici della Cassa per il Mezzogiorno (1982).



#### Figura 4.10 - Sezione geolitologica I-L

#### Descrizione

Taglia da Ovest verso Est l'intero acquifero, partendo dalla costa all'altezza del Lago Preola, passando dallo stesso e proseguendo a sud di C.da Cusa e a sud dell'Abitato di Campobello di Mazara; attraversa quindi il Fiume Modione in direzione di Case Dimina, per terminare oltre il Fiume Belice nei pressi della Stazione di sollevamento Basso Belice. Nel settore più occidentale l'andamento del substrato rispecchia quanto visto nella Sezione Z-Z', con l'avvicendarsi da ovest verso est di Trubi, Gessi e Fm. Terravecchia, mentre l'acquifero (CM+TM) aumenta il suo spessore da circa 30 m nei pressi della costa a circa 60 m nella zona compresa tra il Lago Preola e la costa. Procedendo verso Est la Fm. Terravecchia rappresenta il substrato a bassa permeabilità almeno fino alla C.da Misiddi-Campana (pozzo ESA 87). Proseguendo verso est, il substrato si approfondisce superando i 100 m di profondità dal piano campagna (pozzi TP1587, C943, ESA97); al di sopra, gli importanti spessori delle unità più permeabili (a prevalente litologia calcarenitica) sono rappresentati dai termini CM+TM e MABc. Oltre C.da Cusa cominciano delle importanti intercalazioni argillose (CM+TM<sub>LA</sub> e MABc<sub>LA</sub>) all'interno dei depositi calcarenitico-sabbiosi, con tendenza all'aumento fino al Fiume Modione. A Sud dell'abitato di Campobello di Mazara il substrato, costituito dalla Fm. Terravecchia, si approfondisce ancora, raggiungendo la profondità di circa 180 m a Nord di C.da Bresciana (pozzo TR8B). Per il restante tratto, fino al Fiume Belice, i dati stratigrafici provenienti da perforazioni scarseggiano, pertanto la successione litostratigrafica è stata ricostruita sulla base dei dati geologici di superficie e attraverso interpolazioni con dati distanti anche alcuni chilometri. All'altezza del Fiume Modione le intercalazioni argillose entro la MABc assumono un carattere predominante tanto da poter identificare un passaggio laterale con la MABa. Ad est del Fiume Modione il substrato (MABa) è poco profondo (circa 20 m) e si approfondisce gradualment



Figura 4.11 - Sezione geolitologica G-H

#### Descrizione

Taglia l'acquifero all'incirca da Ovest a Est, partendo da C.da Marcita, passando per l'abitato di Castelvetrano, poi a sud delle contrade Staglio e Magaggiari ed infine per la località Rocche di Donna Lucia. Da ovest il tetto del substrato affiorante (*Fm. Terravecchia*) si immerge e poi risale verso Castelvetrano, dove affiora con la litologia dei *Trubi*; subito ad est di Castelvetrano il substrato rapidamente si approfondisce e poco oltre l'abitato i *Trubi* lasciano posto alla MABa che all'altezza di C.da Staglio si attesta oltre i 135 m di profondità (pozzo Staglio E). Ancora oltre, il substrato risale sia in base ai dati del vicino campo pozzi Magaggiari (TP1687) che ai dati geofisici della Cassa per il Mezzogiorno (1982). Procedendo verso la località Rocche di Donna Lucia i depositi calcarenitico-sabbiosi, sede dell'acquifero, presentano un progressivo aumento di lenti argillose (MABc<sub>LA</sub>) che raggiungono spessori talora importanti (pozzo ESA 85). Verso est i depositi calcarenitico-sabbiosi si assottigliano, arrivando all'estremità orientale della sezione a profondità di circa 60 m, ed il substrato (MABa) affiora lungo la rottura di pendenza presente in località Rocche di donna Lucia.

TM				CONTRACTOR AND AND A
	LITOSTRA	LITOSTRATIGRAFIA		GRADO DI PERMEABILITÀ
	Sabbie costiere e dep	Sabbie costiere e depositi recenti (Olocene)		
MABCL T	Terrazz (Pleistocen	i Marini e superiore)	Complesso calcarenitico-sabbioso	Medio per porosità e secondariamente per
MABC	Calcareniti (Emiliano	i <b>di Marsala</b> I-Siciliano)		Tratturazione
MABCIA MABC	Arg (Santerniar	gille no-Emiliano)	Complesso argilloso-marnoso	Basso per porosità
A A AMABAS STAT	Membro calcarenitico		Complesso calcarenitico-sabbioso	Medio per porosità e secondariamente per fratturazione
	Membro argilloso- sabbioso	Formazione Marnoso-Arenacea della Valle del Belice (Piacenziano-Gelasiano)	Complesso argilloso-marnoso passante verso ovest e nord a calcarenitico-sabbioso	Da medio a basso in prevalenza per porosità
	Membro arenaceo sup.		Complesso calcarenitico-sabbioso	Medio per porosità e secondariamente per fratturazione
	Membro arenaceo inf.			
	Tr (Zancleano-Pi	ubi acenziano inf.)	Complesso	Basso in prevalenza per porosità
TV	Gessi della Forma (Messini	Gessi della Formazione di Pasquasia (Messiniano sup.)		(nei Gessi da bassa a localmente media per fratturazione e carsismo)
	Formazione (Tortoniano sup	Terravecchia Messiniano inf.)		

Figura 4.12 - Colonna stratigrafica e complessi idrogeologici relativi all'area di studio (modificata da Bonanno et al., 2000 e Vitale, 1990)

Una volta definito il modello geolitologico di sottosuolo, la cui impalcatura è costituita dalle 10 sezioni principali di cui alla Figura 4.7, è stato creato un archivio con la selezione di dati utili alla ricostruzione del substrato dell'acquifero, ed in particolare: 1) dati litostratigrafici relativi a pozzi e sondaggi che intercettano il substrato; 2) dati sull'affioramento in superficie del tetto del substrato; 3) dati litostratigrafici presunti, con i quali sono state coperte alcune aree prive di dati, sulla base del modello geolitologico concettuale, ed è stata garantita la coerenza reciproca fra le sezioni nei punti di intersezione fra le stesse.

La selezione di dati così ottenuta è stata utilizzata per ricavare la nuvola di punti rappresentativi della quota altimetrica del substrato, la cui spazializzazione, tramite algoritmi di interpolazione in ambiente GIS, ha restituito il modello digitale del tetto delle unità stratigrafiche a bassa permeabilità che limitano inferiormente l'acquifero, ossia il modello digitale della superficie di base dell'acquifero (Figura 4.13).

Il limite superiore dei terreni costituenti l'acquifero è invece rappresentato dalla superficie topografica, riprodotta dal modello digitale del terreno relativo all'area. Lo sviluppo geometrico tridimensionale del "serbatoio" acquifero è pertanto determinato dalla localizzazione in profondità della sua superficie di base e dalla localizzazione in quota della superficie topografica: le posizioni reciproche di queste due superfici determinano punto per punto lo spessore dell'acquifero (Figura 4.14).



Figura 4.13 – Andamento della superficie di base dell'acquifero, con riportata in rosso la perimetrazione dello stesso sulla superficie topografica



Figura 4.14 - Ricostruzione dello sviluppo geometrico del "serbatoio" acquifero compreso tra la superficie topografica ed il substrato a bassa conducibilità idraulica, base dell'acquifero. In rosso è riportata la perimetrazione dello stesso sulla superficie topografica

La configurazione geometrica sopra descritta fa riferimento ad un acquifero a falda libera: il locale assetto multifalda dell'acquifero, riconosciuto nell'area compresa tra C.da Bresciana e C.da Canalotto Favata (cfr. paragrafo 3.2), non è stato infatti modellizzato come tale, ma bensì come acquifero monofalda equivalente, come meglio specificato al paragrafo 7.4.2.3. Tale scelta è stata dettata dalla difficoltà di rappresentare adeguatamente, sulla base dei dati geologico-stratigrafici raccolti, la localizzazione in profondità, lo spessore e la geometria delle intercalazioni argillose discontinue che determinano il locale assetto multifalda dell'acquifero.

La superficie limite superiore dell'acquifero suddetto è rappresentata pertanto dalla superficie piezometrica dello stesso, che costituisce un limite idrodinamico dell'acquifero.

Una volta ricostruita la configurazione geometrica tridimensionale, con l'individuazione delle superfici limite superiore ed inferiore dell'acquifero, sono state quindi definite le condizioni ai limiti laterali dello stesso. Esse sono state identificate in corrispondenza della perimetrazione effettuata in planimetria, sulla base dei seguenti elementi:

- andamento del substrato (superficie limite inferiore),
- andamento della superficie piezometrica (superficie limite superiore),

- andamento della superficie topografica,
- rapporti idraulici con il reticolo idrografico,
- rapporti con le formazioni idrogeologiche adiacenti e sottostanti.

Le condizioni ai limiti laterali così individuate sono state:

- un *limite a flusso imposto nullo* lungo tutto il margine settentrionale dell'acquifero ed il margine nord-orientale fino all'intersezione nord con l'alveo del fiume Belice. Tale limite deriva dal contatto, nella zona di monte dell'acquifero, con gli affioramenti a basso grado di permeabilità del complesso idrogeologico argilloso-marnoso (limite geologico stagno);
- un *limite a potenziale imposto* lungo il margine sud-orientale dell'acquifero, compreso tra l'intersezione nord con l'alveo del fiume Belice e l'intersezione con l'incisione del torrente Muretta (affluente del f. Modione). Tale limite deriva dalla presenza di una condizione di tipo "fiume drenante" lungo il tratto perimetrale dell'acquifero che lambisce l'alveo del fiume Belice e dalla presenza di una condizione di tipo "sorgente per limite di permeabilità definito" lungo il restante tratto di questo segmento perimetrale (dall'intersezione sud con l'alveo del fiume Belice e l'intersezione con l'incisione col torrente Muretta);
- un *limite a flusso imposto nullo* lungo il margine centro-meridionale dell'acquifero, nel tratto compreso tra l'intersezione con l'incisione del torrente Muretta e l'intersezione con la linea di costa. Tale limite deriva dal contatto dell'acquifero con gli affioramenti a basso grado di permeabilità del complesso idrogeologico argilloso-marnoso e dall'assetto idrodinamico locale dell'acquifero;
- un *limite a potenziale imposto* lungo il margine meridionale ed occidentale dell'acquifero, derivante dalla presenza della linea di costa.

Sulla base dei criteri (idrogeologici) utilizzati per la perimetrazione dell'acquifero, della ricostruzione della sua configurazione geometrica tridimensionale e delle condizioni ai limiti individuate, l'acquifero della Piana può essere considerato un'unità di bilancio ai sensi del D. lgs. 30/2009, Allegato 1, Parte A.1.

#### 4.3 Acquisizione dei dati relativi ai parametri idrodinamici dell'acquifero

La parametrizzazione idrodinamica dell'acquifero rappresenta un elemento importante nell'elaborazione del modello concettuale idrogeologico del sistema, oltre che nell'implementazione del modello numerico di simulazione del flusso idrico sotterraneo sia a scala regionale che locale (cfr. paragrafo 7.4.3.4 e paragrafo 8.2).

Come anticipato al paragrafo 3.2, i dati disponibili relativi ai parametri idrodinamici dell'acquifero della Piana sono molto limitati e derivano da sporadiche prove di emungimento eseguite in C.da Bresciana (Cassa per il Mezzogiorno, 1982).

Al fine di ottenere una prima distribuzione di valori rappresentativi dei parametri idrodinamici dell'acquifero, sono stati elaborati i risultati di prove effettuate in pozzi della Piana e documentate nei rispettivi database di provenienza; inoltre sono state condotte alcune prove di pompaggio speditive in una selezione di pozzi ricadenti nell'acquifero.

In particolare sono state condotte le seguenti attività:

- 1) Elaborazione dei dati di relazione portata-abbassamenti ottenute da prove speditive di campo, effettuate da tecnici del Genio Civile di Trapani in anni passati a supporto del rilascio delle concessioni idriche e per la stima delle portate di esercizio dei pozzi. I documenti consultati ("verbali di accertamento") attestano che le prove eseguite dal Genio Civile consistevano nella misura del livello idrico dinamico nel pozzo, dopo un determinato periodo di estrazione di acqua dal sottosuolo; allo spegnimento della pompa veniva misurato il tempo necessario affinché il livello dinamico si riportasse al livello statico letto prima della prova e, mediante una semplice formulazione di calcolo dei volumi, si calcolava la portate emunta localmente dall'acquifero. I risultati delle verifiche di accertamento ritenute più attendibili e correlate alla stratigrafia dei pozzi, sono stati utilizzati per il calcolo delle portate specifiche degli stessi e quindi per la stima della trasmissività puntuale dell'acquifero considerato come a falda libera. Di fatto, una volta nota la tipologia costruttiva del pozzo, la sua profondità, lo spessore dell'acquifero saturo e l'abbassamento indotto dal pompaggio, si sono calcolate le relative portate specifiche (Qspec) e conseguentemente la trasmissività e la conducibilità idraulica orizzontale (k<sub>o</sub>) dell'acquifero.
- 2) Esecuzione, in alcuni pozzi selezionati, di prove di emungimento speditive, finalizzate alla determinazione delle portate specifiche dei pozzi, correlate alla trasmissività e conseguentemente alla conducibilità idraulica orizzontale dell'acquifero nel loro intorno. Tali prove sono state utilizzate anche per validare le stime della conducibilità idraulica dedotta dai verbali di accertamento redatti dal Genio Civile di Trapani. Tenuto conto delle

vaste dimensioni dell'area in esame, i pozzi in cui effettuare le prove di pompaggio speditive sono stati selezionati tra quelli aventi le seguenti caratteristiche:

- pozzi completi di dati stratigrafici;
- pozzi filtranti tutto lo spessore dell'acquifero e non soggetti ad interferenza con altri prelievi limitrofi;
- pozzi per i quali il proprietario ha dato disponibilità allo svolgimento della prova.
- Elaborazione di dati relativi all'esecuzione di prove a gradini di portata su nuovi pozzi realizzati nel 1990 dall'ATI IRA-Costanzo nell'area del campo pozzi Bresciana.

Le prove di emungimento in campo eseguite da ARPA, considerati i limitati tempi di pompaggio (da 1 ora a 3 ore di emungimento e altrettante ore per la risalita), sono state eseguite ipotizzando un regime transitorio (eq. di Jacob e Theis), quindi in un contesto in cui il coefficiente di immagazzinamento e la porosità efficace giocano un ruolo nel rilascio dell'acqua dal mezzo poroso. Il pompaggio è stato effettuato a portata costante, misurando gli abbassamenti dei livelli (drawdown) in funzione del tempo. Dopo un certo tempo t, verificata una sufficiente stabilizzazione del livello dinamico, si è proceduto all'arresto del pompaggio, misurando la conseguente risalita del livello in funzione del tempo (prova di risalita). In due pozzi, precisamente nei pozzi Staglio 11 e Staglio 12, gestiti da Siciliacque, i livelli sono stati misurati anche in un piezometro a poca distanza dai pozzi di prova; per tali pozzi è stato possibile ottenere valori abbastanza affidabili di T e K, in linea con i valori di conducibilità idraulica stimati negli altri siti di prova.

In definitiva le prove di pompaggio eseguite hanno consentito, pur nei limiti delle approssimazioni insite nell'utilizzo di metodi speditivi, di stimare la trasmissività puntuale dell'acquifero a partire dalla portata specifica dei pozzi sulla base della seguente relazione:

$$T = \frac{\log(\frac{R}{r})}{2.73} \cdot \frac{Qc}{\Delta hc}$$

 $\operatorname{Con} \frac{Qc}{\Delta hc} = \operatorname{portata} \operatorname{specifica} (Q_s) \operatorname{m}^2 / s$ 

- R = raggio di influenza del pozzo
- r = raggio del pozzo

Nel caso in esame, ai fini della stima della trasmissività dell'acquifero, si è posta:

$$T = 1 * Q_s$$

dove  $Q_s$  (portata specifica espressa in m<sup>2</sup>/s) rappresenta la portata estraibile per unità di abbassamento (dh) del livello.

In Tabella 4.1 si riportano i valori di conducibilità idraulica orizzontale  $K_o$  dell'acquifero, espressa in m/s, stimati attraverso i dati desunti dai verbali di accertamento del Genio Civile di Trapani, i dati desunti dalle prove di emungimento effettuate nel campo pozzi Bresciana nel 1990, nonché i dati desunti dalle prove di campo eseguite direttamente da ARPA.

In Figura 4.15 è riportata la distribuzione dei valori puntuali di conducibilità idraulica orizzontale dell'acquifero ottenuti dalle prove di pozzo condotte sul campo o documentate nelle rispettive basidati di provenienza.



Figura 4.15 - Ubicazione e valore dei dati puntuali di conducibilità idraulica orizzontale, espressi in m/s, ricavati dalle prove di pozzo condotte sul campo o documentate nelle rispettive basi-dati di provenienza

	/ I	0	Υ.	
Nome pozzo	Coord X (m)	Coord Y (m)	T=Qspec (m <sup>2</sup> /s)	$K_{o}(m/s)$
Staglio11 (°)	312609	4173329	$2.46*10^{-04}$	$4.47*10^{-06}$
Staglio12 (°)	312620	4172839	$7.79*10^{-04}$	$1.86*10^{-05}$
P_M_Mar (°)	297052	4163933	$1.21*10^{-04}$	$2.19*10^{-06}$
P_File_1 (°)	296770	4163134	$4.15*10^{-03}$	$7.54*10^{-05}$
TP1519	299189	4163108	$2.55*10^{-04}$	$5.32*10^{-06}$
P_Garg_R (°)	302225	4163201	$1.43*10^{-03}$	$2.55*10^{-05}$
P_Fer_D (°)	302423	4164244	$2.99*10^{-03}$	$4.98*10^{-05}$
P_Men_V (°)	315317	4176910	$5.88*10^{-03}$	$1.73*10^{-04}$
TP1566	298438	4163142	$4.71*10^{-03}$	$6.28*10^{-05}$
TP1504	298100	4164549	$1.75*10^{-03}$	$7.61*10^{-05}$
TP1495	305211	4170103	$7.85*10^{-04}$	$1.57*10^{-04}$
TP1717	295294	4164685	$5.44*10^{-04}$	3.20*10 <sup>-05</sup>
TP1443	302042	4162604	$1.18*10^{-03}$	$2.05*10^{-05}$
TP1367	299452	4168207	$5.65*10^{-03}$	$2.26*10^{-04}$
TP1439	305726	4177681	$1.65*10^{-04}$	3.67*10 <sup>-06</sup>
TP1692	296801	4162266	$2.83*10^{-03}$	8.19*10 <sup>-05</sup>
TP1596	306500.	4173964	$4.00*10^{-04}$	$2.35*10^{-05}$
TP1494	305141	4170076	$7.84*10^{-04}$	$4.02*10^{-05}$
TP1587	298064	4166959	$9.41*10^{-04}$	$1.38*10^{-05}$
P_Pas (°)	300473	4162794	$2.45*10^{-04}$	$4.32*10^{-06}$
TP1914	297574	4162505	$6.00*10^{-03}$	$7.70*10^{-05}$
TP1948	309765	4169820	$8.00*10^{-03}$	$3.50*10^{-05}$
TP1958	297352	4164158	$2.50*10^{-03}$	$1.10*10^{-05}$
TP1993	292793	4164509	$4.00*10^{-03}$	$5.71*10^{-04}$
TP1997	300001	4165279	$8.00*10^{-03}$	$2.70*10^{-05}$
TP2016	308110	4169414	$1.30*10^{-03}$	$1.90*10^{-05}$
TP2035	293026	4164548	$1.30*10^{-02}$	$4.20*10^{-03}$
TP2039	297271	4161878	$5.00*10^{-03}$	$1.30*10^{-04}$
TP2048	291617	4165093	$7.00*10^{-03}$	8.05*10 <sup>-03</sup>
TP1062	311384	4169611	$1.10*10^{-02}$	5.30*10 <sup>-05</sup>
TP1069	299514	4166311	$7.00*10^{-03}$	$2.40*10^{-05}$
TP1876	299171	4163220	$4.70*10^{-03}$	$8.20*10^{-05}$
TP1879	297745	4162386	$6.00*10^{-03}$	$2.50*10^{-04}$
TP1888	301138	4163105	$7.08*10^{-03}$	$1.09*10^{-04}$
			$1.71*10^{-03}$	$2.84*10^{-05}$
			$2.66*10^{-03}$	$4.43*10^{-05}$
TR/10B	303044	4165758	$1.74*10^{-03}$	$2.89*10^{-05}$
			$1.45*10^{-03}$	$2.42*10^{-05}$
			1.02*10 <sup>-03</sup>	$1.70*10^{-05}$
			$9.80*10^{-04}$	$1.40*10^{-05}$
	202050	4165770	1.17*10 <sup>-03</sup>	$1.67*10^{-05}$
IKII/A	303038	4105//2	1.71*10 <sup>-03</sup>	$2.45*10^{-05}$
			8.39*10 <sup>-04</sup>	$1.20*10^{-05}$

Tabella 4.1 - Stima della conducibilità idraulica attraverso prove di pozzo in campo eseguite da ARPA (indicate con •), dedotte da prove di accertamento di portata effettuate dal Genio Civile di Trapani (indicate con TP) e da prove a gradini realizzate nel 1990 (indicate con TR) (continua)

continua da Tabella 4.1

Nome pozzo	Coord X (m)	Coord Y (m)	T=Qspec (m <sup>2</sup> /s)	K <sub>0</sub> (m/s)
TR11/B	303404	4166218	9.29*10 <sup>-04</sup>	1.33*10 <sup>-05</sup>
			9.57*10 <sup>-04</sup>	$1.37*10^{-05}$
			$7.69*10^{-04}$	$1.10*10^{-05}$
			$1.04*10^{-03}$	$1.30*10^{-05}$
TR12/B	303788	4166344	$1.25*10^{-03}$	1.56*10 <sup>-05</sup>
			1.88*10 <sup>-03</sup>	2.34*10 <sup>-05</sup>
TR12/A	303814	4166346	$1.50*10^{-03}$	$1.88*10^{-05}$
			$2.09*10^{-03}$	$2.61*10^{-05}$
			$3.00*10^{-03}$	3.75*10 <sup>-05</sup>
			$1.04*10^{-03}$	1.30*10 <sup>-05</sup>
TR/13B	302297	4165383	$1.13*10^{-03}$	$1.41*10^{-05}$
			9.23*10 <sup>-04</sup>	$1.15*10^{-05}$
	302277	4165396	$6.94*10^{-04}$	9.92*10 <sup>-06</sup>
TR/13A			8.42*10 <sup>-04</sup>	1.20*10 <sup>-05</sup>
			7.86*10 <sup>-04</sup>	$1.12*10^{-05}$

#### 4.4 Esecuzione delle campagne di rilievo piezometrico del corpo idrico sotterraneo

Ai fini dell'aggiornamento dei dati piezometrici storici dell'acquifero desunti dagli studi pregressi raccolti, nonché per ottenere un set di punti di osservazione dei livelli della falda adeguato a supportare le successive operazioni di calibrazione dei modelli numerici di simulazione del flusso idrico sotterraneo a scala regionale e locale, sono state condotte, nel corso dell'anno 2017, due campagne di rilievo piezometrico dell'acquifero, una nella stagione primaverile (maggio-giugno), l'altra nella stagione invernale (dicembre).

La pianificazione e l'esecuzione delle attività di rilievo è stata effettuata su una selezione di pozzi pubblici e privati, scelti tra quelli reperiti durante la ricognizione iniziale presso gli uffici del Dipartimento Acque e rifiuti e del Genio Civile di Trapani.

Tale selezione è stata effettuata sulla base delle caratteristiche dei pozzi e dell'accessibilità dei siti per l'effettuazione delle misure, prediligendo in particolare:

- pozzi che interessano l'intero spessore dell'acquifero;
- pozzi con stratigrafia affidabile;
- pozzi agevolmente accessibili.

La selezione ha quindi portato all'individuazione di un totale di 59 pozzi, nei quali effettuare le due campagne di rilievo piezometrico dell'acquifero, la cui ubicazione è riportata nelle Figure 4.16 e 4.17.

In Figura 4.18 è riportata la carta piezometrica dell'acquifero ottenuta per interpolazione spaziale dei dati puntuali rilevati nel corso della campagna di rilievo invernale. L'andamento dei livelli piezometrici rilevati durante la campagna primaverile è confrontabile con quello rilevato nella campagna invernale e presenta uno scostamento medio dei livelli di -0.22 m rispetto ai valori invernali.



Figura 4.16 – Ubicazione dei pozzi in cui è stata effettuata la campagna di rilievo piezometrico primaverile del 2017



Figura 4.17 – Ubicazione dei pozzi in cui è stata effettuata la campagna di rilievo piezometrico invernale del 2017



Figura 5.18 – Andamento della superficie piezometrica dell'acquifero (II campagna di rilievo – dicembre 2017)

## 4.5 Sintesi dei dati acquisiti ed elaborazione del modello concettuale idrogeologico preliminare dell'acquifero

L'attività di raccolta, elaborazione ed interpretazione dati descritta nei capitoli 3 e 4 ha consentito di elaborare il modello concettuale idrogeologico preliminare del sistema della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, cioè la descrizione schematica, basata sul livello di conoscenza e comprensione del sistema finora raggiunto, degli elementi principali che caratterizzano il sistema di flusso, ed in particolare: la delimitazione e l'assetto idraulico dell'acquifero, il suo sviluppo geometrico tridimensionale, la tipologia di condizioni ai limiti, l'area di ricarica, le direzioni di deflusso sotterraneo e le relative zone di recapito, le interazioni tra le acque superficiali e le acque sotterranee, i parametri idrodinamici dell'acquifero. Nella scheda 4.1 si riporta in forma sintetica la descrizione degli elementi principali che caratterizzano il sistema, ottenuta al termine delle attività di acquisizione ed interpretazione dei dati descritte nei capitoli 3 e 4, su cui si basa il modello concettuale idrogeologico preliminare dell'acquifero, nonché la successiva implementazione del modello numerico integrato della Piana descritto al paragrafo 7.4.

Scheda 4.1 - Sintesi del modello concettuale idrogeologico preliminare dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara

**Delimitazione dell'acquifero** L'acquifero ha sede nel complesso idrogeologico calcarenitico-sabbioso, comprendente i Membri calcareniticoarenacei della Fm. Marnoso-arenacea della Valle del Belice (MABc), le Calcareniti di Marsala (CM) ed i soprastanti terrazzi marini (TM) a medio grado di permeabilità (per porosità e secondariamente per fratturazione), e coincidente con il Complesso delle Formazioni Detritiche Plio-Quaternarie di Mouton (Carta delle risorse idriche sotterranee, Fried J.J., Mouton J., Mangano F., 1982). La delimitazione dell'acquifero si basa sulla perimetrazione del suddetto complesso idrogeologico, effettuata su un supporto di cartografia idrogeologica di maggiore dettaglio rispetto a quella della Carta di Mouton e rappresentata dalla Carta geolitologica ed idrogeologica in scala 1:50.000 del Piano Territoriale Paesaggistico - Ambiti regionali 2 e 3 ricadenti nella provincia di Trapani (La Rosa A., De Domenico R., 2006). Legenda Delimitazione dell'acquifero della Piana di CCM Complessi idrogeologici C. acquiferi locali C. calcareo E C. dei depositi alluvionali dei grandi corsi d'acqua C. delle formazioni detritiche Plio-Quaternarie C. delle piroclastiti lave e vulcaniti in genere C. delle rocce impermeabili Delimitazione dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara rispetto alla carta dei complessi idrogeologici di Mouton

Assetto idraulico	L'acquifero è caratterizzato da assetti idraulici differenti in differenti aree della Piana ed in particolare:
dell'acquifero	<ul> <li>Un assetto a falda libera riconoscibile nell'area a sud e ad ovest di C.da Bresciana, nonché nella fascia a nord di Castelvetrano fino a Partanna;</li> <li>Un locale assetto multifalda (falda libera superficiale e falda semiconfinata profonda) presente nell'area compresa tra C.da Bresciana (a sud-est dell'abitato di Campobello di Mazara) e C.da Canalotto Favata (a sud dell'abitato di Castelvetrano). L'origine della falda profonda localmente semiconfinata è legata alla presenza nell'area indicata di intercalazioni e lenti argillose discontinue all'interno del membro sabbioso-calcarenitico della Fm. Marnoso-arenacea della Valle del Belice ed in parte delle soprastanti Calcareniti di Marsala, che svolgono complessivamente il ruolo di acquitardo locale interposto tra i terreni sabbioso-calcarenitici.</li> </ul>
	CASTELVE TRANO COSTELVE TRANO
	Carta geolitologica in scala 1:50.000 del PTP, perimetrazione dell'acquifero ed indicazione della zona in cui è stato riconosciuto un assetto idraulico multifalda

Sviluppo geometrico<br/>tridimensionaleL'acquifero è delimitato, sia lateralmente che a letto, dal *Complesso idrogeologico argilloso-marnoso* (depositi<br/>della Fm. Terravecchia, affioranti ad ovest lungo il Fiume Delia-Arena, Argille del Santerniano-Emiliano affioranti<br/>a sud-est, argille della Fm. Marnoso-Arenacea della Valle del Belice e Fm. Trubi affioranti a nord-est), costituente<br/>il substrato regionale a bassa permeabilità dell'acquifero.

L'estensione areale in superficie dell'acquifero è pari a 260.7 Km<sup>2</sup>. Il suo spessore è determinato dall'andamento del substrato impermeabile, influenzato dalla struttura sinclinalica regionale dei depositi pre-Pliocenici, con direzione dell'asse NE-SO ed immersione a SO. Lo spessore, variabile, in generale si riduce procedendo da est verso ovest, andando da valori di circa 200 m in corrispondenza di C.da Bresciana a valori di alcune decine di metri lungo la fascia costiera occidentale. Gli spessori si riducono inoltre a qualche metro in corrispondenza delle zone marginali del bacino (limite settentrionale, orientale e sud-orientale).



Ricostruzione dello sviluppo geometrico del "serbatoio" acquifero compreso tra la superficie topografica ed il substrato a bassa conducibilità idraulica, base dell'acquifero. In rosso è riportata la perimetrazione dello stesso sulla superficie topografica

Condizioni ai limiti	La superficie limite inferiore dell'acquifero è rappresentata da un limite <i>a flusso imposto nullo</i> (limite geologico)
	coincidente con il tetto delle unità a bassa permeabilità poste alla base dell'acquifero (substrato). La superficie
	limite superiore è rappresentata da un <i>limite a potenziale imposto</i> coincidente con la superficie piezometrica. Le
	condizioni ai limiti laterali lungo la perimetrazione dell'acquifero sono:
	• un <i>limite a flusso imposto nullo</i> lungo il margine settentrionale e nord-orientale fino all'intersezione nord
	con l'alveo del fiume Belice;
	• un <i>limite a potenziale imposto</i> lungo il margine sud-orientale dell'acquifero, tra l'intersezione nord con
	l'alveo del fiume Belice e l'intersezione con l'incisione del torrente Muretta (affluente del f. Modione);
	• un <i>limite a flusso imposto nullo</i> lungo il margine centro-meridionale dell'acquifero, nel tratto compreso tra
	l'intersezione con l'incisione del torrente Muretta e l'intersezione con la linea di costa;
	• un limite a potenziale imposto lungo il margine meridionale ed occidentale dell'acquifero, in
	corrispondenza della linea di costa.
	Perimetro dell'acquifero con demarcazione (punti rossi) dei tratti con differenti condizioni ai limiti

#### Aree di ricarica, direzione di L'alimentazione dell'acquifero avviene per ricarica meteorica (infiltrazione efficace) attraverso un'area corrispondente all'estensione superficiale dello stesso (260.7 Km<sup>2</sup>), con prevalente zona di alimentazione posta nel deflusso sotterraneo, zone di settore nord-orientale, tra Castelvetrano e Partanna, caratterizzato da un maggiore rilievo altimetrico. Il deflusso recapito e scambi con i corpi sotterraneo generale procede da NE verso SO, in direzione del mare, ed è influenzato dall'andamento concavo del idrici superficiali

substrato (con asse allungato NE-SO). Localmente il deflusso subisce delle modificazioni a causa degli emungimenti continui e prolungati nel tempo concentrati in C.da Staglio ed in C.da Bresciana (in quest'ultima è presente una vasta depressione della superficie piezometrica, attribuibile agli emungimenti in tale zona). La falda libera superficiale è in connessione idraulica con il fiume Modione nei tratti del reticolo che attraversano gli affioramenti calcarenitici dell'acquifero, nonché con i laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi. E' presente una condizione di tipo "fiume drenante" lungo il tratto perimetrale dell'acquifero che lambisce l'alveo del fiume Belice. Le zone di recapito sono rappresentate dai tratti drenanti dei fiumi Modione e Belice, dalla presenza di una condizione di tipo "sorgente per limite di permeabilità definito" lungo il margine sud-orientale dell'acquifero (dall'intersezione sud con l'alveo del fiume Belice e l'intersezione con l'incisione col torrente Muretta) e dal mare.




# 5 Acquisizione ed elaborazione dei dati funzionali all'analisi del bilancio idrico dell'acquifero

#### 5.1 Elaborazione dei dati funzionali al calcolo della ricarica meteorica dell'acquifero

Il bilancio idrologico è espresso dall'equazione di continuità dei volumi entranti, uscenti ed invasati in un determinato bacino, in un periodo di tempo assegnato, in condizioni di deflusso naturale ossia in assenza di pressioni antropiche (DM Ambiente 28/07/2004, Allegato 1):

$$\mathbf{P} - \mathbf{E}\mathbf{t}\mathbf{r} = \mathbf{D} + \mathbf{I}_{\mathbf{e}} \pm \Delta \mathbf{V}$$
$$\mathbf{P}_{\mathbf{e}} = \mathbf{W} \pm \Delta \mathbf{V}$$

ossia

dove: P = precipitazione totale; Etr = evapotraspirazione reale; D = deflusso superficiale (o ruscellamento);  $I_e$  = infiltrazione efficace (pari alla ricarica degli acquiferi);  $\Delta V$  = riserve idriche invasate cioè immagazzinate nel bacino nel periodo considerato,  $P_e$  = precipitazioni efficaci, con  $P_e$  = P - Etr; W = eccedenza idrica o deflusso totale, con W = D +  $I_e$ .

Nel caso in cui si faccia riferimento ad una scala temporale annuale, su un periodo di riferimento pari ad un ciclo idrologico o comunque ad un periodo di tempo sufficientemente lungo, è possibile assumere trascurabile il termine  $\Delta V$  ed in tal caso l'equazione del bilancio diventa:

#### $P - Etr = D + I_e$

dove il termine di sinistra rappresenta i volumi entranti nel bacino, ossia le precipitazioni efficaci  $P_e$ , ed il termine di destra rappresenta i volumi uscenti dal bacino, ossia il deflusso totale o eccedenza idrica W. In tali condizioni, quindi, le precipitazioni efficaci  $P_e$  uguagliano l'eccedenza idrica W.

Nel caso in studio, ai fini della stima dell'infiltrazione efficace  $I_e$  relativa all'acquifero della Piana, dato necessario per le successive simulazioni modellistiche del flusso idrico sotterraneo sia a scala regionale che locale, si è proceduto nell'ambito dello studio:

- alla stima del temine eccedenza idrica W relativo al territorio in esame, sia ad una scala temporale mensile che ad una scala temporale annuale riferita all'anno medio sul periodo considerato, utilizzando la metodologia di calcolo del bilancio idrico proposta da Thornthwaite & Mather (1957), come meglio specificato al paragrafo 5.1.1;
- alla stima del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo del territorio in esame, utilizzando la metodologia di Celico (1988) modificata come specificato al paragrafo 5.1.2., con il quale stimare la frazione del deflusso totale o eccedenza idrica W, che si infiltra nel sottosuolo, cioè l'infiltrazione efficace I<sub>e</sub>.

In particolare la metodologia di Thornthwaite & Mather (1957) indicata al punto 1 è stata utilizzata per ottenere le serie temporali, rappresentate da valori medi mensili per ciascun anno del periodo

analizzato (2005-2017), dell'eccedenza idrica W relativa al territorio dell'acquifero in esame. Le serie temporali di W così ottenute, assieme alla mappa del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo indicato al punto 2, sono state utilizzate come dati di input nel modello idrogeologico integrato dell'acquifero, implementato con il codice di calcolo MIKE SHE, ai fini del calcolo della serie temporale delle mappe dell'infiltrazione efficace I<sub>e</sub> media mensile, pari alla ricarica meteorica dell'acquifero nel periodo 2005-2017 (cfr. paragrafo 7.4.5.2).

La metodologia di Thornthwaite & Mather (1957) di cui al punto 1 è stata altresì utilizzata, assieme alla metodologia di Celico (1988) modificata, indicata al punto 2, al fine di ottenere il dato di infiltrazione efficace annua media relativa al settore occidentale dell'acquifero, riferita all'intero periodo preso in esame (2005-2017), da utilizzare come dato di input per l'implementazione, con il codice di calcolo FEFLOW, del modello locale di flusso in regime permanente, relativo alla zona dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi (cfr. paragrafo 8.2).

#### 5.1.1 Calcolo dell'evapotraspirazione reale e dell'eccedenza idrica

Ai fini del calcolo dell'eccedenza idrica W relativo al territorio dell'acquifero della Piana è stato preliminarmente effettuato il calcolo dell'evapotraspirazione reale Etr.

Con il termine *evapotraspirazione reale* (Etr) si intende la quantità d'acqua realmente restituita all'atmosfera sotto forma di vapore, sia per evaporazione diretta che per traspirazione delle piante, in funzione delle reali disponibilità idriche del terreno.

La valutazione dell'evapotraspirazione reale è stata effettuata utilizzando la metodologia proposta da Thornthwaite & Mather (1957), molto utilizzata in ambito idrogeologico per via della sua affidabilità, riscontrata in un'ampia casistica di applicazioni, in svariati ambienti climatici, ivi comprese quelli delle zone temperate. L'utilizzo di tale metodologia per il calcolo di Etr si basa sul calcolo dell'evapotraspirazione potenziale media mensile (Epm), che rappresenta la quantità d'acqua che evaporerebbe nel caso in cui fosse costantemente disponibile in superficie una quantità sufficiente a sostenerla. Tale situazione si verifica quando lo strato di terreno interessato dallo sviluppo delle radici delle piante è caratterizzato dal massimo valore della quantità d'acqua di ritenzione, pari alla capacità di campo (U): in questo caso infatti il consumo reale di acqua per evapotraspirazione (Etr) si mantiene sui valori massimi pari all'evapotraspirazione (Etr) risulta ostacolato o impedito dalla carenza del rifornimento idrico (stagione secca), Etr risulta inferiore rispetto ai consumi potenziali (Etr < Ep).

Nella metodologia proposta da Thornthwaite & Mather (1957) il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale media mensile Epm, espressa in mm, si basa sulla seguente relazione sperimentale che lega Epm alla corrispondente temperatura media (Tm):

**Epm = K\*16\*(10\*Tm/I)**<sup>$$\beta$$</sup>

dove:

K = coefficiente che tiene conto delle ore di insolazione media mensile ed è funzione esclusiva della latitudine e del mese (in pratica, è il rapporto tra le ore diurne e la metà delle ore giornaliere);
I = indice termico annuale, pari alla sommatoria degli indici mensili (i) dei dodici mesi dell'anno ciascuno espresso da:

$$i = (Tm/5)^{1,514}$$

 $\beta$  = funzione cubica dell'indice termico annuale I data da:

$$\beta = 0,49239 + (1.792*10^{-5}*I) - (771*10^{-7}*I^2) + (675*10^{-9}*I^3)$$

Una volta calcolata Epm, la determinazione di Etr viene effettuata in modo indiretto, sulla base della quantità delle precipitazioni e delle caratteristiche di umidità del terreno, cioè del volume idrico immagazzinato nel terreno, che a sua volta dipende dalla capacità di campo (U) del suolo. Nel caso di studio, sulla base alle caratteristiche dei suoli presenti nell'area in esame e degli studi agronomici consultati, il valore della capacità di campo è stato posto pari a 50 mm.

Il calcolo dell'evapotraspirazione reale relativa al territorio dell'acquifero della Piana è stato effettuato su scala temporale mensile, per ciascuno degli anni del periodo considerato (2005-2017) e per ciascuna delle quattro stazioni selezionate per la caratterizzazione termo-pluviometrica recente di medio periodo del sistema indicate al paragrafo 3.3 (Mazara del Vallo, Castelvetrano, Diga Trinità, Santa Ninfa). Nel settore occidentale dell'acquifero l'evapotraspirazione reale è stata calcolata anche come valore annuo medio sull'intero periodo temporale preso in esame (2005-2017), sulla base dei dati della stazione termo-pluviometrica Mazara del Vallo ivi ricadente.

Una volta determinata l'evapotraspirazione reale Etr a scala mensile relativa al territorio della Piana, l'applicazione della metodologia proposta da Thornthwaite & Mather (1957) consente di determinare, sulla base di una procedura di calcolo del bilancio idrico del suolo, l'eccedenza idrica W, cioè il deflusso idrico totale uscente dall'unità di bilancio (deflusso superficiale D + infiltrazione efficace I<sub>e</sub>). Il calcolo dell'eccedenza idrica W su scala mensile così effettuato si basa sulla precipitazione utile (P-Etp) e sull'immagazzinamento dei volumi idrici nel suolo (riserve idriche invasate  $\Delta$ V).

L'eccedenza idrica W è stata calcolata, analogamente all'evapotraspirazione reale, oltre che su scala temporale mensile, anche su scala annua media sul periodo 2005-2017 e relativamente al settore occidentale dell'acquifero: essa, sulla base dell'equazione del bilancio riferita ad un periodo di tempo pari ad un ciclo idrologico, risulta pari alla Precipitazione efficace  $P_e$  (Pe = P - Etr). In definitiva quindi, l'applicazione della metodologia proposta da Thornthwaite & Mather (1957) ha

consentito di ottenere:

- a) le serie temporali dei valori mensili dell'evapotraspirazione reale Etr e dell'eccedenza idrica W, per ogni anno del periodo temporale 2005-2017 e per ognuna delle 4 stazioni termo-pluviometriche selezionate per la caratterizzazione termo-pluviometrica recente di medio periodo dell'acquifero della Piana (Mazara del Vallo, Castelvetrano, Diga Trinità, Santa Ninfa);
- b) il valore di evapotraspirazione reale e di eccedenza idrica annua media, riferita all'intero periodo in esame 2005-2017, relativo al settore occidentale dell'acquifero, per la sola stazione termo-pluviometrica di Mazara del Vallo, ivi ricadente.

I valori di evapotraspirazione reale Etr e di eccedenza idrica W calcolati in corrispondenza delle stazioni termo-pluviometriche sopra indicate, sono stati quindi attribuiti alle singole aree di influenza delle stesse, calcolate con il metodo dei poligoni di Thiessen, come illustrato al paragrafo 3.3.

Nella Tabella 5.1 si riportano i risultati ottenuti, in termini di serie temporale di eccedenza idrica mensile W calcolata per le 4 stazioni termo-pluviometriche sopra menzionate. Tali serie temporali sono state utilizzate come dati di input nel modello idrogeologico integrato della Piana, con il quale è stata calcolata la serie temporale delle mappe dell'Infiltrazione efficace  $I_e$  media mensile dell'acquifero riferita al periodo 2005-2017 (cfr. paragrafo 7.4.5.2).

Nella Tabella 5.2 si riportano i risultati ottenuti dall'applicazione della metodologia di Thornthwaite & Mather (1957) al settore occidentale dell'acquifero, con riferimento al calcolo dell'eccedenza idrica mensile media ed annua media relativa all'intero periodo 2005-2017 per la stazione Mazara del Vallo entro la cui area di influenza, calcolata con il metodo dei poligoni di Thiessen, ricade l'area del modello locale di flusso. Il valore annuo medio di eccedenza idrica riferito all'intero periodo 2005-2017 e relativo alla stazione Mazara del Vallo è stato utilizzato come dato di input per l'implementazione del modello di flusso locale relativo al settore occidentale dell'acquifero (cfr. paragrafo 8.2).

Tabella 5.1 - Serie temporale dei valori mensili di eccedenza idrica relativi al periodo 2005-2017 calcolati per le 4 stazioni tempo-pluviometriche Mazara del Vallo, Castelvetrano, Diga Trinità, Santa Ninfa (valori espressi in mm)

			Mazara de	el Vallo - Ec	cedenza Id	rica (mm)							
Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
G	70.07	95.12	0.00	0.00	151.12	108.20	66.62	53.51	95.01	34.56	63.48	20.14	186.57
F	69.04	24.97	45.73	8.19	28.95	60.19	105.95	57.60	61.83	17.28	161.81	9.16	38.93
M	1.53	0.00	102.39	50.66	29.83	34.26	16.75	0.00	80.61	63.10	55.35	53.56	0.00
A	54.34	0.00	16.31	0.00	17.81	0.00	0.00	0.00	0.00	36.96	0.00	0.00	0.00
e	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Δ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.00	0.00	0.00	0.00	29.04	31.80	0.00	13.20	0.00	0.00	44.84		0.00
N	53.89	0.00	99.47	0.00	1.51	15.31	0.00	11.70	18.60	0.00	29.00	15.75	0.00
D	68.00	26.32	55.49	44.68	75.17	12.45	42.98	43.32	35.44	0.00	0.00	0.00	0.00
Eccedenza idrica complessiva annua (mm)	316.88	146.41	319.39	103.53	333.43	262.22	232.30	179.33	291.49	151.90	354.48	98.61	225.50
	2005	2000	Castelve	etrano - Eco	edenza Idi	rica (mm)	2014	2012	2012	2014	2015	2016	2047
Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
с г	96.86	84.97	0.00	3.20	132.65	116.77	58.59	50.17	138.98	91.64	00.00	19.06	242.03
	94.42	35.88	30.66	3.93	51.86	88.21	70 30 T03'73	81.59	85.89	49.90	235.04	23.85	01.92
	9.14	0.00	19.57	53.70	50.35	0.00	28.38	0.00 2 2E	112.02	79.09	02.92	101.95	0.00
M	30.35	0.00	0.00	0.00	02.99	0.00	0.00	2.25	0.00	33.04 0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.00	0.00	0.00	0.00	36.11	16.55	0.00	27.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
N	6.83	0.00	37.93	0.00	4.20	0.00	0.00	22.12	28.04	12.35	69.87	66.76	0.00
D	73.71	29.86	75.54	52.50	93.46	6.01	34.21	34.23	73.24	65.57	34.59	9.39	14.50
Eccedenza idrica complessiva annua (mm)	311.51	151.71	223.70	113.33	434.62	282.54	231.11	218.05	438.77	332.19	468.43	220.98	318.45
	2005	2000	Trini	tà - Eccede	enza idrica	(mm)	2011	2012	2012	2014	2015	2010	2017
Bliancio Idrologico metodo di Thornthwalte annua	72 63	7/ 51	2007	2008	172 27	67.94	63.24	49.06	115 65	2014	66 52	18.91	2017
E	72.03	34.06	44.70	13 52	37 50	85 10	96 52	49.00	95.43	35.67	231 54	22.64	60.41
M	0.91	0.00	111 66	59.44	37.35	35.10	30.52	7.82	122 48	88.07	60 10	84.76	0.00
A	37.54	0.00	13.90	2.25	36.64	0.00	0.00	14.26	0.00	52.32	0.00	0.00	0.00
M	0.00	0.00	0.00	0.00	6.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
L		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Α	0.00	0.00	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00
A	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00
A S	0.00 0.00 0.00 38.92	0.00 0.00 0.00 15.73	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 34.22	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 7.74	0.00 0.00 0.00 1.63	0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 90.57	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
AS	0.00 0.00 0.00 38.92 56.54	0.00 0.00 0.00 15.73 8.24	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 74.64	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 7.74 2.44	0.00 0.00 0.00 1.63 65.99	0.00 0.00 0.00 0.00 61.57	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 32.51	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 31.05
AS	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06	0.00 0.00 0.00 15.73 8.24 121.79	0.00 0.00 0.00 0.00 74.64 55.49	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 71.34	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 7.74 2.44 75.38	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 24.57	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 31.05 0.00
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm)	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63	0.00 0.00 0.00 15.73 8.24 121.79 254.31	0.00 0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 300.40	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65	0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 24.57 287.31	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72	0.00 0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm)	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63	0.00 0.00 15.73 8.24 121.79 254.31	0.00 0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 300.40	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65	0.00 0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 24.57 287.31	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72	0.00 0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thorothwaita annua	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63	0.00 0.00 0.00 15.73 8.24 121.79 254.31	0.00 0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 300.40 Santa N 2007	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 denza idric 2000	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b>	0.00 0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 24.57 287.31	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72	0.00 0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63	0.00 0.00 0.00 15.73 8.24 121.79 254.31 2006 84.97	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 300.40 Santa N 2007 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 154.81	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 denza idric 2009 132.65	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b> 2010 116.77	0.00 0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105 92	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 80.96	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21	0.00 0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 2005 96.86 94.42	0.00 0.00 15.73 8.24 121.79 254.31 2006 84.97 36.88	0.00 0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 300.40 <u>Santa N</u> 2007 0.00 30.66	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 154.81	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 denza idric 2009 132.65 51.86	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 a (mm) 2010 116.77 88.21	0.00 0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80	0.00 0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37	0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 	0.00 0.00 15.73 8.24 121.79 254.31 2006 84.97 36.88 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 300.40 Santa N 2007 0.00 30.66 79.57	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 154.81 154.81 2008 3.20 3.93 53.70	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 430.04 denza idric 2009 132.65 51.86 50.35	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 a (mm) 2010 116.77 88.21 55.00	0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19	0.00 0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M A	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 2005 96.86 94.42 9.14 30.55	2.00 0.00 0.00 15.73 8.24 121.79 254.31 2006 84.97 36.88 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 30040 <b>Santa N</b> 2007 0.00 30.66 79.57 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 <b>linfa - Ecce</b> 2008 3.20 3.93 53.70 0.00	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 denza idric 2009 132.65 51.86 50.35 65.99	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 2010 116.77 88.21 55.00 0.00	0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38 0.00	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00 2.25	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01 62.99	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30 0.00	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00 0.00
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M A M	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 90.86 94.42 9.14 30.55 0.00	2:00 0.00 0.00 15.73 8:24 121.79 254.31 2006 84.97 36.88 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 30.40 <b>Santa N</b> 2007 0.00 30.66 79.57 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 <b>Iinfa - Ecce</b> 2008 3.20 3.93 53.70 0.00	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 430.04 430.04 430.04 430.04 50.35 51.86 50.35 65.99 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b> 2010 116.77 88.21 55.00 0.00 0.00	0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38 0.00 0.00	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00 2.25 0.00	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01 62.99 0.00	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00 0.00 0.00
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M A A G	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 90.86 94.42 9.14 30.55 0.00 0.00	2:00 0.00 0.00 15:73 8:24 121.79 254.31 2006 84.97 36:88 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 30 00 30.66 79.57 0.00 30.66 79.57 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 <b>Iinfa - Ecce</b> 2008 3.20 3.93 53.70 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 430.04 denza idric 2009 132.65 51.86 50.35 65.99 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b> 2010 116.77 88.21 55.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00 2.25 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01 62.99 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28 0.00 65.28 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00 0.00 0.00
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M A M G L	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 90.86 94.42 9.14 30.55 0.00 0.00 0.00	2:00 0.00 0.00 15:73 8:24 121.79 254.31 2006 84.97 36:88 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 30.40 30.40 30.66 79.57 0.00 30.66 79.57 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 <b>Iinfa - Ecce</b> 2008 3.20 3.93 53.70 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 430.04 430.04 430.04 50.35 51.86 50.35 51.86 50.35 65.99 0.00 0.000	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b> 2010 116.77 88.21 55.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00 2.25 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01 62.99 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28 0.00 65.28 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M A M G L A	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 96.86 94.42 9.14 30.55 0.00 0.00 0.00	2:00 0:00 0:00 0:00 15:73 8:24 121.79 254.31 2006 84.97 36:88 0:00 0:00 0:00 0:00 0:00 0:00 0:00	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 30 00 2007 0.00 30.66 79.57 0.00 30.66 79.57 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 100 100 3.20 3.20 3.20 3.20 3.20 0.00 0.00 0.	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 430.04 430.04 430.04 50.35 51.86 50.35 51.86 50.35 65.99 0.00 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b> 2010 116.77 88.21 55.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00 2.25 0.00 0.00 0.00 0.000	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01 62.99 0.00 0.00 0.000	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28 0.00 65.28 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
A S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M A M G L A S	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 96.86 94.42 9.14 30.55 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	2:00 0.00 0.00 15:73 8:24 121.79 254.31 2006 84.97 36:88 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 30.40 <b>Santa N</b> 2007 0.00 30.66 79.57 0.00 30.66 79.57 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 100 2008 3.20 3.20 3.20 3.93 53.70 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.000	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 430.04 430.04 400.00 132.65 51.86 50.35 51.86 50.35 65.99 0.00 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b> 2010 116.77 88.21 55.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.000	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00 2.25 0.00 2.25 0.00 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19 0.00 0.00 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01 62.99 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28 0.00 65.28 0.00 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
A S S O N Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M A M G L A S O	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 96.86 94.42 9.14 30.55 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	2:00 0.00 0.00 15:73 8:24 121.79 254.31 2006 84.97 36:88 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 30.40 <b>Santa N</b> 2007 0.00 30.66 79.57 0.00 30.66 79.57 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 100 2008 3.20 3.93 53.70 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 40.04 40.04 40.04 50.35 51.86 50.35 51.86 50.35 65.99 0.00 0.00 0.000 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b> 2010 116.77 88.21 55.00 0.	0.00 0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.000	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00 2.25 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0	0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01 62.99 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28 0.00 65.28 0.00 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30 0.00	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0
A S S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M A M G L A S O N	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 96.86 94.42 9.14 30.55 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.0	2:00 0:00 0:00 0:00 15:73 8:24 121.79 254.31 2006 84.97 36:88 0:00	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 30.40 30.40 30.66 79.57 0.00 30.66 79.57 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 100 2008 3.20 3.93 53.70 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 40.04 40.04 40.04 40.04 40.04 40.04 40.04 40.05 51.86 50.35 51.86 50.35 65.99 0.00 0.	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b> 2010 116.77 88.21 55.00 0.	0.00 0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00 2.25 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0	0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01 62.99 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28 0.00 65.28 0.00 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30 0.00	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0
A S S O N D Eccedenza idrica complessiva annua (mm) Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite annua G F M A M G L A S O N D D	0.00 0.00 38.92 56.54 87.06 370.63 96.86 94.42 9.14 30.55 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.0	2.000 0.000 15.733 8.24 121.79 254.31 2006 84.97 36.88 0.00 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 74.64 55.49 30.40 30.40 30.66 79.57 0.00 30.66 79.57 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0	0.00 0.00 0.00 0.00 71.34 154.81 100 2008 3.20 3.93 53.70 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 34.22 3.09 100.04 4 4 4 4 4 2009 132.65 51.86 50.35 51.86 50.35 65.99 0.00 0.00 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 188.65 <b>a (mm)</b> 2010 116.77 88.21 55.00 0.	0.00 0.00 0.00 7.74 2.44 75.38 275.76 2011 58.59 109.93 28.38 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 1.63 65.99 36.69 266.65 2012 50.17 81.59 0.00 2.25 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 61.57 39.46 434.59 2013 131.91 88.80 105.19 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0	0.00 0.00 0.00 24.57 287.31 2014 105.93 48.37 117.01 62.99 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 90.57 39.44 0.00 488.19 2015 89.96 269.70 65.28 0.00 0.00 0.00 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000	0.00 0.00 0.00 0.00 32.51 0.00 158.72 2016 21.21 31.80 120.30 0.00	0.00 0.00 0.00 31.05 0.00 342.65 2017 41.45 66.59 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0

Tabella 5.2 – Calcolo secondo la metodologia Thornthwaite & Mather (1957) dell'eccedenza idrica W (I+R) mensile media ed annua media relativa all'intero periodo 2005-2017 per la stazione Mazara del Vallo (valori espressi in mm)

						MAZARA	DEL VALLO	16					· · · · · ·
Bilancio idrologico metodo di Thornthwaite (2005/2017)	St	Stagione umida			stagione secca						stagione umida		
Mesi	G	F	M	A	M	G	L	Α	s	0	N	D	anno
Tmedie	10,66	10,36	12,34	15,22	18,53	22,31	25,27	25,69	22,57	19,44	15,46	11,87	17,48
indice calorico (i)	3,12	2,99	3,91	5,38	7,25	9,62	11,57	11,85	9,75	7,79	5,49	3,67	82,39
K (coefficiente di latitudine)	0,86	0,84	1,03	1,10	1,22	1,23	1,25	1,17	1,03	0,97	0,85	0,83	
β (funzione cubica dell'indice calorico)	1,82												
ETP nc	25,60	24,31	33,40	48,97	70,04	98,24	123,31	127,04	100,34	76,44	50,36	31,13	
ETP corr	22,02	20,42	34,41	53,86	85,44	120,83	154,13	148,64	103,35	74,15	42,81	25,84	885,89
P	96,52	74,32	65,89	44,98	15,54	6,09	2,18	5,74	53,78	84,54	67,58	66,22	583,40
coeff. Umidità	3,38	2,64	0,92	-0,16	-0,82	-0,95	-0,99	-0,96	-0,48	0,14	0,58	1,56	
ETR mm	22,02	20,42	34,41	53,86	56,66	6,09	2,18	5,74	53,78	74,15	42,81	25,84	397,96
W (I+R) (pioggia efficace)	74,51	53,91	31,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,55	185,45
dR U=50mm	50,00	50,00	50,00	41,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,39	10,39	50,77	583,41

Legenda: Tmedie = temperature mensili medie;  $i = indice mensile del calore; k = coefficiente di latitudine; <math>\beta = funzione$  cubica dell'indice calorico; ETPnc = evapotraspirazione potenziale non corretta; ETPcorr = evapotraspirazione potenziale corretta; P = precipitazioni mensili medie; coeff. Umidità = (P-ETP)/ETP; ETR = evapotraspirazione reale, W(I+R) = eccedenza idrica o precipitazione efficace Pe; dR = riserve idriche immagazzinate nel suolo.

#### 5.1.2 Valutazione del coefficiente di infiltrazione potenziale

Come anticipato al paragrafo 5.1, al fine di completare l'elaborazione dei dati funzionali al calcolo della ricarica meteorica dell'acquifero, pari all'infiltrazione efficace  $I_e$ , si è proceduto alla valutazione del coefficiente di infiltrazione potenziale *c.i.p.* (Celico, 1988) del territorio della Piana. Secondo la metodologia di Celico (1988), infatti, data la relazione

$$Ie = W - D$$

con W = eccedenza idrica e D = deflusso superficiale (o ruscellamento),

e nota l'eccedenza idrica W (o deflusso idrico totale) del bacino, è possibile stimare l'infiltrazione efficace  $I_e$ , cioè la quantità di acqua che si rende effettivamente disponibile per la ricarica dell'acquifero, per mezzo di un coefficiente (*c.i.p.*), valutato soprattutto in base alle caratteristiche di permeabilità dei complessi idrogeologici affioranti (Tabella 5.3), che rappresenta la frazione dell'eccedenza idrica destinata all'infiltrazione efficace:

$$c.i.p. = \frac{I_{\rm e}}{W}$$

complessi idrogeologici	c.i.p. % D	complessi idrogeologici	с.і.р. % D
calcari	90-100	lave	90-100
calcari dolomitici	70-90	depositi piroclastici	50-70
dolomie	50-70	piroclastiti e lave	70-90
calcari marnosi	30-50	rocce intrusive	15-35
detriti grossolani	80-90	rocce metamorfiche	5-20
depositi alluvionali	80-100	sabbie	80-90
depositi argilloso-marnoso-aren.	5-25	sabbie argillose	30-50

Tabella 5.3 - Classi di coefficienti di infiltrazione potenziale per tipologia di complesso idrogeologico (Celico, 1988)

Il coefficiente di infiltrazione potenziale di un bacino dipende principalmente dalla permeabilità dei terreni in affioramento (che a sua volta è funzione delle caratteristiche litologiche e del grado di fratturazione delle rocce), ma anche da altri fattori, tra i quali i principali sono la pendenza della superficie topografica e la tipologia di uso e copertura del suolo, che influenzano la ripartizione del deflusso idrico totale in ruscellamento superficiale ed infiltrazione.

Pertanto, per la valutazione della distribuzione del coefficiente di infiltrazione potenziale del territorio oggetto di studio, è stata utilizzata la metodologia di Celico (1988), facendo riferimento ai valori dallo stesso indicati per la stima del *c.i.p.* in base ai complessi idrogeologici affioranti (Tabella 5.3), modificandola con l'introduzione di un coefficiente riduttivo dell'infiltrazione (compreso tra 0 e 1) che tiene conto dei fattori di pendenza ed uso del suolo ( $C_{p/us}$ ).

La suddetta metodologia modificata, adottata dall'Autorità di Bacino del fiume Arno per la stima a scala regionale dell'infiltrazione efficace del bacino (AdB Arno, 2008) ed utilizzata anche nel PdG del Distretto Idrografico della Sicilia 2015-2021 (Regione Siciliana, 2016) per la stima dell'I<sub>e</sub> nell'ambito della valutazione del bilancio idrologico dei corpi idrici sotterranei, prevede il calcolo dell'infiltrazione efficace sulla base della seguente espressione:

$$I_e = W * c.i.p.*C_{p/us} = W * CIP_{tot}$$
$$CIP_{tot} = c.i.p.*C_{p/us}$$

dove CIP<sub>tot</sub> è il coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo dell'area in esame.

con

Sono state quindi elaborate, tramite applicativo GIS, le mappe di distribuzione areale, relative al territorio dell'acquifero della Piana, del coefficiente di infiltrazione potenziale *c.i.p.* (dipendente dal fattore geolitologico) e del coefficiente  $C_{p/us}$  (dipendente dal fattore pendenza ed uso del suolo).

La mappa di distribuzione areale del *c.i.p.* è stata elaborata a partire dalla Carta Geolitologica ed Idrogeologica in scala 1:50.000 del Piano Territoriale Paesaggistico – Ambiti Regionali 2 e 3 ricadenti nella provincia di Trapani (La Rosa A., De Domenico R., 2006), assegnando alle unità geolitologiche ivi cartografate i *c.i.p.* stimati in base ai valori riportati in Tabella 5.3, tenendo conto:

- delle caratteristiche granulometriche e di permeabilità dei litotipi riportate nella suddetta carta 1:50.000,
- delle caratteristiche litologiche riportate in studi geologici pregressi effettuati sull'area e nelle descrizioni delle formazioni litostratigrafiche affioranti nella Piana,
- delle caratteristiche litologiche dei terreni in superficie desunte dai dati stratigrafici raccolti appositamente per il presente studio.

In Figura 5.1 è riportata la carta del coefficiente di infiltrazione potenziale dipendente dal fattore geolitologico (c.i.p) del sistema idrogeologico della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara.



Figura 5.1 - Carta del coefficiente di infiltrazione potenziale dipendente dal fattore geolitologico (c.i.p)

La mappa di distribuzione areale del coefficiente  $C_{p/us}$  è stata ottenuta a partire dalla carta delle pendenze e dalla carta dell'uso del suolo. classificando preliminarmente i valori in funzione della loro influenza sull'infiltrazione.

La carta delle pendenze è stata ottenuta tramite strumenti di analisi spaziale GIS a partire dal modello digitale del terreno a passo 20 m (Figura 5.2). Per quanto riguarda la carta dell'uso del

suolo, è stata utilizzata la carta della copertura del territorio Corine Land Cover 2012 in scala 1:100.000 (Figura 5.3).



Figura 5.2 - Carta delle pendenze



Figura 5.3 - Carta dell'uso del suolo

I valori di pendenza e le categorie d'uso del suolo riportati rispettivamente nelle suddette carte sono stati successivamente raggruppati in differenti classi, distinte in funzione della loro capacità di favorire o meno l'infiltrazione, e gli strati informativi così ottenuti sono stati incrociati tramite procedure di overlay topologico in ambiente GIS. E' stata quindi elaborata la carta del coefficiente  $C_{p/us}$  del territorio della Piana, assegnando alle combinazioni "classi di pendenza"/"classi di uso del suolo" i valori del coefficiente  $C_{p/us}$  derivanti dalla matrice riportata in Tabella 5.4. I valori del coefficiente corrispondenti a ciascuna combinazione "classi di pendenza"/"classi di uso del suolo" sono quelli individuati dal PdG 2015-2021 del Distretto Idrografico della Sicilia per combinazioni simili, ed applicati al territorio regionale per la valutazione del bilancio idrologico dei corpi idrici sotterranei.

Classi di tipologia d'uso suolo Classi di pendenza	Aree urbanizzate e zone umide	Prati e pascoli	Aree coltivate e spiagge	Macchia e garighe	Zone boscate	Aree estrattive
0-2 %	0.5	0.8	0.95	0.85	0.95	1
2-10 %	0.5	0.75	0.85	0.8	0.85	1
10-20 %	0.5	0.7	0.75	0.75	0.75	0.85
>20 %	0.5	0.5	0.65	0.65	0.7	0.85

Tabella 5.4 - Matrice di valutazione del coefficiente  $C_{p/us}$ 

Le classi di tipologia d'uso del suolo riportate in Tabella 5.4 derivano dall'accorpamento, all'interno del territorio della Piana, delle categorie d'uso CLC 2012 che, in base alla specifica tipologia di copertura, vegetale o meno, od alle pratiche colturali effettuate nelle zone agricole, sono caratterizzate da una capacità simile di influenzare l'infiltrazione. Per il raggruppamento delle categorie d'uso del suolo presenti nella Piana ai fini del calcolo del  $C_{p/us}$ , si è fatto riferimento alla schematizzazione operata dall'AdB del fiume Arno, tenendo conto delle diverse combinazioni "classi di pendenza"/ "classi di uso del suolo" individuate dal PdG del Distretto Idrografico della Sicilia 2015-2021, ed adattandola alla realtà locale del sistema della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara. Tali categorie d'uso del suolo sono riportate in Tabella 5.5.

Raggruppamenti di categorie d'uso del suolo	Codice CLC2012	Descrizione CLC2012
	111	Tessuto urbano continuo
	112	Tessuto urbano discontinuo
Aree urbanizzate e zone umide	121	Aree industriali o commerciali
	124	Aeroporti
	411	Paludi interne
Prati e pascoli	142	Aree sportive e ricreative
	2111	Colture Intensive
	221	Vigneti
	222	Frutteti e frutteti minori
	223	Oliveti
Aree coltivate e zone aperte con	241	Colture annuali associate a colture
vegetazione rada	241	permanenti
	242	Sistemi colturali e particellari complessi
	243	Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti
	331	Spiagge, dune, sabbie e alvei ghiaiosi
Macchia e garighe	3232	Macchia bassa e garighe
Zono hossoto	3117	Boschi e piantagioni a prevalenza di latifoglie non native
	3121	Boschi a prevalenza di pini meditterranei e cipressete
Aree estrattive	131	Aree estrattive

Tabella 5.5 - Categorie d'uso del suolo presenti nel territorio della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara e relativi raggruppamenti ai fini del calcolo del coefficiente Cp/us

In Figura 5.4 è riportata la carta del coefficiente dipendente dal fattore pendenza ed uso del suolo  $(C_{p/us})$  del territorio della Piana.

Al fine di fornire in input al modello numerico integrato del sistema della Piana la mappa di distribuzione areale del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo dell'acquifero, con il quale calcolare l'infiltrazione efficace nel periodo 2005-2017, è stata quindi elaborata la carta del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo ( $CIP_{tot}$ ), che tiene conto sia del fattore geolitologico, che del fattore pendenza/uso suolo. Tale carta è stata ottenuta attraverso overlay topologico degli strati informativi relativi ai coefficienti *c.i.p.* e  $C_{p/us}$  della Piana e tenendo conto della relazione

$$CIP_{tot} = c.i.p.*C_{p/us}$$

In Figura 5.5 è riportata la carta del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo dell'acquifero della Piana ( $CIP_{tot}$ ).



Figura 5.4 - Carta del coefficiente dipendente dal fattore pendenza ed uso del suolo ( $C_{p/us}$ )



Figura 5.5 Carta del coefficiente d'infiltrazione potenziale complessivo (CIP<sub>tot</sub>)

#### 5.2 Acquisizione dei dati sui prelievi idrici da pozzi

La valutazione dei prelievi dall'acquifero ha costituito una fase determinante quanto critica nel processo di acquisizione dati funzionale al calcolo del bilancio idrico del sistema idrogeologico. La valutazione dei prelievi di acque sotterranee ha rappresentato infatti uno degli elementi maggiormente problematici, soprattutto in relazione alla tipologia e consistenza dei dati, per i quali non è disponibile nell'area in esame un archivio unico ed aggiornato di dati informatizzati e georeferenziati relativi agli emungimenti in atto nell'acquifero. Per tale ragione è stata effettuata una preliminare ricognizione presso gli uffici del Dipartimento Regionale Acque e Rifiuti, del Genio Civile di Trapani e dei Comuni di Castelvetrano, Campobello di Mazara, Mazara del Vallo e Partanna, dei dati relativi ai prelievi idrici da pozzi che insistono sull'acquifero.

Dalla ricognizione effettuata è emerso che i prelievi attivi nell'acquifero della Piana sono principalmente:

- Prelievi per uso idropotabile;
- Prelievi per usi irrigui.

Mentre per i primi il livello di conoscenza può considerarsi abbastanza buono, visto il numero limitato e comunque accertato di pozzi di emungimento di cui sono noti i dati identificativi, costruttivi e gestionali, per i secondi il livello di incertezza è notevolmente maggiore, a causa dell'elevato numero delle utenze irrigue di cui sono incerti o mancanti alcuni dati anagrafici (ubicazione, profondità dei pozzi, profondità dei tratti filtranti) e di utilizzo e produttività degli stessi (volumi idrici effettivamente prelevati e periodi di emungimento), oltre che a causa della presenza di pozzi abusivi sul territorio.

#### 5.2.1 Prelievi idropotabili

L'acquisizione dei dati sui prelievi di acque sotterranee per uso potabile ha comportato una ricognizione preliminare presso i rispettivi enti gestori delle risorse idriche ricadenti nell'area. In particolare gli enti interessati dalla ricerca sono stati il Comune di Trapani, gestore dei pozzi Bresciana ricadenti nel territorio di Campobello di Mazara, nonchè i Comuni di Castelvetrano, Campobello di Mazara, Mazara del Vallo e Partanna e la società Siciliacque, gestori di altre risorse idriche presenti nell'area di interesse. La Figura 5.6 mostra l'ubicazione dei pozzi in emungimento per uso idropotabile che interessano l'acquifero della Piana, mentre la Tabella 5.6 riporta le caratteristiche di tali pozzi.



Figura 5.6 - Ubicazione dei pozzi in emungimento per uso idropotabile che interessano l'acquifero della Piana

Tabella 5.6 - Caratteristiche dei pozzi in emungimento per uso idropotabile che interessano l'acquifero della Piana

		PRELIEVU	DROPOTABILIAG	GIOBNATI - PE	GA			
Ubicazione risorsa	Gestore	Acquedotto	Denominazione	Località	Q Vs	volumi annui (mc)	Prof. (m)	diametro perforazione mm
Campobello di Mazara	Campobello di Mazara	Campobello di Mazara	Gorga	Gorga	18	567648	110	270
Campobello di Mazara	Campobello di Mazara	Campobello di Mazara	bosco tre fontane	Tre fontane	18	567648	70	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	la cascia D	staglio	15	409968	180	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	clemente A	staglio	8	252288	135	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	agate B	staglio	13	409968	170	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	ingrasciotta 3	staglio	15	504576	170	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	ingrasciotta 2	staglio	9	283824	170	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	ingrasciotta 1	staglio	9	283824	190	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	ottoveggio E	staglio	18	567648	170	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	ciancimino F	staglio	6	189216	135	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	clemente B	staglio	0	0	135	270
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	contrada stella	mc donald	8	323536	120	300
Castelvetrano	Castelvetrano	Castelvetrano	TB11/A	bresciana	8	323536	200	400
Mazara del Vallo	Mazara del Vallo	Mazara del Vallo	s. nicola 1	S. Nicola	15	473000	46	800
Mazara del Vallo	Mazara del Vallo	Mazara del Vallo	s nicola 2	S. Nicola	15	43000	35	800
Partanna	ex EAS	Partanna	magaggiari 3	Magaggiari	0	0	120	300
Partanna	ex EAS	Partanna	magaggiari 4	Magaggiari	0	0	140	300
Partanna	ex EAS	Partanna	magaggiari 1	Magaggiari	0	0	140	300
Partanna	ex EAS	Partanna	magaggiari 2	Magaggiari	0	0	120	300
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/2A	bresciana	15	473040	130	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/2B	bresciana	15	473040	150	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/2C	bresciana	15	473040	130	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/7	bresciana	10	315360	150	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/8A	bresciana	10	315360	171	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/8B	bresciana	15	473040	184	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/6	bresciana	16	504576	156	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/5	bresciana	8	252288	156	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/4	bresciana	15	473040	130	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/12A	bresciana	15	473040	200	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/12B	bresciana	15	473040	200	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/11B	bresciana	15	473040	200	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/10A	bresciana	15	473040	149	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/10B	bresciana	15	473040	200	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/13A	bresciana	15	473040	200	400
Campobello di Mazara	Comune di Trapani	Trapani	TR/13B	bresciana	20	630720	200	400
Castelvetrano		Siciliacque	Staglio 11	Staglio	6.43	202751,61	130	400
Castelvetrano	0.00	Siciliacque	Staglio 12	Staglio	11.58	365282,58	130	400
Castelvetrano	Castervetrano,	Siciliacque	Staglio10	Staglio	12,78	402924.68	130	400
Castelvetrano	Hananna, Campobello	Siciliacque	Staglio 9	Staglio	10,35	326368,87	130	400
Castelvetrano		Siciliacque	Staglio 7, 8	Staglio	10,18	320893,87	130	400

# 5.2.2 Prelievi irrigui

L'area in studio risulta avere una forte vocazione agricola. Principalmente sono praticate colture ad uliveto e vigneto, seguite da agrumeti e coltivazioni ad ortaggi e frutta. Tale connotazione agricola ha di fatto determinato la proliferazione negli anni di numerosi pozzi di emungimento per uso irriguo di varia tipologia e profondità.

L'acquisizione dei dati relativi ai prelievi per uso irriguo in atto nell'acquifero della Piana ha comportato una ricognizione preliminare, presso gli uffici del Dipartimento Regionale Acque e Rifiuti e del Genio Civile di Trapani, degli archivi relativi alle concessioni idriche da pozzi rilasciate nel territorio della Piana.

In particolare presso il Dipartimento Regionale Acque e Rifiuti è stata acquisita copia dei seguenti archivi informatici:

- database "GIS Gras" (GIS per la Gestione del Regime delle Acque Sotterranee), contenente i dati anagrafici delle pratiche di concessione idrica da pozzo rilasciate sul territorio regionale. Tale database, consultato per la parte riguardante le pratiche di competenza territoriale del Genio Civile di Trapani, seppur molto utile per i dati ivi contenuti, risulta avere numerosi vuoti in termini di caratteristiche costruttive dei pozzi, di volumi idrici concessi, nonché in alcuni casi di georeferenziazione dei punti di prelievo;
- 2) fogli di calcolo contenenti gli aggiornamenti relativi ad alcune pratiche di concessione idrica ed il catasto utenze aggiornato al 2011.

Presso il Genio Civile di Trapani sono stati acquisti i dati relativi agli aggiornamenti disponibili sulle concessioni irrigue vigenti.

In Figura 5.7 è riportata l'ubicazione dei pozzi ad uso irriguo che risultano attivi sull'acquifero della Piana, sulla base degli elenchi parzialmente aggiornati delle concessioni idriche rilasciate per uso irriguo dall'Amministrazione Regionale, messi a disposizione dagli uffici competenti.



Figura 5.7 - Ubicazione dei pozzi in emungimento per uso irriguo che interessano l'acquifero della Piana

L'analisi delle banche dati consultate ha messo in evidenza che non tutte le pratiche di concessione idrica estratte dall'archivio principale "GIS Grass" risultano attive: alcune infatti risultano scadute e non rinnovate, altre ancora hanno subito modifiche, quali ad esempio quelle avvenute in seguito all'avvio, da parte dei consorzi di bonifica Trapani 1 e Agrigento 3, dell'erogazione ai comprensori irrigui ricadenti nel territorio della Piana di volumi idrici prelevati dagli invasi Trinità e Garcia. A tale riguardo una parte dei prelievi irrigui effettuati nell'acquifero è cessata, a partire in particolare dal 2005, a seguito della distribuzione ai comprensori irrigui della Piana delle acque provenienti dalla diga Garcia. E' stato infine osservato che, a seguito della istituzione con D.A. ARTA del 1998 della Riserva Naturale Integrale regionale "Lago Preola e Gorghi Tondi", ed in particolare a partire dal 1999, numerosi pozzi irrigui ricadenti all'interno dell'area della Riserva, precedentemente attivi, hanno cessato di effettuare prelievi idrici dall'acquifero.

I dati relativi ai pozzi irrigui, ed ai relativi volumi annui prelevati dall'acquifero, estratti dall'archivio delle concessioni idriche contenuto nel database "GIS Grass", sono stati pertanto filtrati, tenendo conto delle modifiche nel frattempo intervenute sul territorio e sulla base dell'aggiornamento dei dati di concessione messi a disposizione dall'Amministrazione Regionale.

La Figura 5.8 riporta l'ubicazione complessiva sul territorio dell'acquifero della Piana dei pozzi di emungimento per uso idropotabile e di quelli per uso irriguo selezionati sulla base dei criteri sopra esposti.



Figura 5.8 - Ubicazione dei pozzi in emungimento per uso irriguo ed idropotabile che interessano l'acquifero della Piana

# 5.3 Acquisizione dei dati sugli apporti irrigui

L'area in esame è servita dal Consorzio di bonifica Trapani 1 e dal Consorzio di bonifica Agrigento 3, oggi confluiti nel Consorzio Sicilia occidentale. I due consorzi distribuiscono ai relativi comprensori irrigui le acque prelevate dall'invaso Trinità (consorzio TP1) e dall'invaso Garcia (consorzi TP1 e AG3). In Tabella 5.7 si riportano i volumi concessi nel triennio 2015-2017 dall'Amministrazione Regionale ai due Consorzi di bonifica.

	Volumi concessi nel	Volumi concessi nel	Volumi concessi nel
	v orunn concessi nei	Volumi concessi nei	v olulini concessi nei
	2017 (Mm <sup>3</sup> )	2016 (Mm <sup>3</sup> )	2015 (Mm <sup>3</sup> )
Consorzio TP1			
(invaso Trinità)	5.5	5.5	5.5
Consorzio TP1	2.5	_	
(invaso Garcia)	3.7	5	6
Consorzio AG3	12	12	12
(Invaso Garcia)	12	12	12

Tabella 5.7 - Volumi di acqua assegnati dalla Regione ai consorzi di bonifica

In Figura 5.9 è riportata l'ubicazione delle aree irrigue servite dai consorzi TP1 e AG3 rispetto alla perimetrazione dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara.



Figura 5.9 - Aree irrigue servite dai consorzi TP1 (aree in blu) e AG3 (aree in verde). In rosso è segnata la perimetrazione dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara.

## 6 Acquisizione ed elaborazione dei dati funzionali alla valutazione delle interazioni tra il corpo idrico sotterraneo ed i corpi idrici superficiali Murana, Preola e Gorghi Tondi

## 6.1 Esecuzione di misure mensili del livello idrico e dei parametri chimico-fisici dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi

Al fine di valutare, attraverso strumenti di simulazione modellistica dei processi di flusso, la dinamica di interazione tra il corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara ed i corpi idrici superficiali connessi costituiti dai laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, è risultato necessario, in assenza di sistemi di monitoraggio del livello idrometrico installati in corrispondenza di detti laghi, predisporre ed installare delle aste per la lettura periodica del loro livello idrico.

Sono state pertanto preparate 5 aste in acciaio a sezione circolare del diametro di 2,5 cm, una per ciascuno dei laghi, che sono state infisse con sistemi a percussione nel substrato consolidato al di

sotto del fondo dei laghi, garantendo durante la posa in opera un sufficiente approfondimento delle stesse al di sotto del fondale. L'installazione è stata effettuata in prossimità del bordo dei laghi, adottando i seguenti criteri per la scelta del sito idoneo al posizionamento dell'asta:

- 1) Facilità di accesso per le misure dei livelli durante tutto l'anno;
- 2) Posizione tale da garantire sempre un certo franco d'acqua sull'asta;
- Condizioni del fondale idonee a consentire l'infissione in profondità dell'asta nel substrato consolidato in modo da garantire la stabilità del suo posizionamento nel tempo;
- 4) Posizione idonea a limitare il più possibile eventuali manomissioni, furti o danneggiamenti.

In Figura 6.1 è illustrata l'ubicazione dei punti di installazione delle aste di misura dei 5 laghi, mentre in Figura 6.2 è riportato un esempio del posizionamento delle aste all'interno dei laghi.



Figura 6.1 - Ubicazione delle aste di misura dei livelli idrici nei laghi (da nord a sud: Lago Murana, Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio, Gorgo Basso)



Figura 6.2 – Esempio del posizionamento delle aste di misura dei livelli idrici dei laghi

L'installazione delle aste è stata eseguita nel giugno 2017 alla presenza del personale del WWF, Ente gestore della Riserva Naturale Integrale regionale "Lago Preola e Gorghi Tondi", ed in pari data sono iniziate le misure dei livelli idrici, ripetute successivamente con frequenza mensile fino al mese di gennaio 2018, contestualmente alla misura sul campo, con sonda multiparametrica, dei parametri conducibilità elettrica, pH e temperatura delle acque dei laghi.

Per il riferimento altimetrico delle misure periodiche dei livelli idrici dei laghi è stata utilizzata la sommità delle aste, il cui posizionamento assoluto plano-altimetrico nel sistema di riferimento cartografico WGS84 UTM33N con quote riferite al livello medio del mare, è stato effettuato nell'ambito delle attività di rilievo topo-batimetrico dei laghi, effettuate per conto di ARPA Sicilia dalla Biosurvey S.r.l. con sistema di posizionamento DGPS RTK (cfr. paragrafo 6.2 ed Appendice A).

In Tabella 6.1 sono riportati i risultati delle misure mensili effettuate nei cinque laghi del livello idrico e dei parametri conducibilità elettrica, temperatura e pH delle acque, nel periodo compreso tra giugno 2017 e gennaio 2018. In Figura 6.3 è riportato in forma grafica l'andamento temporale del livello idrico dei laghi riscontrato nel suddetto periodo.

		MURAN	NA		PREOLA			GORGO ALTO			GORGO MEDIO				GORGO BASSO					
Data misura	Livello idrico (m slm)	Conduci bilità (µS/cm)	Tempe ratura (°C)	pН	Livello idrico (m slm)	Conduci bilità (µS/cm)	Tempe ratura (°C)	рН	Livello idrico (m slm)	Conduci bilità (µS/cm)	Tempe ratura (°C)	рН	Livello idrico (m slm)	Conduci bilità (µS/cm)	Tempe ratura (°C)	рН	Livello idrico (m slm)	Conduci bilità (µS/cm)	Tempe ratura (°C)	pH
08/06/17	1.231	2500	26.3		0.76	3320	27.4		0.54	4010	27.4		0.52	3220	27.3		0.50	4660	27.3	
27/07/17	0.987				0.56				0.28				0.33				0.25			
22/08/17	0.878	3600	27.3		0.45	4420	28.1		0.16	4350	29.3		0.23	3360	29.0		0.12	5090	29.0	
21/09/17	0.872	3260	19.8	8.7	0.40	4690	21.7	8.7	0.14	4310	24.7		0.24	3300	24.3		0.12	5000	24.8	8.9
27/10/17	0.867	3674	15.8	7.0	0.44	4608	17.9	7.0	0.24	4280	20.8	7.0	0.33	3308	20.5	7.3	0.24	4905	20.0	7.6
27/11/17	0.965	3067	13.6	7.8	0.56	4174	14.3	7.8	0.39	4190	16.2	7.0	0.43	3243	15.6	7.5	0.40	4771	15.3	7.5
27/12/17	1.007	2824	11.3	7.8	0.62	3880	11.5	7.9	0.46	4049	11.7	8.1	0.47	3152	12.0	7.6	0.45	4598	11.5	7.9
31/01/18	1.04	2849	11.8		0.66	3852	13.1		0.51	4116	13.3		0.50	3201	13.5		0.49	4718	13.4	

Tabella 6.1 – Risultati delle misure dei livelli idrici e dei parametri chimico-fisici delle acque dei laghi



Figura 6.3 - Andamento temporale del livello idrico dei laghi nel periodo giugno 2017 – gennaio 2018

# 6.2 Esecuzione di una campagna di rilievo topo-batimetrico dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi

Ai fini dell'implementazione del modello locale di flusso e trasporto dei contaminanti in falda nella zona dei laghi, è stato necessario, data l'assenza di dati di caratterizzazione batimetrica dei loro fondali, procedere all'effettuazione di una campagna di rilievi topo-batimetrici dei laghi, con il seguente obiettivo principale:

 ottenere la restituzione dei modelli digitali dei fondali dei cinque laghi e di un modello digitale topo-batimetrico integrato del settore occidentale della Piana, ottenuto dall'integrazione dei modelli dei fondali lacustri rilevati, con il DTM a risoluzione 2m x 2m fornito dal Dipartimento Regionale Urbanistica della Regione Siciliana. Il suddetto modello digitale integrato costituisce infatti uno dei dati di input necessario all'implementazione, con il codice di calcolo FEFLOW, del modello locale di flusso e trasporto (cfr. capitolo 8).

La campagna di rilievi ha avuto altresì l'obiettivo di:

- effettuare il rilievo plano-altimetrico della sommità delle aste di misura dei livelli idrici dei laghi, utilizzate come riferimento altimetrico per le misure periodiche dei livelli;
- consentire al personale ARPA di effettuare, durante la navigazione con il mezzo nautico utilizzato per il rilievo batimetrico, il prelievo di campioni dalla colonna d'acqua dei laghi, per le successive determinazioni analitiche di laboratorio.

Le attività di rilievo, iniziate in data 27/12/2017 e conclusesi in data 17/01/2018, sono consistite in una campagna di rilievi topo-batimetrici dei fondali dei laghi Murana, Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio eGorgo Basso, con sistema accoppiato costituito da ecoscandaglio idrografico professionale di tipo singlebeam e sistema di posizionamento satellitare differenziale GPS/GNSS con tecnologia RTK, installato su apposito mezzo nautico in grado di operare in fondali molto bassi ed idoneo alla navigazione nei laghi indicati, ricadenti all'interno di un'area naturale protetta. I dati topobatimetrici sono stati acquisiti seguendo un piano di acquisizione costituito da una griglia di linee reciprocamente ortogonali con una spaziatura massima di 10 m, con infittimenti ove necessari. Le porzioni di lago non raggiungibili dal mezzo nautico, caratterizzate da profondità inferiori ai 40 cm, sono state rilevati mediante sistema DGPS RTK ed i relativi dati acquisiti sono stati successivamente integrati con quelli acquisiti dal sistema ecoscandaglio-DGPS RTK, ai fini della generazione dei modelli digitali dei fondali dei cinque laghi. Inoltre lungo il perimetro di ogni bacino lacustre sono stati effettuati rilievi mediante sistema DGPS RTK, allo scopo di delimitare con precisione il bordo lago e definire lo "zero batimetrico" cui riferire la batimetria dei fondali in termini di profondità relative (rispetto al livello idrico del lago) oltre che in termini di profondità assolute (rispetto al livello medio mare). È stato infine effettuato il rilievo plano-altimetrico, con

sistema DGPS RTK, della sommità delle 5 aste di misura del livello idrico dei laghi, poste in prossimità delle sponde dei stessi. Tutti i dati acquisiti sono stati agganciati altimetricamente al modello digitale del terreno a passo 2 m dell'area in esame (fonte: Dipartimento Regionale Urbanistica) mediante capisaldi acquisiti nell'area di lavoro.

Il Report conclusivo delle attività svolte dalla società Biosurvey S.r.l. nell'ambito del servizio di rilievo topo-batimetrico dei laghi della Riserva Naturale Integrale Lago Preola e Gorghi Tondi, contenente, oltre alla descrizione delle modalità e della strumentazione di rilievo utilizzate, i risultati ottenuti e le tavole cartografiche prodotte relativamente a ciascuno dei cinque laghi rilevati, è riportato nell'Appendice A al presente documento.

Di seguito si riepilogano i principali risultati ottenuti ed in particolare:

- il prospetto riepilogativo dei dati fisiografici dei laghi rilevati (Tabella 6.2);
- il prospetto contenente le coordinate e la quota s.l.m della sommità delle aste di misura dei livelli idrici dei laghi (Tabella 6.3);
- i modelli digitali del fondale dei laghi con profondità espresse in metri dal livello idrico all'atto del rilievo (Figura 6.4);
- lo stralcio, relativo alla zona dei laghi, del modello digitale topo-batimetrico integrato a passo 2 m del settore occidentale della Piana (Figura 6.5). Al riguardo si precisa che il modello digitale integrato è stato realizzato sull'intera area del dominio del modello locale di flusso e trasporto (cfr. paragrafo 8.2), con un buffer di 2 km dalla perimetrazione dello stesso.

Bacino lacustre	Quota del livello idrico del lago all'atto del rilievo (m s.l.m.)	Perimetro (m)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Profondità max (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
Murana	1.02	1184.3	74287.7	- 1	45419
Preola	0.58	3671.5	271527.8	- 1.5	299610
Gorgo Alto	0.44	684.1	22782.1	- 9.7	133877
Gorgo Medio	0.46	637.8	22761.4	- 12.86	178147
Gorgo Basso	0.46	1147.1	30201.1	- 11.22	143756

Tabella 6.2 – Prospetto riepilogativo dei dati fisiografici dei laghi

Asta	Coord Est (m) UTM33N WGS84	Coord Nord (m) UTM33N WGS84	Quota sommità asta (m s.l.m.)
Murana	291259.13	4166907.29	1.53
Preola	291937.49	4166277.80	0.96
Gorgo Alto	292531.13	4165315.33	0.78
Gorgo Medio	292666.14	4165205.28	0.91
Gorgo Basso	292971.90	4164957.13	0.69

Tabella 6.3 - Coordinate e quota della sommità delle aste di misura dei livelli idrici dei laghi



Figura 6.4 - Modelli digitali del fondale dei laghi (profondità espresse in metri dal livello idrico dei laghi)



# Modello digitale topo-batimetrico integrato relativo alla zona dei laghi

Figura 6.5 - Stralcio del modello digitale topo-batimetrico integrato a passo 2 m relativo alla zona dei laghi (quote espresse in metri s.l.m.)

#### 6.3 Esecuzione di una campagna di campionamento ed analisi delle acque dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi e sulle acque di falda in prossimità della discarica di C.da Misiddi-Campana

Al fine di valutare, attraverso strumenti modellistici di simulazione dei processi di trasporto, l'eventuale trasferimento ai laghi dei contaminanti rilasciati nel corpo idrico sotterraneo dalle fonti di pressione puntuale presenti sul territorio e rappresentate dalle discariche RSU dismesse (cfr. paragrafi 3.4 e 8.1), è stata effettuata una campagna di campionamento ed analisi delle acque dei laghi e della falda idrica sotterranea prelevata in corrispondenza della discarica di C.da Misiddi-Campana.

Infatti, come specificato nei paragrafi 3.4 e 8.1, nel settore occidentale dell'acquifero, in cui ricadono i laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, insistono 4 discariche RSU dismesse inserite nel Piano Regionale Bonifiche della Sicilia (Figura 6.6): 2 site nel comune di Campobello di Mazara (1 in C.da Misiddi-Campana, dove si trova anche un impianto IED<sup>3</sup>, 1 in C.da Fosso del Pino); 2 site nel comune di Mazara del Vallo (1 in C.da S. Nicola, 1 in C.da Nicolò Soprano loc. Gilletto). Inoltre, sulla base del modello concettuale di circolazione idrica sotterranea della zona occidentale dell'acquifero, i laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, idraulicamente interconnessi con l'acquifero, si trovano in una posizione di valle idrogeologico rispetto alle discariche RSU dismesse e la falda idrica sotterranea ivi circolante può rappresentare il vettore della contaminazione eventualmente proveniente dalle stesse.

Le attività di campionamento delle acque dei laghi si sono svolte in concomitanza con la campagna di rilievo topo-batimetrico degli stessi descritta al paragrafo 6.2, secondo il prospetto riportato nella Tabella 6.4. Il campionamento è stato effettuato a due profondità (campione superficiale e campione profondo), tranne nei laghi Murana e Preola, dove, date le ridotte profondità, è stato effettuato solo il campionamento di superficie.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Trattasi dell'impianto, citato al paragrafo 3.4 del presente documento, il quale, in base alle verifiche effettuate da ARPA Sicilia, risulta coincidere con un impianto di trattamento meccanico-biologico dei rifiuti autorizzato e mai realizzato



Figura 6.6 - Ubicazione delle discariche RSU dismesse (triangoli fucsia) e dell'impianto IED (stella azzurra) nel settore occidentale della Piana. In giallo è indicata la perimetrazione del dominio del modello locale di trasporto di cui al capitolo 8

Lago	Data campionamento	N. campioni prelevati	Profondità di prelievo (m)
Murana	17/01/2018	1	Campionamento superficiale: aliquote prelevate a -0,2 m dalla superficie del lago
Preola	16/01/2018	1	Campionamento superficiale: aliquote prelevate a -0,5 m dalla superficie del lago
Gorgo Alto	09/01/2018	2	Campionamento superficiale: aliquote prelevate a – 2 m dalla superficie del lago; Campionamento profondo: aliquote prelevate a + 2 m dal fondo lago
Gorgo Medio	17/01/2018	2	Campionamento superficiale: aliquote prelevate a – 2 m dalla superficie del lago; Campionamento profondo: aliquote prelevate a + 2 m dal fondo lago
Gorgo Basso	10/01/2018	2	Campionamento superficiale: aliquote prelevate a – 2 m dalla superficie del lago; Campionamento profondo: aliquote prelevate a + 2 m dal fondo lago

Tabella 6.4 – Prospetto dei campionamenti effettuati delle acque dei laghi

Il campionamento delle acque della falda idrica sotterranea in prossimità della discarica di C.da Misiddi-Campana è stato effettuato in corrispondenza di 3 piezometri, appartenenti alla rete di monitoraggio dell'impianto della discarica, di cui si disponeva dei risultati delle pregresse attività di campionamento e analisi svolte dal gestore dell'impianto tra il 2010 e il 2014 in attuazione del piano di monitoraggio e controllo della discarica: i piezometri P1, PZ3 e P8.

In Tabella 6.5 è riportato il prospetto delle attività di campionamento della falda idrica sotterranea effettuate nei piezometri della rete di monitoraggio della discarica di C.da Misiddi Campana, la cui ubicazione è mostrata in Figura 6.7.

Tabella 6.5 – Prospetto dei campionamenti effettuati nei piezometri della discarica di C.da Misiddi-Campana

Piezometro	Data campionamento	Livello statico della falda da p.c. (m)	N. campioni prelevati	Profondità del prelievo (m)
P1	20/02/2018	30,00	1	Aliquote prelevate a - 4,0 m dal livello statico della falda con bailer previo spurgo
PZ3	21/12/2017	32,72	1	Aliquote prelevate a -6,0 m dal livello statico della falda mediante bailer previo spurgo
P8	20/02/2018	-	1	Aliquote prelevate attraverso la pompa installata nel pozzo



Figura 6.7 - Ubicazione dei piezometri della rete di monitoraggio della discarica Misiddi-Campana in cui è stato effettuato il campionamento della falda idrica sotterranea

I campioni della falda idrica sotterranea prelevati dai piezometri P1 e PZ3 ed i campioni delle acque dei laghi sono stati analizzati presso il Laboratorio della Struttura Territoriale di Palermo dell'ARPA Sicilia, dove sono stati sottoposti allo stesso protocollo analitico, ricercando, alla luce dei risultati delle precedenti attività di monitoraggio effettuate nei piezometri della discarica e nei laghi, le seguenti categorie di sostanze:

- parametri di base (macrodescrittori)
- metalli
- fitofarmaci
- sostanze organiche volatili:
  - o composti organici aromatici
  - o alifatici clorurati cancerogeni
  - o alifatici clorurati non cancerogeni
  - o alifatici alogenati cancerogeni
  - o clorobenzeni
  - o altre sostanze organiche volatili non rientranti nelle precedenti categorie.

Il campione della falda idrica sotterranea prelevato dal piezometro P8 è stato analizzato presso il Laboratorio della Struttura Territoriale di Trapani dell'ARPA Sicilia, ai fini del controllo della presenza in falda di alcuni parametri indicatori di inquinamento inorganico (metalli) e da nutrienti delle acque sotterranee.

In Tabella 6.6 sono riportati, per ciascuno dei campioni delle acque dei laghi e della falda idrica sotterranea prelevati, i risultati delle misure dei parametri chimico-fisici, effettuate sul campo con sonda multiparametrica, ed i risultati delle analisi relative ai parametri di base ricercati.

In Tabella 6.7 sono riportati, per gli stessi campioni, i risultati delle analisi relative ai metalli.

Dai risultati ottenuti emerge:

- la presenza, nel campione della falda idrica sotterranea prelevata dal piezometro P1, di • concentrazioni superiori ai valori soglia, di cui alla Tab, 3 dell'Allegato 1 (lettera B, parte A) della Parte Terza del D. lgs. 152/06 (così come modificato dal DM Ambiente 06/07/2016), per i parametri cloruri, ione ammonio ed arsenico, e concentrazioni superiori allo standard di qualità ambientale, di cui alla Tab. 2 dell'Allegato 1 (lettera B, parte A) della Parte Terza dello stesso decreto, per il parametro nitrati. Nel campione proveniente dal piezometro P1 è stata altresì riscontrata la presenza di concentrazioni del parametro nichel superiori al valore soglia di cui alla seconda colonna della Tab. 3 sopra citata (SQA biodisponibile per tale parametro), ma inferiori al valore soglia di cui alla prima colonna della stessa. Per tale parametro, date le condizioni del corpo idrico sotterraneo oggetto di studio (CIS che alimenta corpi idrici superficiali), il valore soglia da prendere in considerazione è lo SQA biodisponibile specificato nella seconda colonna della Tab. 3, con il quale va confrontata la concentrazione biodisponibile della sostanza, determinata secondo i criteri e le procedure per la valutazione della biodisponibilità sito-specifica dei metalli in ambiente acquatico riportati nelle linee guida ISPRA n. 143/2006 (ISPRA, 2016). A tale riguardo, la determinazione della concentrazione biodisponibile di nichel nelle acque di falda prelevate dal piezometro P1 secondo i criteri e le procedure indicate nelle suddette linee guida, potrà essere effettuata nell'ambito di un'eventuale prosecuzione delle attività di indagine relative al settore occidentale del corpo idrico sotterraneo della Piana, che comporterà anche il monitoraggio nell'anno del DOC, del Ca e del pH, nonché l'applicazione del modello BLM semplificato (ISPRA, 2016);
- la presenza, nel campione della falda idrica sotterranea prelevata dal piezometro P8, di concentrazioni superiori ai valori soglia di cui alla Tab, 3 dell'Allegato 1 (lettera B, parte A) della Parte Terza del D. lgs. 152/06 (così come modificato dal DM Ambiente 06/07/2016) per i parametri conducibilità elettrica, ione ammonio, arsenico, boro, cadmio, cromo totale, nichel, piombo e vanadio. Per quanto riguarda i parametri nichel e piombo potrà essere effettuato, nell'ambito di un'eventuale prosecuzione delle attività di indagine relative al

settore occidentale del corpo idrico sotterraneo della Piana, anche il monitoraggio della concentrazione biodisponibile di tali metalli nelle acque di falda prelevate dal piezometro P8, secondo i criteri e le procedure indicate nelle linee guida ISPRA precedentemente citate (ISPRA, 2016);

- la presenza, nei campioni dei laghi Gorgo Alto (fondo), Gorgo Medio (superficie e fondo), Gorgo Basso (superficie e fondo), di concentrazioni uguali o superiori allo SQA-MA per la colonna d'acqua di cui alla Tab. 1/B del D. lgs. 172/2015 per le acque superficiali, per il parametro arsenico (negli altri campioni lacustri il parametro è presente in concentrazioni significative sebbene inferiori allo SQA-MA di cui sopra);
- la presenza, nei campioni dei laghi Preola, Gorgo Alto (superficie e fondo), Gorgo Medio (superficie), Gorgo Basso (superficie e fondo), di concentrazioni superiori allo SQA-MA per la colonna d'acqua di cui alla Tab. 1/B del D. lgs. 172/2015 per le acque superficiali, per il parametro cromo (negli altri campioni lacustri il parametro è presente in concentrazioni significative sebbene inferiori allo SQA-MA di cui sopra);
- la presenza nel campione del lago Gorgo Basso (fondo) di concentrazioni superiori al LOQ per il parametro cadmio, di cui alla Tab. 1/A del D. lgs. 172/2015.

Per quanto riguarda i fitofarmaci e le sostanze organiche volatili ricercati nelle acque dei laghi e della falda idrica sotterranea in prossimità della discarica, i risultati, il cui dettaglio è riportato nei rapporti di prova allegati al presente documento (Allegato 1), mostrano, in tutti i campioni, valori inferiori al limite di quantificazione per tutte le categorie di sostanze ricercate, tranne nei seguenti casi:

- Gorgo Alto (campione superficiale): Fenitrotion rilevato in concentrazioni pari al LOQ;
- Gorgo Alto (campione di fondo): Xilene (meta, para) in concentrazioni superiori al LOQ, ma inferiori allo SQA-MA per la colonna d'acqua di cui alla Tab. 1/B del D. lgs. 172/2015 per le acque superficiali, per tali parametri;
- Gorgo Basso (campione superficiale e di fondo): Benzene, Xilene (meta, para), o-Xilene, Tetracloroetilene, rilevati in concentrazioni superiori ai rispettivi LOQ (nel campione di fondo è stato inoltre rinvenuto Toluene in concentrazioni superiori al LOQ), ma inferiori allo SQA-MA per la colonna d'acqua di cui alle Tabb. 1/A e 1/B del D. lgs. 172/2015, per tali parametri;
- Piezometro P1: Penconazolo e Myclobutanil rilevati in concentrazioni pari o superiori ai rispettivi LOQ, ma inferiori allo SQ di cui alla Tab. 2 dell'Allegato 1 (lettera B, parte A) della Parte Terza del D. lgs. 152/06 (così come modificato dal DM Ambiente 06/07/2016).

Campione Parametro	Lago Murana	Lago Preola	Lago Gorgo Alto (camp. superf.)	Lago Gorgo Alto (camp. fondo)	Lago Gorgo Medio (camp. superf.)	Lago Gorgo Medio (camp. fondo)	Lago Gorgo Basso (camp. superf.)	Lago Gorgo Basso (camp. fondo)	Falda idrica sott. (piezom. P1)	Falda idrica sott. (piezom. PZ3)	Falda idrica sott. (piezom. P8)
Data di campionamento	17/01/2018	16/01/2018	09/01/2018	09/01/2018	17/01/2018	17/01/2018	10/01/2018	10/01/2018	20/02/2018	21/12/2017	20/02/2018
Temperatura (°C) <sup>(*)</sup>	14.46	12.73	13.52	11.57	12.77	11.55	13.52	11.53	21.2	19.5	24.5
pH (*)	7.97	8.24	8.15	7.80	7.97	7.32	7.92	7.71	6.99	7.73	7.77
Conducibilità a 20 °C (mS/cm) <sup>(*)</sup>	2820	3860	4066	4128	3198	3227	4712	4737	2242	810	25939
Fluoruri (mg/l)	0.48	0.42	0.33	0.41	0.41	0.29	0.3	0.29	0.23	0.17	-
Cloruri (mg/l)	504	834	897	901	660	657	1050	1036	290	124	-
Nitrati (mg/l)	<1.0	<1.0	1	<1.0	<1.0	<1.0	1.8	1.1	59	14	-
Solfati (mg/l)	441	485	367	364	348	343	369	352	76	37	-
Ammonio (mg/l)	2.07	< 0.03	< 0.03	0.4	1.61	2.51	0.06	1.04	29	< 0.03	2222
Nitrito (mg/l)	0.28	< 0.03	0.16	0.19	0.05	< 0.03	0.05	0.16	<0.6	< 0.03	-
Azoto totale (mg/l)	3.7	1.2	1.5	2.1	2.7	3.2	3.4	3.6	39	3.5	-
TOC (mg/l)	-	-	-	-	-	-	-	-	39	1.9	-
Sodio (mg/l)	303	478	470	475	356	355	585	586	155	75	-
Potassio (mg/l)	26	40	43	43	31	31	79	79	114	5.5	-
Magnesio (mg/l)	45	67	76	71	55	55	89	90	6	6	-
Calcio (mg/l)	141	98	124	137	131	131	111	113	90	50	-
Durezza (°f)	54	52	62	63	55	55	65	65	25	15	-
Fosfati (mg/l)	0.05	< 0.03	0.05	0.03	< 0.03	0.02	0.14	0.21	<0.6	< 0.03	-

Tabella 6.6 – Risultati delle determinazione analitiche effettuate nei campioni dei laghi e della falda idrica sotterranea in prossimità della discarica di C.da Misiddi-Campana: parametri chimico-fisici e parametri di base

<sup>(\*)</sup> parametri determinati in campo con sonda

multiparametrica

Campione	Lago Murana	Lago Preola	Lago Gorgo Alto (camp. superf.)	Lago Gorgo Alto (camp. fondo)	Lago Gorgo Medio (camp. superf.)	Lago Gorgo Medio (camp. fondo)	Lago Gorgo Basso (camp.	Lago Gorgo Basso (camp. fondo)	Falda idrica sott. (piezom. P1)	Falda idrica sott. (piezom. PZ3)	Falda idrica sott. (piezom. P8)
Data di campionamento	17/01/2018	16/01/2018	09/01/2018	09/01/2018	17/01/2018	17/01/2018	10/01/2018	10/01/2018	20/02/2018	21/12/2017	20/02/2018
Alluminio (µg/l)	<20.0	<20.0	<20.0	<20.0	<20.0	<20.0	<20.0	<20.0	<20.0	<20.0	1388
Antimonio ( $\mu g/l$ )	<0.50	0.8	0.6	0.59	<0.50	<0.50	0.55	0.54	0.86	<0.5	-
Argento ( $\mu g/l$ )	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	_
Arsenico (ug/l)	3.09	4.4	4.5	5	5	5	8.6	8.1	58	<1.00	592
Bario (µg/l)	49	46	55.6	51	48	50	51	51	35	58	-
Berillio (µg/l)	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	2
Boro (µg/l)	348	666	495	479	321	326	600	608	432	151	4640
Cadmio (µg/l)	< 0.070	< 0.070	< 0.070	< 0.070	< 0.070	< 0.070	< 0.070	0.072	< 0.070	< 0.070	3
Cobalto (µg/l)	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	5	<1.00	182
Cromo (µg/l)	2.51	9.8	6.6	4.8	4.1	3.13	5.2	5	16.8	< 0.5	838
Ferro (µg/l)	31.8	28.4	26.4	24	21.2	24.7	27.8	34	341	<14.0	14820
Manganese (µg/l)	9.7	<3.00	<3.00	<3.00	<3.00	46	5.6	34	35	<3.0	72
Mercurio (µg/l)	< 0.0100	< 0.0100	< 0.0100	< 0.0100	< 0.0100	< 0.0100	< 0.0100	< 0.0100	< 0.0100	< 0.0100	-
Nichel (µg/l)	1.78	<1.00	<1.00	<1.00	1.11	<1.00	<1.00	<1.00	16.1	<1.00	567
Piombo (µg/l)	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	26
Rame (µg/l)	<1.00	3.9	<1.00	2.25	<1.00	<1.00	3.9	7.5	1.31	<1.00	693
Selenio (µg/l)	1.9	2.23	<1.00	2.16	1.45	1.93	4.6	7.7	2.92	<1.00	-
Stagno (µg/l)	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	1.54	<1.00	-
Tallio (µg/l)	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	<0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	< 0.200	-
Vanadio (µg/l)	2.04	5	4.7	3.8	2.65	2.08	3.4	3.26	30.8	<1.00	1769
Zinco (µg/l)	<6.0	6.7	13.1	39	<6.0	<6.0	12.2	23.8	20.1	<6.0	901

Tabella 6.7 - Risultati delle determinazione analitiche effettuate nei campioni dei laghi e della falda idrica sotterranea in prossimità della discarica di C.da Misiddi-Campana: metalli

# SEZIONE 3 – IMPLEMENTAZIONE MODELLISTICA

# 7 Implementazione del modello numerico integrato regionale del sistema idrogeologico della Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara

# 7.1 Obiettivi e struttura generale del modello integrato

La messa a punto ed applicazione di un modello numerico integrato per la rappresentazione dei processi idrologici, idrodinamici sotterranei e superficiali e di interscambio fiume-falda relativi al sistema della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, ha rappresentato uno degli elementi principali delle attività della task T.3, che ha avuto i seguenti obiettivi:

- caratterizzare, nel periodo di riferimento delle analisi modellistiche, la risposta idrodinamica dell'acquifero alle sollecitazioni naturali (ricarica) ed antropiche (prelievi) che agiscono su di esso;
- rappresentare i deflussi idrici sotterranei, integrati con quelli superficiali, del sistema idrogeologico della Piana;
- estrarre le condizioni al contorno per il modello locale di flusso relativo alla zona dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi;
- effettuare la valutazione del bilancio idrico annuo medio dell'acquifero, utile ai fini dell'aggiornamento della valutazione dello stato quantitativo del corpo idrico sotterraneo;
- fornire la base per l'eventuale successiva implementazione di modelli di qualità delle acque a scala regionale (modelli di advezione e dispersione degli inquinanti);
- fornire la base per l'eventuale successiva verifica di scenari di pianificazione e gestione rivolti al conseguimento degli obiettivi ambientali ex Direttiva 2000/60/CE per il corpo idrico sotterraneo.

Per la simulazione dei flussi idrici sotterranei nella zona satura dell'acquifero e delle relative interazioni con la rete idrografica superficiale (interscambi fiume-falda) e per l'analisi di bilancio del sistema è stato implementato, con il codice di calcolo MIKE SHE, un modello rappresentativo dei processi idrogeologici dell'acquifero della Piana, interfacciato con il modello idrodinamico del reticolo idrografico interconnesso, basato sul codice di calcolo MIKE HYDRO River HD.

Data la configurazione del reticolo idrografico e l'assetto geologico ed idrogeologico della Piana, nonché in considerazione dei dati idrologici acquisiti (cfr. paragrafo 3.3), il corso d'acqua preso in esame per l'analisi delle interazioni fiume-falda attraverso l'implementazione del modello integrato
MIKE SHE – HYDRO RIVER è stato il fiume Modione, con il suo affluente canale Ricamino (Figura 7.1). Il fiume Delia-Arena ed il fiume Belice, che ricadono al di fuori dello stesso ad eccezione di un breve tratto del fiume Belice localizzato lungo il limite orientale dell'acquifero, non sono stati presi in considerazione ai fini dell'analisi degli interscambi fiume-falda nell'ambito del presente studio (cfr. paragrafo 3.3).



Figura 7.1 - Configurazione del reticolo idrografico rispetto alla perimetrazione dell'acquifero della Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara

Data la mancanza di una serie temporale di portate osservate nel fiume Modione relative al periodo recente, da utilizzare come input per il modello idrodinamico fluviale, è stato inoltre utilizzato il modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi MIKE HYDRO RR – NAM che, a partire dai dati di precipitazione ed evapotraspirazione e sulla base della caratterizzazione del bacino idrologico in esame, restituisce la serie di portate alimentanti il corso d'acqua.

Pertanto, complessivamente, per l'implementazione del modello numerico integrato del sistema idrogeologico della Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara sono stati necessari:

A. la messa a punto e taratura, con il modulo RR del codice MIKE HYDRO, di un modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi relativo all'intero bacino del fiume Modione;

- B. la messa a punto e taratura, con il modulo HD del codice MIKE HYDRO River di un modello idrodinamico del fiume Modione e del suo affluente Canale Ricamino, alimentati dalle portate calcolate con il modulo afflussi-deflussi;
- C. la messa a punto e taratura, con il codice MIKE SHE, di un modello idrogeologico integrato relativo all'intera Piana di Castelvetrano - Campobello di Mazara, in grado di rappresentare i processi idrogeologici del sistema, simulando in particolare il flusso nella zona satura dell'acquifero ed i flussi di scambio con il reticolo idrografico.

La capacità del modello idrogeologico integrato di simulare le interazioni fiume-falda, una volta definiti i rami del reticolo superficiale di MIKE HYDRO River che possono interagire con MIKE SHE e le loro modalità di interfacciamento, è stata ottenuta effettuando l'accoppiamento dinamico tra i due modelli MIKE SHE – MIKE HYDRO River.

La procedura di accoppiamento dinamico di MIKE HYDRO River e di MIKE SHE consente di simulare i seguenti aspetti:

- flusso di scambio tra fiume e falda: drenaggio o alimentazione in funzione dei livelli idrici in alveo e piezometrici in falda e dei coefficienti di permeabilità del mezzo (materiale di fondo alveo, acquifero o entrambi);
- drenaggio dei deflussi superficiali calcolati in MIKE SHE da parte del reticolo idrografico gestito da MIKE HYDRO River;
- esondazioni dall'alveo inciso del reticolo idrografico inserito in MIKE HYDRO River verso le celle di calcolo di MIKE SHE e processi di infiltrazione delle acque esondate (se la componente di calcolo è attivata).

Nel caso in studio, l'accoppiamento dinamico MIKE HYDRO River - MIKE SHE è stato utilizzato solo per la simulazione dei flussi di scambio tra l'acquifero ed il reticolo idrografico interagente (primo punto di cui sopra).

A seguire nel presente capitolo si descrivono la messa a punto, la calibrazione ed i risultati ottenuti dalle singole componenti del modello integrato della Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara: modello afflussi deflussi (MIKE HYDRO RR - NAM), modello idrodinamico superficiale (MIKE HYDRO River - HD), modello idrogeologico integrato (MIKE SHE).

Nell'implementazione di tutte le componenti del sistema modellistico si è fatto riferimento alla perimetrazione ed al modello concettuale idrogeologico preliminare dell'acquifero della Piana definiti nel presente studio (cfr. paragrafo 4.5).

# 7.2 Modello idrologico del bacino del fiume Modione: modulo afflussi-deflussi7.2.1 Caratteristiche generali del modulo NAM

Il modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi, denominato RR, acronimo di Rainfall-Runoff, consente di rappresentare la trasformazione afflussi-deflussi a scala di bacino. Nell'applicativo MIKE HYDRO sono disponibili diversi modelli idrologici di trasformazione afflussi-deflussi, più o meno complessi, che possono essere scelti in base all'obiettivo dello studio o alla realtà territoriale da modellizzare. Per lo studio in oggetto si è utilizzato il modello NAM.

Il modello afflussi-deflussi NAM è un modello deterministico concettuale a parametri concentrati che simula i deflussi superficiali, ipodermici e profondi relativi alla fase terrestre del ciclo idrologico. Si tratta di un modello matematico basato sui processi fisici, che utilizza un set di equazioni matematiche e relazioni semi-empiriche per descrivere quantitativamente, sebbene in modo semplificato, la fase terrestre del ciclo dell'acqua (Figura 7.2).



Figura 7.2 - Processi simulati dal modello afflussi – deflussi NAM

Alcuni parametri che regolano i modelli matematici dei processi fisici descritti dal modulo NAM hanno un chiaro legame con la realtà fisica e possono essere stimati a partire dai dati caratteristici dei bacini; altri hanno invece un significato principalmente matematico, come per esempio le costanti di tempo o i valori soglia dei serbatoi, e sono stimati attraverso dei valori guida stabiliti in

funzione delle caratteristiche del territorio. Tali parametri possono essere successivamente oggetto di calibrazione.

Ai fini dell'implementazione del modello afflussi-deflussi NAM, l'intero bacino in esame viene discretizzato in singoli sottobacini ed ognuno di essi viene considerato come un'unità singola, indipendente dalle altre, cui vengono assegnati i parametri del modello come valori medi sull'intero sottobacino considerato.

Il modello NAM simula i deflussi superficiali, ipodermici e profondi in funzione del grado di riempimento di 4 serbatoi distinti e reciprocamente interconnessi, simulando in continuo la variazione di contenuto di acqua (in fase liquida o vapore) tra essi. Tali serbatoi rappresentano i processi fisici principali che caratterizzano la fase terrestre del ciclo idrologico di un generico bacino (Figura 7.3) e cioè: 1) accumulo e scioglimento neve; 2) intercettazione (captazione superficiale); 3) infiltrazione (zona radicale); 4) immagazzinamento nella falda (sistema idrico sotterraneo).



Figura 7.3 - Schema concettuale del modello afflussi – deflussi NAM

Il modulo "neve" è opzionale e, viste le caratteristiche dell'area oggetto di studio, non è stato utilizzato ai fini dell'implementazione del modello afflussi-deflussi nel caso in esame.

Per l'implementazione del modello afflussi-deflussi del bacino del fiume Modione si è proceduto ad effettuare le seguenti attività:

- 1. la messa a punto del modello, che ha compreso principalmente:
  - o la schematizzazione del bacino in sottobacini elementari;
  - il processamento dei dati di precipitazione ed evapotraspirazione potenziale da utilizzare in input al modello numerico di simulazione (dati meteorologici di input);
  - l'inserimento dei dati di input relativi ai parametri del modello (parametri che regolano i modelli matematici dei processi fisici descritti dal modulo NAM);
- la calibrazione del modello, consistente nell'analisi dei risultati ottenuti, in termini di portate simulate rispetto a quelle osservate, e nel processo di miglioramento della performance del modello;
- 3. l'estrazione dei risultati ottenuti.

Nei paragrafi 7.2.2, 7.2.3 e 7.2.4 vengono rispettivamente descritte le attività elencate ai punti 1, 2 e 3 di cui sopra.

# 7.2.2 Messa a punto del modello afflussi-deflussi

La messa a punto del modello afflussi-deflussi NAM relativo al bacino del fiume Modione ha richiesto, oltre alla suddivisione del bacino nei sottobacini elementari cui assegnare i dati di input (dati meteorologici e i parametri del modello), la preliminare definizione dei parametri per il set-up delle simulazioni e la definizione delle condizioni iniziali riferite al momento di inizio delle simulazioni. Queste ultime, rappresentate dal contenuto iniziale di umidità relativa nei serbatoi di intercettazione e radicale, e dai valori iniziali di scorrimento superficiale, deflusso ipodermico e flusso di base, nel caso in esame sono state considerate pari a zero.

Nella messa a punto del modello afflussi-deflussi NAM relativo al bacino del fiume Modione non sono stati presi in considerazione gli apporti o i prelievi di origine antropica, quali l'irrigazione o i pompaggi in falda: le interferenze antropiche con il ciclo idrologico naturale sono state infatti prese in considerazione nella messa a punto modello idrogeologico integrato implementato con il codice MIKE SHE (cfr. paragrafo 7.4).

Ai fini della calibrazione del modello afflussi-deflussi relativo al bacino del fiume Modione sono stati altresì inseriti nel set-up del modello i dati sperimentali rappresentati dalle portate osservate nella stazione "Modione a S. Elia" (cfr. paragrafo 7.2.3).

# 7.2.2.1 Schematizzazione del bacino

Ai fini dell'implementazione del modello afflussi-deflussi NAM, il bacino idrografico del fiume Modione è stato suddiviso in 5 sottobacini elementari, ciascuno da caratterizzare con un set di parametri rappresentanti le caratteristiche di risposta del sottobacino agli eventi meteorici:

- Modione 1: sottobacino di testata, chiuso in corrispondenza dell'intersezione tra il reticolo idrografico e la perimetrazione dell'acquifero della Piana di Castelvetrano - Campobello di Mazara;
- Modione 2: sottobacino a valle del "Modione 1", chiuso alla confluenza del fiume con il principale affluente, il canale Ricamino;
- Canale Ricamino: sottobacino comprensivo dell'intero bacino idrografico dell'affluente, dalla sorgente alla confluenza col fiume Modione;
- Modione 3: sottobacino ubicato tra la confluenza del canale Ricamino nel fiume Modione e la sezione di controllo del Modione a Sant'Elia, stazione idrometrica storica ed unico punto di controllo con disponibilità di dati di livello e portata;
- Modione 4: sottobacino compreso tra la sezione del Modione a Sant'Elia e la foce.

Nella Figura 7.4 a seguire è riportata la schematizzazione sopradescritta.



Figura 7.4 - Discretizzazione in sottobacini del bacino del fiume Modione

# 7.2.2.2 Dati meteorologici di input

I dati meteorologici di input richiesti per l'implementazione del modello afflussi-deflussi del bacino del fiume Modione sono le serie temporali osservate dei valori medi di precipitazione (P) ed evapotraspirazione potenziale (Etp) per ogni bacino elementare, ottenute a partire dai dati puntuali osservati nelle stazioni di misura utilizzate per la caratterizzazione termo-pluviometrica del bacino del fiume Modione (cfr. paragrafo 3.3).

In particolare, per la definizione delle serie temporali di precipitazione da inserire in input al modello afflussi-deflussi del bacino, sono stati utilizzati sia i dati giornalieri dei sensori della rete di monitoraggio meccanografica utilizzati per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del fiume Modione relativa al periodo storico 1977-1981 (Tabella 7.1 e Figura 7.5), sia i dati orari della nuova rete sensoristica in teletrasmissione utilizzati per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del fiume fiume Modione relativa al periodo recente 2005-2017 (Tabella 7.2 e Figura 7.6).

Tabella 7.1 - Anagrafica delle stazioni di monitoraggio selezionate per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del Fiume Modione relativa al periodo storico (1977-1981)

Stazione	Quota (m slm)	Coord Est (m) UTM 33N WGS84	Coord Nord (m) UTM 33N WGS84
Castelvetrano	190	306095	4173934
Gibellina	410	320722	4184369
Menfi	119	320209	4163614

Tabella 7.2 Anagrafica delle stazioni di monitoraggio selezionate per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del Fiume Modione relativa al periodo recente (2005-2017)

Stazione	Quota (m slm)	Coord Est (m) UTM 33N WGS84	Coord Nord (m) UTM 33N WGS84
Castelvetrano	167	306644	4173314
Santa Ninfa	496	313335	4183679
Menfi	100	320606	4162760



Figura 7.5 - Ubicazione delle stazioni pluviometriche selezionate per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del Fiume Modione relativa al periodo storico (1977-1981).



Figura 7.6 - Ubicazione delle stazioni pluviometriche selezionate per la caratterizzazione pluviometrica del bacino del Fiume Modione relativa al periodo recente (2005-2017)

L'esigenza di reperire ed utilizzare, oltre ai dati pluviometrici recenti, anche quelli storici, relativi al periodo 1977-1981, è legata alla necessità di calibrare il modello afflussi-deflussi sulla base dei dati di portata osservati alla stazione idrometrica "Modione a Sant'Elia" disponibili solo per alcuni anni compresi tra il 1972 ed il 1982 (cfr. paragrafo 3.3). Si è proceduto, pertanto, effettuando la calibrazione dei parametri di input del modello NAM sul periodo 1977-1981, nel quale si aveva disponibilità della serie temporale osservata dei valori di portata utilizzabile come elemento di "feed-back" (Figura 7.7), per poi applicare i valori ottenuti dalla taratura ai parametri di input relativi al periodo recente 2005-2017, per il quale sono stati utilizzati i dati meteorici osservati, derivati dalla rete in teletrasmissione.



Figura 7.7 - Serie temporale osservata di portate  $[m^3/s]$  registrati alla stazione idrometrica "Modione a Sant'Elia"

La rete di rilevamento in telemisura è costituita da stazioni di rilevamento idro-termo-pluviometrico equipaggiate per la trasmissione dei dati in tempo reale. Il numero complessivo delle stazioni è variato nel corso del tempo, per via delle nuove installazioni effettuate o della cessazione dei siti non più idonei alla rilevazione: le stazioni della rete in telemisura hanno quindi integrato, o in alcuni casi affiancato o sostituito, la rete di stazioni meccanografiche tradizionali.

Al fine di poter utilizzare i risultati della calibrazione del modello afflussi-deflussi, effettuata con i dati del periodo 1977-1981, anche al modello relativo al periodo recente 2005-2017, è stata

preliminarmente verificata, per le stazioni ricadenti nel bacino idrografico del fiume Modione o in zona limitrofa, oltre alla disponibilità di dati pluviometrici relativi ai periodi di interesse, anche l'ubicazione delle stesse, in modo da utilizzare solo stazioni presenti in entrambe le reti di monitoraggio, meccanografica ed in teletrasmissione, con caratteristiche geografiche ed altimetriche dei sensori simili. Per definire le aree di influenza, rispetto ai sottobacini elementari, delle stazioni così selezionate (Castelvetrano, Menfi, Santa Ninfa e Gibellina, riportate nelle Tabelle 7.1 e 7.2 e nelle Figure 7.5 e 7.6), si è fatto quindi riferimento all'applicazione del metodo dei poligoni di Thiessen indicata nel paragrafo 3.3 (Figura 7.8).



Figura 7.8 - Selezione delle stazioni pluviometriche utilizzate nel modello afflussi-deflussi e relativi poligoni di Thiessen

La risoluzione temporale del dato di precipitazione da assegnare in input al modello idrologico dipende dalla scala temporale dei processi fisici da rappresentare in relazione all'obiettivo finale dell'analisi. Nell'ambito del presente studio, data la finalità dell'applicazione modellistica complessiva da realizzare, consistente nell'analisi dei processi idrogeologici a scala regionale dell'acquifero della Piana e dei processi di scambio fiume-falda che ivi si verificano, data la scala temporale dei fenomeni oggetto di indagine, sono stati utilizzati come dati di input per il modello afflussi-deflussi dati di precipitazione a scansione giornaliera.

Per la definizione della serie temporale di evapotraspirazione potenziale da assegnare in input al modello afflussi-deflussi del bacino del fiume Modione, è stato effettuato il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale Etp con il metodo di Thornthwaite (1948) così come modificato da Thornthwaite & Mather (1957) (cfr. paragrafo 5.1.1), che permette la valutazione della Etp su base mensile, a partire dai dati sull'andamento delle temperature medie mensili.

Il dato di temperatura media è stato assegnato in base alla disponibilità ed all'ubicazione dei sensori termometrici distribuiti sul bacino del fiume Modione: è stata pertanto scelta la serie osservata alla stazione Castelvetrano, rappresentativa dell'intera area in esame. Utilizzando un passo temporale di simulazione giornaliero, si è ritenuto sufficiente adottare valori medi mensili di evapotraspirazione potenziale Etp (Figura 7.9).



Figura 7.9 - Andamento mensile del dato calcolato di evapotraspirazione potenziale per il bacino del Modione

## 7.2.2.3 Parametri del modello

Per ciascun sottobacino del fiume Modione sono stati inseriti nel modello i dati di input relativi ai principali parametri che regolano i modelli matematici dei singoli processi fisici descritti dal modulo NAM (Figura 7.10), prestando attenzione alla loro rispondenza con gli elementi fisici del sistema in esame.

I parametri del modello relativi al serbatoio superficiale ed a quello radicale più significativi sono:

- <u>massimo contenuto d'acqua nel serbatoio superficiale Umax [mm]</u>. La quantità d'acqua intercettata dalla vegetazione, così come quella immagazzinata nelle depressioni del terreno e nelle porzioni più superficiali del suolo coltivato, è simulata con un serbatoio superficiale di capacità massima U<sub>max</sub> (*Maximum water content in surface storage*);
- <u>massimo contenuto d'acqua nel serbatoio radicale Lmax [mm]</u>. La quantità d'acqua nella zona radicale, ove avviene anche il processo di traspirazione da parte della vegetazione, è simulata con un serbatoio sottostante al precedente, di capacità massima L<sub>max</sub> (*Maximum water content in root zone storage*). Il parametro rappresenta il massimo contenuto di umidità del suolo nella zona radicale, che è disponibile per la traspirazione. Esso dipende dal tipo e dall'uso del suolo e può essere valutato approssimativamente come differenza tra capacità di campo e punto di appassimento;
- <u>coefficiente di scorrimento superficiale CQOF</u>. Il parametro CQOF (*Overland flow runoff coefficient*) definisce la frazione di pioggia che genera un deflusso superficiale e quella che si infiltra;
- <u>costante di tempo per l'interflow CKIF</u> [ore]. Il parametro CKIF (*Time constant for routing interflow*) è la quantità di contenuto di umidità del serbatoio superficiale, U, che genera deflusso ipodermico ogni ora;
- <u>costante di tempo CK12</u> [ore]. Il parametro CK<sub>12</sub> (*Time constants for routing interflow and overland flow*) è la costante di tempo per la formazione dei deflussi superficiali e ipodermici;
- valore soglia per il deflusso superficiale TOF. Il parametro TOF (*Root zone threshold value for overland flow*) determina il valore relativo del contenuto di umidità della zona radicale (L/Lmax) sopra cui è generato il deflusso superficiale;
- <u>valore soglia per il deflusso ipodermico TIF</u>. Il significato del valore soglia TIF (*Root zone threshold value for interflow*) è il medesimo di quello del TOF ma in riferimento al deflusso ipodermico.

I parametri del modello relativi al serbatoio sotterraneo più significativi sono:

• <u>costante di tempo per il deflusso di falda CKBF</u> [hours]. La costante di tempo per il baseflow CKBF (*Time constant for routing baseflow*) determina la forma dell'idrogramma nei periodi asciutti per quel che riguarda la sua fase di esaurimento;

<u>valore soglia per la ricarica di falda T<sub>g.</sub></u> Il parametro soglia TG (*Root zone threshold value for GW recharge*) determina il valore relativo del contenuto di umidità della zona radicale sopra cui si genera la ricarica delle acque sotterranee.

I suddetti parametri vengono determinati attraverso il successivo processo di taratura del modello.



Figura 7.10 - Modello concettuale a serbatoi NAM con il dettaglio dei parametri relativi ad ogni singola componente

## 7.2.3 Calibrazione del modello afflussi-deflussi

I parametri del modello afflussi-deflussi vengono definiti mediante una procedura di calibrazione iterativa volta a massimizzare la performance dello strumento modellistico nella rappresentazione del processo idrologico in termini di rispondenza tra le serie di portate osservate e le serie di portate simulate dal modello. Al fine di verificare detta rispondenza e la bontà della calibrazione dei parametri modellistici, si fa riferimento alle serie di dati osservati in corrispondenza delle stazioni idrometriche, laddove queste siano disponibili.

La calibrazione del modello afflussi-deflussi del bacino del fiume Modione è stata realizzata confrontando i valori di portata risultanti dalle simulazioni del modello, a partire da un set di

parametri iniziale, con la serie di osservazioni disponibili, ovvero l'idrogramma di portata alla sezione del Modione a Sant'Elia.

L'identificazione di un set dei parametri del modello in grado di massimizzare la rispondenza tra portate simulate ed osservate è stato il risultato di una serie di test con differenti set di parametri, che hanno permesso di identificare la combinazione di parametri ottimale (Figura 7.11).



Figura 7.11 - Confronto tra le portate simulate con il modello afflussi-deflussi calibrato (in blu) e la serie osservata all'idrometro del Modione a Sant'Elia (in rosso)

# 7.2.4 Risultati del modello afflussi-deflussi

Una volta ultimata la fase di calibrazione del modello idrologico sul periodo di disponibilità dei dati di portata osservata all'idrometro storico "Modione a Sant'Elia", si è proceduto con la simulazione della trasformazione afflussi-deflussi sul periodo recente 2005 – 2017.

A seguire si riportano, a titolo esemplificativo, i grafici relativi ad alcune tipologie di risultati restituiti dal modello: precipitazioni ragguagliate in un dato sottobacino (Figura 7.12) e serie temporali delle portate simulate per ciascuno dei sottobacini elementari in cui è stato discretizzato il bacino del fiume Modione (Figure 7.13 e 7.14). Queste ultime, applicate in modo concentrato o distribuito lungo l'asta fluviale, hanno fornito gli input al modello idrodinamico superficiale implementato con il codice di calcolo MIKE HYDRO River HD, descritto nel paragrafo a seguire.



Figura 7.12 - Precipitazioni ragguagliate al sottobacino del canale Ricamino nel periodo 2005-2017



Figura 7.13 - Andamento nel periodo 2005-2017 della portata simulata in ogni singolo sottobacino in cui è stato discretizzato il bacino del fiume Modione



Figura 7.14 - Dettaglio dell'andamento della portata simulata in ogni singolo sottobacino in cui è stato discretizzato il bacino del fiume Modione relativo al periodo ottobre 2012 – aprile 2013

# 7.3 Modello idrodinamico per la simulazione del deflusso idrico nel reticolo idrografico del fiume Modione

# 7.3.1 Caratteristiche generali del modulo HD

Il modulo idrodinamico (HD) del codice di calcolo MIKE HYDRO River simula il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei nei sistemi di canali o aste fluviali. Il modulo HD si basa sulla risoluzione delle equazioni che descrivono il moto vario nelle correnti a superficie libera (equazioni di *Saint-Venant*), che esprimono le leggi fisiche della conservazione della massa (equazione di continuità) e della quantità di moto (equazione del momento) e che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- il flusso è prevalentemente monodimensionale (cioè velocità uniforme e pelo libero orizzontale sulle sezioni trasversali);
- la pendenza del fondo è piccola;
- la variazione longitudinale della geometria delle sezioni d'alveo è modesta;
- su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Il modello consente di utilizzare tre differenti descrizioni del moto (o approssimazioni dell'onda), che vengono selezionate in funzione del tipo di problema da risolvere:

- Approssimazione dell'onda cinematica: le condizioni di moto sono calcolate assumendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa descrizione del moto è adatta a simulare fiumi con elevate pendenze senza effetti di rigurgito.
- Approssimazione dell'onda diffusiva: le condizioni di moto sono calcolate considerando oltre alle forze di gravità ed attrito, anche il gradiente idrostatico. Questa descrizione del moto è adatta a simulare fenomeni di rigurgito;
- Approssimazione dell'onda dinamica: le condizioni di moto sono calcolate considerando, oltre alle forze di gravità e di attrito ed al gradiente idrostatico, anche le forze di accelerazione. Questa descrizione, che utilizza le equazioni complete del moto, consente di simulare flussi di marea, transitori rapidi, ecc....

Per il caso di studio è stato utilizzato l'approccio dell'onda dinamica (alto ordine di frizione).

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dalla descrizione del moto selezionata (onda cinematica, diffusiva, dinamica): le equazioni di *Saint Venant* vengono trasformate in un sistema di equazioni alle differenze finite, secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, dove ad ogni passo temporale vengono determinati rispettivamente la portata Q e il livello idrico h (Figura 7.15). Lo schema di soluzione numerica adottato è stabile e consente di adottare passi di calcolo significativi per l'estensione temporale della simulazione, senza essere vincolati alla stabilità delle soluzioni numeriche.



Figura 7.15 - Griglia di calcolo del codice MIKE HYDRO River

Per la griglia di calcolo valgono le seguenti regole generali:

- la griglia viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente;
- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

Il modulo MIKE HYDRO River HD può essere utilizzato sia in riferimento alle più svariate geometrie e condizioni morfologiche dell'alveo, sia per diversi stati idrologici, dalle piene alle condizioni di magra, e permette di tenere conto della presenza di strutture idrauliche lungo la rete idrografica simulata.

L'accoppiamento in MIKE HYDRO River del modulo idrodinamico (HD) e del modulo idrologico (RR-NAM) consente inoltre di creare modelli completi di formazione, a partire dalle precipitazioni, e propagazione dei deflussi nel reticolo idrografico considerato.

Per l'implementazione del modello idrodinamico superficiale relativo all'asta del fiume Modione si è proceduto ad effettuare:

- 1. la messa a punto del modello, comprendente le seguenti attività:
  - estrazione delle sezioni topografiche fluviali;
  - definizione delle condizioni al contorno;
  - definizione delle condizioni iniziali;
- 2. l'estrazione dei risultati ottenuti.

Nei paragrafi 7.3.2 e 7.3.3 vengono rispettivamente descritte le attività di cui ai punti 1 e 2 sopra indicati.

# 7.3.2 Messa a punto del modello idrodinamico

Come anticipato nel paragrafo 7.1, il modello idrodinamico è stato implementato sull'asta del fiume Modione e su quella del suo principale affluente, il canale Ricamino.

# 7.3.2.1 Sezioni topografiche

Per la descrizione geometrica del reticolo idrografico in esame, si è fatto riferimento alle sezioni topografiche ottenute estraendo le relative quote dal dem a risoluzione 2m x 2m a disposizione.

Un'opzione all'interno del codice di calcolo permette il processamento diretto delle quote del grid relativo al dem, restituendo l'andamento planimetrico del corso d'acqua e le sezioni topografiche con l'interasse desiderato (Figura 7.16).

I dati ottenuti, non sufficienti in caso di studi idrodinamici di dettaglio (ad es. con finalità di previsione piene), sono ritenuti adeguati per lo scopo della presente applicazione modellistica, il cui obiettivo finale è quello di valutare gli interscambi fiume-falda all'interno di un modello idrogeologico integrato della Piana implementato con MIKE SHE, con simulazioni a scansione temporale giornaliera.



Figura 7.16 - Interfaccia grafica del MIKE HYDRO River per la visualizzazione delle sezioni topografiche inserite per la caratterizzazione del reticolo idrografico del fiume Modione e del suo affluente, canale Ricamino

# 7.3.2.2 Condizioni al contorno

In MIKE HYDRO River le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne, il cui inserimento non è stato necessario nel caso in esame relativo al fiume Modione.

Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

Nel caso di studio, per la condizione di idrogramma di portata, da inserire a monte del tratto di corso d'acqua modellizzato, e per i contributi distribuiti lungo le aste sono stati utilizzati i deflussi risultanti dall'applicazione realizzata con il modulo idrologico RR - NAM. Per la condizione di valle è stato assunto il livello medio del mare ritenuto pari a zero per l'intero periodo di simulazione.

## 7.3.2.3 Condizioni iniziali

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutto il reticolo idrografico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso reticolo idrografico.

Non avendo informazioni di dettaglio al riguardo, si è preferito assumere sia per il Modione che per il Ricamino condizioni iniziali pari a zero.

# 7.3.3 Risultati del modello idrodinamico

I risultati ottenibili dal modello idrodinamico MIKE HYDRO River – HD sono molteplici e diversificati.

Nel caso in esame l'implementazione del modello idrodinamico è stata funzionale a dettagliare una boundary del modello integrato del bacino idrogeologico della Piana di Castelvetrano - Campobello di Mazara implementato con il codice MIKE SHE.

A seguire si riportano a titolo esemplificativo alcuni output modellistici ottenuti, quali il profilo del fiume Modione con indicati i livelli massimi raggiunti nella simulazione del periodo 2005-2017 o l'indicazione del livello raggiunto in un preciso istante in una sezione di calcolo (Figure 7.17, 7.18, 7.19).



Figura 7.17 - Profilo del fiume Modione con indicazione dei livelli idrici massimi simulati nel periodo 2005-2017



Figura 7.18 - Dettaglio del profilo nel tratto terminale del fiume Modione con indicazione dei livelli idrici massimi simulati nel periodo 2005-2017



Figura 7.19 - Sezione topografica del fiume Modione estratta dal dem 2mx2m a disposizione. In blu è indicato il livello medio simulato nel giorno 10/2/2009; in rosso la traccia del livello massimo raggiunto nell'intera finestra temporale simulata e in verde la traccia del livello minimo

# 7.4 Modello idrogeologico integrato dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara

# 7.4.1 Caratteristiche generali del codice MIKE SHE

Ai fini della simulazione dei processi idrodinamici sotterranei che caratterizzano il sistema idrogeologico della Piana e delle sue interazioni con il reticolo idrografico interconnesso, è stato implementato, con il codice di calcolo MIKE SHE, un modello idrogeologico integrato relativo all'acquifero della Piana.

MIKE SHE rappresenta un *framework* modellistico che consente di simulare, attraverso un approccio modulare e flessibile, i processi fisici della fase terrestre del ciclo idrologico e di tenere conto in modo completo delle interazioni tra i singoli processi del ciclo stesso.

Il codice è stato concepito per simulare le complessità che caratterizzano il ciclo idrologico completo nei sistemi idrogeologici di pianura, generalmente caratterizzati da processi di scambio acque sotterranee-superficiali in corrispondenza di aree di pianura interferenti con la dinamica idrologica superficiale, nonché spesso caratterizzate da un'alta concentrazione di pressioni antropiche.

I modelli in ambiente MIKE SHE sono specificatamente sviluppati per simulare, in ambiti idrogeologici e idrologici simili a quello in esame, i seguenti processi:

- il flusso idrico sotterraneo nella zona satura e non satura di acquiferi di pianura, con assetto stratigrafico complesso;
- gli interscambi tra acque superficiali e sotterranee nel contesto di aree di pianura caratterizzate da reti superficiali, anche complesse, attraverso l'interfaccia con il modello idrodinamico monodimensionale MIKE HYDRO River;
- l'infiltrazione verticale verso la zona satura, calcolando le aliquote di evapotraspirazione ed infiltrazione, anche in presenza di scenari colturali e irrigui complessi, che si possono riscontrare nelle aree di pianura caratterizzate da attività agricola intensiva.

Il codice si presta bene anche alla costruzione di modelli a larga maglia di tipo regionale, dai quali estrarre le condizioni al contorno per modelli locali di maggiore dettaglio.

MIKE SHE è un sistema modellistico di tipo deterministico, a parametri distribuiti, basato sui processi fisici, che implementa una soluzione numerica alle differenze finite delle equazioni che rappresentano la fase terrestre del ciclo idrologico. È sviluppato a partire dalle equazioni differenziali che descrivono i processi di scorrimento superficiale, di deflusso nella rete di drenaggio, di deflusso nei mezzi porosi saturi e insaturi. Il modulo idrologico comprende, oltre ai processi di deflusso superficiale e nella rete di drenaggio, i fenomeni di scioglimento nevoso, di intercettazione ed evapotraspirazione. Il flusso verticale nella zona insatura viene considerato come monodimensionale, di collegamento tra le componenti bidimensionale superficiale e bi-tridimensionale sotterranea.

Il codice di calcolo consente di tenere conto in modo completo delle interazioni tra i singoli processi del ciclo idrologico, permettendo di simulare ad esempio gli effetti sulla falda della gestione della risorsa idrica superficiale.

I dati di input al modello vengono ricavati dai risultati di attività di monitoraggio o di rilievi specifici sul campo e vengono inseriti all'interno del codice dopo il loro preliminare preprocessamento.

In MIKE SHE sono disponibili le seguenti tipologie di dati di input:

- serie temporali;
- dati spaziali stazionari;
- dati spaziali variabili nel tempo.

Le serie temporali sono memorizzate in file "dfs0" in formato binario e possono essere creati importando i dati da file ASCII o Excel. I dati spaziali stazionari (georiferiti) sono memorizzati in file "dfs2" in formato binario e possono essere creati importando i dati da file formato GRID o ASCII Raster, oppure importando shapefile o file ASCII di punti quotati, che sono successivamente interpolati sulla griglia di calcolo dal pre-processore di MIKE SHE. Il codice dispone infatti di un pre-processore che consente di adattare automaticamente sulla griglia di calcolo del modello i dati di input inseriti al suo interno. Anche i dati spaziali variabili nel tempo (anch'essi georiferiti) sono memorizzati in file "dfs2" in formato binario e possono essere creati come successione temporale di dati spaziali singolarmente stazionari.

Il *framework* modellistico di MIKE SHE è articolato in cinque componenti principali, che descrivono i processi fisici della fase terrestre del ciclo idrologico e le interazioni con la superficie topografica e il suolo (Figura 7.20). Tali componenti sono relative ai seguenti processi fisici:

- precipitazione atmosferica ed eventuale scioglimento nevoso (sezione *Climate* del setup del modello);
- intercettazione ed evapotraspirazione (modulo *Evapotraspiration ET*);
- scorrimento superficiale e deflusso nel reticolo idrografico (moduli *Overland Flow OL* e *River and Lakes – OC*);
- flusso nel mezzo insaturo (modulo Unsaturated flow UZ);
- flusso nel mezzo saturo (modulo *Saturated flow SZ*).

Il sistema consente di attivare o meno le singole componenti, e di scegliere il modulo di calcolo più appropriato per ciascun processo idrologico che si intende simulare, in base al livello di dettaglio della rappresentazione del sistema che meglio risponde alle finalità dello studio, nonché in base alla disponibilità dei dati necessari alla loro messa a punto, secondo un approccio modulare e flessibile.

Ad esempio, il flusso nel mezzo saturo (SZ) può essere simulato con il metodo semplificato del *linear reservoir* o con il metodo fisicamente basato e pienamente distribuito delle differenze finite. Quest'ultimo metodo permette di simulare il flusso tridimensionale in un acquifero eterogeneo in condizioni idrodinamiche che variano da quelle di un acquifero a falda libera a quelle di un acquifero a falda confinata. Con il metodo delle differenze finite le variazioni spaziali e temporali del carico idraulico della falda sono descritte matematicamente dall'equazione di Darcy tridimensionale e risolte numericamente con la tecnica iterativa implicita alle differenze finite, che si basa su una discretizzazione a maglia regolare del dominio di calcolo.



Figura 7.20 - Processi idrologici simulati e loro schematizzazione concettuale in MIKE SHE

Con tale metodo MIKE SHE permette di discretizzare verticalmente il dominio del modello tramite la definizione di *geological layers* e *geological lenses*, cioè rispettivamente unità idrogeologiche estese per tutto il dominio e subunità idrogeologiche presenti in modo discontinuo al suo interno, alle quali vengono assegnati, come dati di input, i relativi parametri geometrici ed idrogeologici.

Inoltre i processi di deflusso superficiale e di interscambio fiume-falda possono essere simulati in dettaglio, utilizzando in maniera accoppiata il codice idrodinamico MIKE HYDRO River – HD per il deflusso superficiale e MIKE SHE per la modellazione del moto della falda. L'accoppiamento dinamico tra MIKE HYDRO River e MIKE SHE avviene attraverso i *"river links*", cioè tratti fluviali, schematizzati e localizzati lungo i bordi di celle adiacenti della griglia di calcolo (Figura 7.21), che possono interagire con le stesse e per i quali vengono definite le modalità di reciproco interfacciamento.



Figura 7.21 - "River links" di collegamento tra la griglia di calcolo di MIKE SHE ed il reticolo idrografico di MIKE HYDRO River

Il sistema permette altresì di risolvere ciascun processo nella scala spaziale e temporale che lo caratterizza. In particolare il codice consente di cambiare il passo di calcolo a seconda del processo simulato, per tenere conto, ad esempio, del fatto che i deflussi superficiali rispondono rapidamente agli eventi di pioggia, mentre i flussi idrici sotterranei rispondono molto più lentamente.

È così possibile costruire modelli con differente grado di "complessità", consentendo all'utente di implementare inizialmente un modello semplificato, limitando in tal modo i parametri di calibrazione, e di sviluppare successivamente modelli dedicati alla simulazione di processi specifici, attraverso un'attività in progress, funzione dei dati effettivamente disponibili e delle finalità specifiche del modello.

# 7.4.2 Impostazione del modello idrogeologico integrato

Con riferimento all'applicazione del sistema MIKE SHE alla Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, visti gli obbiettivi del modello integrato, costituiti in particolare dalla rappresentazione dell'idrodinamica sotterranea dell'acquifero e delle sue interazioni con i deflussi idrici superficiali, i processi simulati dal modello sono stati la ricarica dell'acquifero, lo scorrimento superficiale (solo per la parte necessaria a valutare gli scambi fiume-falda), il deflusso nel reticolo idrografico, il flusso nella zona satura comprensivo dei relativi emungimenti. Nel modello implementato le componenti di intercettazione ed evapotraspirazione e di flusso nel mezzo insaturo (moduli *ET* e 132

*UZ*), quest'ultimo comprensivo dei relativi apporti irrigui, non sono state utilizzate e la ricarica verticale dell'acquifero è stata calcolata considerando solo gli apporti meteorici, secondo l'approccio semplificato illustrato più avanti (cfr. paragrafo 7.4.2.1).

Vista, infatti, la complessità del sistema fisico da rappresentare nelle sue molteplici componenti (geologico-stratigrafiche, idrologico-idrogeologiche, di uso del territorio) e vista l'indisponibilità parziale o totale di alcuni dati di input richiesti dai moduli *ET* e *UZ*, si è scelto di implementare, nell'ambito dell'attuazione del POA acque sotterranee, un modello integrato semplificato della Piana, volto a rappresentare i processi fisici di interesse con un grado di schematizzazione adeguato ad un primo *step* di modellizzazione del bacino. Questo primo *step* può costituire la base per sviluppi successivi dell'applicazione, in relazione all'eventuale necessità di dettagliare maggiormente i processi già rappresentati o di simularne altri ad oggi non considerati, ed in funzione di eventuali nuovi dati resisi nel frattempo disponibili.

Nel modello implementato i processi fisici di interesse sono stati simulati in regime transitorio, al fine di:

- valutare le interazioni (scambi idrici) tra l'acquifero ed il reticolo idrografico del bacino del Fiume Modione (reticolo interagente), seguendone l'evoluzione temporale in relazione all'idrodinamica fluviale e della falda idrica sotterranea;
- valutare la risposta idrodinamica dell'acquifero alle sollecitazioni naturali ed antropiche, tempovarianti, che agiscono su di esso.

Il periodo di riferimento da utilizzare per le simulazioni in regime transitorio è stato scelto in funzione della scala temporale dei fenomeni da rappresentare e della significatività dei risultati da ottenere, nonché della disponibilità dei dati di input necessari, tenendo in considerazione anche l'esigenza di contenere i tempi di preprocessing dei dati ed i tempi di calcolo.

E' stato pertanto scelto come dominio temporale del modello il periodo compreso tra il 2005 ed il 2017, in quanto sufficientemente lungo da consentire di effettuare valutazioni di bilancio idrico a medio-lungo termine dell'acquifero (in cui i volumi idrici considerati sono valori annui medi relativi ad un periodo idrologico sufficientemente rappresentativo) e di analizzare il comportamento idrodinamico sul medio-lungo periodo dell'acquifero, in risposta alle sollecitazioni naturali ed antropiche. L'intervallo temporale 2005-2017 è stato scelto anche per la disponibilità, nelle stazioni di misura selezionate, di dati meteoclimatici per la valutazione degli apporti meteorici e di dati piezometrici per la calibrazione del flusso nella zona satura (non sono disponibili dati idrologici nel periodo temporale considerato per la calibrazione del deflusso nel reticolo idrografico).

Per quanto concerne invece il dominio spaziale del modello, questo è stato identificato nell'area dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, la cui perimetrazione è stata effettuata nell'ambito del presente studio (cfr. paragrafo 4.2) e che è stata parzialmente semplificata per adattarla alla scala regionale prescelta per l'implementazione del modello integrato (cfr. paragrafo 7.4.3). Tale area comprende, oltre al territorio di pianura a sud degli abitati di Castelvetrano e Campobello di Mazara, anche parte del territorio collinare nell'intorno ed a sud-ovest dell'abitato di Partanna, per un'estensione areale complessiva pari a 258.6 km<sup>2</sup>.

Si descrivono di seguito gli elementi principali del modello implementato, in termini di processi simulati e della relativa schematizzazione modellistica adottata.

#### 7.4.2.1 Ricarica dell'acquifero

Il codice MIKE SHE può calcolare la ricarica dell'acquifero derivante dagli apporti meteorici con differenti metodi e livelli di approssimazione (formule di evapotraspirazione, simulazione della zona insatura con equazione di Richards, ecc...).

Come precedentemente accennato, la scelta dell'approccio impiegato per il calcolo della ricarica meteorica è stata dettata prevalentemente dalla disponibilità dei dati di input rispetto a quelli richiesti dal codice, senza trascurare gli aspetti pratici legati alla riduzione dei tempi di preprocessing dei dati di input e dei tempi di calcolo.

Nel modello implementato, relativo all'acquifero della Piana, la ricarica meteorica (Infiltrazione efficace  $I_e$ ) è stata calcolata con un approccio semplificato a partire dai dati dell'eccedenza idrica W, ottenuta secondo la procedura descritta nel paragrafo 5.1.1, e dai dati del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo CIP<sub>tot</sub>, ottenuto secondo la procedura descritta nel paragrafo 5.1.2. In particolare, una volta calcolata la serie temporale dei dati di eccedenza idrica ed elaborata la mappa del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo relativo al territorio in esame, tali dati sono stati inseriti in input al modello, al fine di calcolare la serie temporale dell'infiltrazione efficace  $I_e$  nel periodo considerato.

La ricarica verticale dell'acquifero legata agli apporti irrigui al sistema non è stata considerata nell'implementazione del modello, in quanto i dati raccolti sui volumi irrigui erogati dai consorzi di bonifica TP1 e AG3, rappresentati da volumi annui concessi e destinati ai comprensori irrigui di rispettiva pertinenza (Tabella 5.7), sono riferiti alla superficie complessiva delle aree servite da ciascuno dei due consorzi, che si estende ben oltre la perimetrazione dell'acquifero della Piana (cfr. Figura 5.9). Non si dispone invece di dati relativi ai volumi realmente erogati alle superfici irrigue

ricadenti all'interno di detta perimetrazione, né di regole operative di priorità, che consentano, nota anche la domanda irrigua legata alla tipologia colturale presente nei comprensori, di ricavare un dato affidabile relativo al volume irriguo annuo apportato al sistema idrogeologico. D'altro canto le valutazioni preliminari effettuate con i dati disponibili hanno consentito di stimare un volume medio annuo presunto immesso nel sistema (nell'ipotesi di un'equa ripartizione degli apporti a tutta la superficie servita) pari a 1,7 Mm<sup>3</sup>/anno erogati dal consorzio TP1 e 1,9 Mm<sup>3</sup>/anno erogati dal consorzio AG3, che corrispondono rispettivamente a 26,3 mm/a nel settore occidentale del bacino della Piana e 27,9 mm/a nel settore orientale. Visti gli apporti irrigui in gioco, e considerato che essi sono generalmente concentrati nel semestre maggio-ottobre, periodo in cui a causa delle prevalenti condizioni di deficit idrico dei suoli è ragionevole supporre che gli apporti irrigui vadano esclusivamente a ripristinare la capacità di campo e non determinino infiltrazione efficace, si ritiene che la semplificazione adottata per il calcolo della ricarica verticale dell'acquifero nel modello rappresenti adeguatamente la realtà fisica del sistema.

#### 7.4.2.2 Deflusso nel reticolo idrografico

Viste la finalità del modello integrato, che è quella di rappresentare l'idrodinamica sotterranea dell'acquifero ed i flussi di scambio con il reticolo idrografico interconnesso, il modulo *Overland Flow* (*OL*) è stato attivato solo per valutare gli scambi fiume-falda in corrispondenza dei tratti fluviali interagenti con l'acquifero.

Nel caso di studio, una volta individuati all'interno del bacino del Modione i tratti del reticolo idrografico che possono interagire con la falda idrica sotterranea (*river links*), il flusso di scambio tra la zona satura dell'acquifero ed il reticolo fluviale in corrispondenza dei *river links* è stato calcolato tenendo conto della conducibilità idraulica sia dell'acquifero che del materiale costituente il fondo alveo. Tale approccio di calcolo è stato adottato per tenere conto della presenza, in corrispondenza dell'alveo fluviale del reticolo idrografico del Modione, di estesi affioramenti di depositi alluvionali con grado di permeabilità differente in funzione della granulometria eterogenea che li caratterizza, come specificato nella relazione del P.A.I. del Bacino idrografico del Fiume Modione (Regione Siciliana, 2006). Il flusso di scambio è stato pertanto calcolato presupponendo una resistenza al flusso sia nella zona satura dell'acquifero, sia nei depositi alluvionali di fondo alveo, e per il calcolo della componente di resistenza associata ai depositi di fondo alveo è stato utilizzato un coefficiente di dispersione del letto fluviale (*leakage coefficient*), il cui valore, inizialmente stimato da dati di letteratura, è stato successivamente affinato con procedura iterativa in fase di calibrazione del modello (cfr. paragrafo 7.4.4).

### 7.4.2.3 Flusso nella zona satura

Nel modello implementato è stato scelto il metodo delle differenze finite per la simulazione del flusso idrico tridimensionale nella zona satura. Per la discretizzazione verticale del sistema ci si è basati sul modello concettuale idrogeologico preliminare dell'acquifero, elaborato nell'ambito del presente studio e sinteticamente descritto nel paragrafo 4.5. Il sistema è stato quindi schematizzato con un solo *layer* di calcolo, corrispondente all'acquifero a falda libera, localmente multifalda, identificato nella Piana all'interno del *complesso idrogeologico calcarenitico-sabbioso* descritto al paragrafo 3.2.

Il locale assetto multifalda dell'acquifero, riconosciuto nell'area compresa tra C.da Bresciana e C.da Canalotto Favata, è stato modellizzato assimilandolo all'assetto di un acquifero monofalda equivalente (Castany, 1985), data la struttura semplice dell'acquifero caratterizzato da un unico serbatoio costituito da depositi calcarenitico-sabbiosi con intercalazioni argilloso-limose (cfr. paragrafo 3.2). Il locale assetto multifalda è stato quindi modellizzato tramite lo stesso *layer* di calcolo rappresentativo dell'acquifero a falda libera, variando successivamente in fase di calibrazione i valori di conducibilità idraulica dell'unità, al fine di riprodurre l'andamento dei livelli piezometrici osservati nel piezometro "Bresciana" della rete di monitoraggio gestita dal Servizio Osservatorio delle Acque della Regione Siciliana. Tale scelta è stata dettata dalla difficoltà di rappresentare adeguatamente, sulla base dei dati geologico-stratigrafici raccolti, la localizzazione in profondità, lo spessore e la geometria delle intercalazioni argillose discontinue che svolgono complessivamente il ruolo di acquitardo locale interposto tra i termini prevalentemente sabbioso-calcarenitici della Fm. Marnoso-Arenacea della Valle del Belice (MABc), determinando localmente l'assetto multifalda dell'acquifero.

#### 7.4.2.4 Prelievi dall'acquifero

MIKE SHE consente di includere nella simulazione del flusso saturo i pozzi per l'emungimento delle acque sotterranee. Le serie temporali dei prelievi e i dati caratteristici dei pozzi in emungimento possono essere inseriti nel modello con differenti livelli di dettaglio, in funzione della qualità e dell'affidabilità dei dati disponibili. È infatti possibile inserire prelievi localizzati, in corrispondenza di pozzi a coordinate e caratteristiche note, oppure, in mancanza di questi dati, inserire prelievi diffusi, tramite processi di aggregazione a scala opportuna dei dati di partenza. Solitamente la valutazione dei prelievi di acque sotterranee rappresenta uno degli elementi maggiormente problematici nell'ambito dell'analisi del bilancio idrico di un sistema idrogeologico, sia per la difficoltà di ottenere una mappatura sufficientemente completa dei pozzi idrici in

emungimento, sia per la frammentarietà o limitata affidabilità dei dati disponibili relativi ai volumi effettivamente emunti dalle singole utenze.

Nel caso di studio i dati degli emungimenti dall'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, ottenuti a partire dai volumi annui di prelievo comunicati dagli enti gestori delle risorse idriche vincolate PRGA (pozzi idropotabili) o stimati a partire dai dati di concessione rilasciata alle singole utenze (pozzi ad uso irriguo, domestico, industriale, igienico-sanitario, altro), sono stati inseriti nel modello con il massimo dettaglio offerto dal sistema, inserendo quindi solo prelievi localizzati (pozzi georeferenziati). Per ciascuno dei pozzi in emungimento sono stati quindi specificati i dati costruttivi richiesti dal sistema (quota e profondità del pozzo e quote del tratto fenestrato) e definite le serie temporali dei prelievi nel periodo considerato per le simulazioni modellistiche (2005-2017). Nel paragrafo 7.4.3.8 sono descritte le modalità di compilazione del database dei prelievi idrici inserito nel modello integrato regionale dell'acquifero della Piana.

## 7.4.3 Messa a punto del modello idrogeologico integrato

L'interfaccia utente di MIKE SHE consente, attraverso un albero di gestione delle varie *tasks* del modello, di seguire l'intero flusso di lavoro: dalla messa a punto, con l'inserimento dei dati di setup, al preprocessing dei dati di input, alla simulazione, all'analisi dei risultati ottenuti.

Per il set-up del modello sono state innanzitutto definite le specifiche della simulazione, attivando i moduli di interesse (*Overland flow - OL*, *River and Lakes – OC*, *Saturated flow – SZ*), specificando il periodo della simulazione ed impostando i passi di calcolo ed i parametri di controllo computazionali utilizzati nella ricerca della soluzione.

È stato quindi definito il dominio spaziale del modello, sulla base della perimetrazione del sistema idrogeologico della Piana effettuata nell'ambito del presente studio (cfr. paragrafo 4.2) e parzialmente semplificata al fine di adattarla alla scala regionale prescelta per l'implementazione del modello numerico integrato. Il dominio spaziale così definito, esteso complessivamente 258.6 km<sup>2</sup>, è stato discretizzato secondo una griglia di calcolo regolare alle differenze finite, con lato della maglia pari a 200 m, disposta su 105 righe e 148 colonne, per un totale di 15540 celle di calcolo attive. Nella Figura 7.22 è riportata la finestra di set-up del modello con visualizzato il dominio di calcolo, definito sulla base dello shapefile della perimetrazione semplificata dell'acquifero.

Per il dato relativo alla superficie topografica, che costituisce il limite superiore del modello, è stato inserito il grid del DTM (modello digitale del terreno) dell'area a passo 200 m, ottenuto per

ricampionamento del DTM a maggiore risoluzione inizialmente disponibile, al fine di mantenere la coerenza tra i dati di input inseriti e la griglia di calcolo selezionata per il modello a scala regionale. In Figura 7.23 è riportata la visualizzazione ed una finestra di esempio dei valori di elevazione della superficie topografica nel formato grid df2.



Figura 7.22 - Finestra di set-up del modello con visualizzato il dominio di calcolo (sullo sfondo la carta geolitologica dell'area)



Figura 7.23 - Topografia del dominio del modello (visualizzazione e finestra di esempio dei valori di elevazione nel formato grid df2)

# 7.4.3.1 Precipitazioni nette

Sono state inserite, in input al modello, le serie temporali dei valori medi mensili di precipitazione netta (quota parte della precipitazione disponibile per il deflusso idrico totale, cioè l'eccedenza idrica W) relativi al periodo 2005-2017, calcolati, secondo la metodologia di Thornthwaite & Mather (1957) descritta al paragrafo 5.1.1, a partire dalle registrazioni di pioggia e temperatura delle 4 stazioni selezionate per la caratterizzazione termo-pluviometrica recente di medio periodo del sistema idrogeologico (cfr. paragrafo 3.3). Tali stazioni, la cui anagrafica è riportata in Tabella 3.3 ed i cui dati di eccedenza idrica media mensile nel periodo 2005-2017 sono riportati in Tabella 5.1, sono: Mazara del Vallo, Diga Trinità, Castelvetrano, Santa Ninfa.

Le serie temporali di precipitazione netta relative alle suddette stazioni sono state assegnate alle porzioni della Piana di rispettiva influenza, calcolate con il metodo dei topoieti, inserendo in input al modello lo shapefile dei poligoni di Thiessen precedentemente predisposto (cfr. paragrafo 3.3). In Figura 7.24 è mostrata la finestra di assegnazione delle serie temporali di precipitazione netta alle singole aree di influenza dei pluviometri.



Figura 7.24 - Finestra di assegnazione delle serie temporali di precipitazione netta alle aree di influenza dei pluviometri

## 7.4.3.2 Frazione d'infiltrazione

Ai fini del calcolo dell'infiltrazione efficace  $I_e$ , pari alla ricarica meteorica dell'acquifero, è stata inserita in input al modello la mappa del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo CIP<sub>tot</sub> della Piana, calcolato secondo la procedura descritta la paragrafo 5.1.2, il quale costituisce la frazione della precipitazione netta che si infiltra nel sottosuolo. In Figura 7.25 è riportata la mappa del CIP<sub>tot</sub> inserita come grid dfs2 all'interno del modello.



Figura 7.25 - Mappa del CIP<sub>tot</sub> inserita come grid dfs2 all'interno del modello

# 7.4.3.3 Collegamento con il reticolo fluviale

Per quanto riguarda gli scambi con il reticolo idrografico, l'analisi delle interazioni fiume-falda è stata limitata ai tratti del reticolo del fiume Modione che, sulla base dell'assetto geologico ed idrogeologico della Piana, sono risultati potenzialmente interagenti con l'acquifero: quindi il canale Ricamino ed i tratti del fiume Modione che attraversano i terreni del complesso calcarenitico-sabbioso dell'acquifero della Piana. In Figura 7.26 è riportata la finestra di collegamento di MIKE SHE con MIKE HYDRO River e la visualizzazione dei *river links* definiti nel modello, per i quali è stata definita la modalità di calcolo della conduttanza del tipo "*aquifer + river bed*" ed assegnato un valore medio uniforme, per ciascuno dei tratti fluviali interconnessi con l'acquifero, del coefficiente di dispersione del letto fluviale (*leakage coefficient*), inizialmente stimato sulla base di dati di letteratura e successivamente affinato in fase di calibrazione del modello (cfr. paragrafo 7.4.4).



Figura 7.26 - Finestra di collegamento del modello MIKE SHE con il modello MIKE HYDRO River e visualizzazione dei "river links"

### 7.4.3.4 Parametrizzazione della zona satura dell'acquifero

I parametri necessari al modello per la simulazione del flusso nella zona satura sono lo sviluppo geometrico dell'acquifero (in particolare la ricostruzione dell'andamento della sua superficie di base) ed i parametri idrodinamici del materiale. Questi ultimi sono rappresentati dalla conducibilità idraulica orizzontale  $K_o$  e verticale  $K_v$  (entrambe espresse in m/s), e dai parametri adimensionali porosità efficace ( $S_y$ ) e coefficiente di immagazzinamento ( $S_s$ ).

Nel modello implementato la parametrizzazione della zona satura dell'acquifero ha previsto l'inserimento nel codice di calcolo dei seguenti dati:

- carta dell'andamento altimetrico della superficie di base dell'acquifero, elaborata secondo la metodologia descritta nel paragrafo 4.2 ed inserita nel modello come grid a passo 200 m. Tale carta è riportata in Figura 7.27;
- carta della distribuzione dei valori di conducibilità idraulica orizzontale K<sub>o</sub> dell'acquifero, ottenuta per interpolazione dei dati puntuali di conducibilità ricavati da prove di pozzo, condotte sul campo o documentate nelle rispettive basi-dati di provenienza (cfr. paragrafo 4.3). La distribuzione dei valori di K<sub>o</sub> così ottenuta, riportata in Figura 7.28, rappresenta una prima stima dei valori di conducibilità idraulica orizzontale dell'acquifero, basata sui dati disponibili. Tale distribuzione è stata oggetto di successivi affinamenti nella fase di calibrazione del modello (cfr. paragrafo 7.4.4 e 7.4.5.1);

- conducibilità idraulica verticale dell'acquifero K<sub>v</sub>, che in mancanza di dati specifici è stata posta pari al 10% della K<sub>o</sub>;
- porosità efficace  $S_y$  e coefficiente di immagazzinamento  $S_s$ , assunti in prima approssimazione costanti ( $S_y=0.3$ ;  $S_s=0.3$  m<sup>-1</sup>), sulla base di dati di letteratura relativi ai valori caratteristici delle proprietà idrauliche di acquiferi arenitico-sabbiosi, nonché sulla base dell'assetto idraulico dell'acquifero in esame (acquifero a falda libera).



Figura 7.27 - Carta dell'andamento altimetrico della superficie di base dell'acquifero



Figura 7.28 - Distribuzione dei valori di conducibilità idraulica orizzontale dell'acquifero: prima ricostruzione basata sui dati di campo disponibili
#### 7.4.3.5 Condizioni iniziali di carico piezometrico

Ai fini dell'implementazione del modello è necessario assegnare le condizioni iniziali di carico piezometrico relative allo strato di calcolo che rappresenta la zona satura dell'acquifero. Le condizioni iniziali di carico piezometrico costituiscono il punto di partenza per le simulazioni del flusso idrico sotterraneo in regime transitorio. Nel caso di studio, per il set-up preliminare del modello, è stata utilizzata come condizione iniziale di carico la ricostruzione della superficie piezometrica dell'acquifero relativa all'anno 1999, ottenuta a partire dalla carta ad isopiezometriche prodotta nell'ambito dello studio idrogeologico effettuato da Bonanno et al. (2000), che rappresenta il dato regionalizzato più recente disponibile sull'andamento della superficie piezometrica dell'acquifero (Figura 7.29). In un successivo affinamento del modello, la condizione iniziale di carico nella zona satura è stata variata in base ai risultati delle prime simulazioni, al fine di introdurre una condizione iniziale coerente con l'assetto idrodinamico dell'acquifero all'inizio del periodo simulato (2005). In Figura 7.30 è riportata la ricostruzione della superficie piezometrica dell'acquifero utilizzata, nel modello definitivo, come condizione iniziale di carico.



Figura 7.29 - Superficie piezometrica dell'acquifero nel 1999 utilizzata nel modello come condizione iniziale preliminare di carico piezometrico (a destra è mostrato il grid ricostruito a partire dalla carta ad isopiezometriche di Bonanno et al., 2000, mostrata a sinistra)



Figura 7.30 - Condizione iniziale di carico piezometrico utilizzata nel modello integrato definitivo

### 7.4.3.6 Condizioni al contorno esterne

Il codice permette di scegliere diverse condizioni al contorno esterne, poste lungo il perimetro del dominio spaziale del modello, relative allo strato di calcolo che rappresenta la zona satura dell'acquifero: si tratta di condizioni di carico, di flusso o di gradiente imposto (costanti o variabili nel tempo) e condizioni di flusso nullo. Nel caso di studio le tipologie di condizioni al contorno della zona satura sono state assegnate sulla base delle condizioni ai limiti laterali dell'acquifero individuate nell'ambito dell'elaborazione del modello concettuale idrogeologico preliminare del sistema (paragrafi 4.2 e 4.5).

Sono state pertanto assegnate le seguenti condizioni al contorno lungo le celle di calcolo perimetrali del dominio (Figura 7.31):

tratto 1-2: lungo il margine sud-orientale dell'acquifero, tra l'intersezione nord con l'alveo del fiume Belice (punto 1) e l'intersezione con l'incisione dell'affluente Muretta (punto 2), è stata assegnata una condizione al contorno di carico imposto, derivante dalla presenza di una condizione di tipo "fiume drenante" lungo il tratto perimetrale dell'acquifero che lambisce l'alveo del fiume Belice e dalla presenza di una condizione di tipo "sorgente per limite di permeabilità definito" lungo il restante tratto di questo segmento perimetrale

(dall'intersezione sud con l'alveo del fiume Belice all'intersezione con l'incisione col torrente Muretta). Tale condizione al contorno di carico imposto è stata definita in tutto il tratto 1-2 a partire dall'andamento altimetrico del substrato, che in tale zona perimetrale, caratterizzata da spessori estremamente ridotti di acquifero, è molto prossimo alla superficie topografica;

- <u>tratto 2-3</u>: lungo il margine centro-meridionale dell'acquifero, dall'intersezione con l'incisione fluviale dell'affluente Muretta (punto 2) all'intersezione con la linea di costa (punto 3), è stata assegnata una condizione al contorno di flusso nullo, derivante dal contatto con gli affioramenti a basso grado di permeabilità delle argille del Santerniano-Emiliano (limite geologico) e dall'assetto idrodinamico locale dell'acquifero;
- <u>tratto 3-4</u>: lungo il margine meridionale ed occidentale costiero dell'acquifero, dal punto 3 al punto 4 in figura 7.31, è stata assegnata una condizione al contorno di carico imposto pari a zero derivante dalla quota del livello del mare;
- tratto 4-1: lungo il margine settentrionale e nord-orientale dell'acquifero, in corrispondenza del contatto con gli affioramenti a basso grado di permeabilità del complesso idrogeologico argilloso-marnoso, è stata assegnata una condizione al contorno di flusso nullo (limite geologico).



Figura 7.31 - Condizioni al contorno esterne al dominio spaziale del modello della zona satura dell'acquifero

#### 7.4.3.7 Drenaggio in zona satura

Il drenaggio in zona satura è un particolare tipo di condizione al contorno usato da MIKE SHE per definire i sistemi di drenaggio, naturali o artificiali, che non possono essere definiti dalla rete fluviale principale, quali il reticolo idrografico secondario o il deflusso subsuperficiale. Con tale tipo di condizione al contorno la quantità d'acqua che viene rimossa dalla zona satura in corrispondenza del dreno è funzione del carico piezometrico dell'acquifero e del livello del dreno, posto ad una quota assegnata rispetto alla topografia locale.

Nel caso di studio, per rappresentare il drenaggio della zona satura dell'acquifero operato dal reticolo idrografico secondario o causato dal locale affioramento della superficie piezometrica è stata introdotta la condizione al contorno del drenaggio in zona satura, con un livello del dreno posto uniformemente a -0.5 m dal piano campagna in tutta l'area del modello, ed inserendo l'opzione di rimuovere dal sistema i volumi di acqua drenata dalla zona satura.

#### 7.4.3.8 Pozzi di emungimento

I dati relativi ai pozzi in emungimento vengono inseriti nell'ambito del codice MIKE SHE in uno specifico formato di database (file "wel"), collegato al modello di simulazione, che consente l'inserimento dei dati caratteristici dei pozzi ricadenti all'interno del territorio di interesse e di collegare loro le serie temporali dei prelievi idrici effettuati (file dfs0).

Nel caso di studio il database dei pozzi in emungimento relativi alla Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara è stato popolato con i dati di 416 punti di emungimento, comprendenti tutti i pozzi per uso idropotabile in esercizio ricadenti all'interno del dominio spaziale del modello (35 pozzi) ed una selezione dei pozzi per uso irriguo, domestico, industriale, igienico-sanitario ricadenti all'interno del dominio, effettuata, secondo i criteri descritti al paragrafo 5.2.2, a partire dalla banca dati delle concessioni idriche rilasciate dall'Amministrazione Regionale. La selezione effettuata ha portato all'individuazione di 367 pozzi per uso irriguo e 14 pozzi per uso misto (comprensivo degli usi domestico, industriale, igienico-sanitario ed altri usi) di cui inserire nel database i dati costruttivi e le serie temporali dei prelievi. In Tabella 7.3 è riportato il prospetto riepilogativo dei prelievi idrici dall'acquifero inseriti nel modello integrato, con l'indicazione del numero di pozzi in emungimento e dei relativi volumi annui stimati di prelievo per ciascuna tipologia di uso.

Tipologia di utenza	Tipologia di georeferenziazione	Numero pozzi di emungimento inseriti nel database	Volumi idrici prelevati (m <sup>3</sup> /anno)		
irriguo	dato puntuale	367	4.042.251 (*)		
idropotabile	dato puntuale	35	14.039.647 (**)		
misto	dato puntuale	14	293.042 (*)		
Totale	dato puntuale	416	18.374.940		

Tabella 7.3 - Dati relativi ai prelievi idrici dall'acquifero inseriti nel modello

<sup>(\*)</sup> volumi stimati a partire dalle concessioni rilasciate

(\*\*) volumi stimati a partire dalle portate comunicate dai gestori

I prelievi sono stati inseriti nel database di MIKE SHE come dato puntuale georeferenziato associato ai 416 pozzi di emungimento ricadenti nel dominio del modello, specificando per ciascuno dei pozzi i dati costruttivi richiesti dal sistema (quota e profondità del pozzo e quote del tratto fenestrato). Laddove questi ultimi dati non erano disponibili si è proceduto comunque ad inserirli nel database, al fine di non perdere l'informazione sui prelievi associata, tenendo conto della quota della superficie topografica, della profondità del substrato dell'acquifero e dello spessore captabile dello stesso in corrispondenza dei punti di emungimento.

Nella Figura 7.32 è riportata la finestra di gestione del database dei pozzi con la visualizzazione dei 416 punti di emungimento inseriti nel modello. In alto a sinistra nella figura è riportata l'ubicazione dei pozzi inclusi nell'analisi, in alto a destra la profondità e la posizione del tratto fenestrato del pozzo selezionato (in rosso), in basso uno stralcio del database con anagrafica dei singoli pozzi inseriti ed il collegamento al file della serie temporale dei prelievi.

A ciascuno dei pozzi è stata associata la serie temporale dei volumi emunti relativa al periodo di interesse 2005-2017. La distribuzione temporale dei prelievi è stata ricostruita sulla base del tipo di utilizzo: nel caso dei pozzi ad uso irriguo, i prelievi sono stati assunti concentrati nel semestre maggio-ottobre di ciascun anno, mentre nel caso dei pozzi ad uso idropotabile e misto i prelievi sono stati assunti distribuiti sull'intero anno.

In Figura 7.33 è riportata la schermata di visualizzazione della serie temporale dei prelievi relativi ai 367 pozzi ad uso irriguo inseriti in input al modello.



Figura 7.32 - Finestra di gestione del database dei pozzi con la visualizzazione dei 416 punti di emungimento (idropotabili, irrigui, misti) inseriti nel modello



Figura 7.33 - Schermata di visualizzazione della serie temporale dei prelievi relativi ai 367 pozzi ad uso irriguo inseriti in input al modello

Per quanto riguarda la stima dei volumi annui emunti dai singoli pozzi, questi sono stati assunti pari ai volumi annui comunicati dagli enti gestori, per i pozzi ad uso idropotabile, ed ai volumi annui indicati nelle singole pratiche di concessioni, per i pozzi ad uso irriguo e misto. Nei casi in cui tra i dati di concessione raccolti, si sia rinvenuto solo il dato sulla portata massima concessa, in assenza del dato sul volume annuo concesso, si è scelto di inserire comunque l'utenza nel database dei pozzi in emungimento. In questo caso, il volume annuo di prelievo relativo a quell'utenza è stato stimato assumendo un intervallo temporale di emungimento alla massima portata concessa pari a 2 ore al giorno.

#### 7.4.4 Calibrazione del modello idrogeologico integrato

Il modello messo a punto è stato sottoposto a procedura di calibrazione mediante affinamenti iterativi, utilizzando tutte le informazioni disponibili nel periodo temporale di riferimento considerato 2005-2017 in termini di serie temporali di dati piezometrici misurati in corrispondenza di determinati punti di osservazione del sistema (Figura 7.34). I dati utilizzati per la calibrazione del modello sono stati:

- le serie temporali dei livelli della falda idrica sotterranea rilevati nel periodo 2005-2017 in corrispondenza dei 3 piezometri della rete freatimetrica regionale, ricadenti nel corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara (piezometri "Bresciana", "Staglio 3", "Staglio 11", la cui anagrafica è riportata nella Tabella 3.1, paragrafo 3.2);
- le serie temporali dei livelli idrici dei laghi Gorgo Basso, Gorgo Medio, Gorgo Alto, Preola, Murana (che rappresentano aree di affioramento della superficie piezometrica), rilevati nel periodo maggio-dicembre 2017 in corrispondenza delle aste di misura installate a bordo lago appositamente per le finalità del presente studio.

Per la validazione del modello sono stati utilizzati i risultati delle due campagne di rilievo piezometrico effettuate da ARPA nei periodi maggio-giugno 2017 e dicembre 2017 nell'ambito del presente lavoro. In particolare la superficie piezometrica dell'acquifero ricostruita a partire dal rilievo effettuato nel mese di dicembre 2017, è stata utilizzata come riferimento per la validazione del risultato ottenuto dal modello in termini di superficie piezometrica dell'acquifero simulata alla fine del periodo considerato (24/12/2017).



Figura 7.34 - Ubicazione dei punti di osservazione utilizzati per la calibrazione del modello

Le procedure di calibrazione del modello, effettuate utilizzando le serie temporali di dati disponibili, hanno consentito di:

- valutare, in corrispondenza dei punti di osservazione (fori piezometrici ed aste idrometriche), il grado di corrispondenza tra livelli della falda idrica osservati e simulati nel periodo di riferimento considerato;
- analizzare l'influenza che le variazioni di un determinato set di parametri di input inducono sui risultati del modello, in termini di variazione nello spazio e nel tempo dei flussi e dei livelli idrici sotterranei, e individuare il set di parametri sui quali effettuare affinamenti successivi ai fini della calibrazione del modello;
- ottenere, mediante procedure iterative di variazione ed affinamento dei parametri di calibrazione (parametri caratteristici del sistema idrologico), il set di valori che minimizza lo scarto tra livelli piezometrici simulati ed osservati.

Per la calibrazione del flusso idrico sotterraneo, i parametri caratteristici del sistema idrogeologico che sono stati variati con procedura iterativa manuale del tipo *trial and error*, al fine di ottenere un soddisfacente grado di corrispondenza tra livelli piezometrici simulati ed osservati, sono stati principalmente la conducibilità idraulica orizzontale  $K_0$  e verticale  $K_v$  dell'acquifero.

La procedura di calibrazione del modello è stata articolata e complessa, specie in considerazione dei pochi dati sperimentali di conducibilità idraulica acquisiti in rapporto all'ampio *range* di variazione

del parametro che caratterizza il complesso idrogeologico calcarenitico-sabbioso della Piana, dei pochi punti di osservazione dei livelli disponibili per la calibrazione, nonché dell'approssimazione introdotta nel modello dalla scala regionale dell'analisi e dal preprocessing dei dati di input su una griglia regolare di calcolo a passo 200 m.

Una prima simulazione è stata dapprima eseguita utilizzando un set di valori iniziali di conducibilità idraulica del mezzo (cfr. Figura 7.28), derivanti dalla spazializzazione dei dati puntuali disponibili (desunti da prove di pozzo, condotte sul campo o documentate nelle rispettive basi-dati di provenienza). Nelle simulazioni successive sono state utilizzate distribuzioni di conducibilità di volta in volta differenti, ottenute per affinamenti iterativi sulla base dei risultati dei *run* precedenti e sulla base del modello concettuale idrogeologico del sistema, cercando comunque di rimanere entro il *range* di variazione del parametro riscontrato sperimentalmente in ciascuna sottoarea del dominio del modello. Una volta individuato il set dei valori di conducibilità idraulica dell'acquifero in grado di garantire un soddisfacente grado di corrispondenza tra livelli simulati ed osservati per tutti i punti di osservazione, si è passati ad affinare ulteriormente la calibrazione a livello locale, in corrispondenza dei singoli punti di osservazione.

In particolare l'affinamento successivo della calibrazione ha riguardato il piezometro Staglio 3. Infatti i livelli piezometrici simulati in corrispondenza di tale punto di osservazione, ricadente all'interno del bacino idrografico del fiume Modione a circa 750 m di distanza dall'asta fluviale principale, sono risultati, dalle analisi preliminari effettuate, sensibili alle variazioni del coefficiente di dispersione del letto fluviale (*leakage coefficient*), parametro dal quale, assieme alla conducibilità idraulica dell'acquifero, dipende l'entità degli scambi idrici fiume-falda in corrispondenza dei tratti fluviali in connessione idraulica con esso. I valori di *leakage coefficient* nei tratti fluviali interagenti, inizialmente assegnati in base a dati di letteratura, sono stati pertanto variati, in fase di calibrazione del modello, al fine di ottenere una migliore corrispondenza tra livelli simulati ed osservati nel piezometro Staglio 3.

Va detto tuttavia che, non essendo disponibili nel periodo considerato (2005-2017) serie temporali di dati di portata relativi al fiume Modione (gli ultimi dati disponibili risalgono all'anno 1982), né risultati di misure differenziali di portata effettuate lungo tale corso d'acqua, non è stato possibile effettuare la calibrazione del flusso idrico superficiale nel reticolo idrografico né del flusso di scambio fiume-falda in corrispondenza dei tratti fluviali in interconnessione con la falda. La calibrazione del modello di flusso idrico superficiale del fiume Modione potrà essere effettuata, nell'ambito di un'eventuale prosecuzione delle attività di studio, non appena saranno rese disponibili serie temporali adeguate di portate, misurate in corrispondenza della stazione

idrometrica in telemisura "Modione", per la quale sono in corso, da parte del Servizio Osservatorio delle Acque della Regione Siciliana, le attività necessarie alla definizione della scala delle portate.

I risultati ottenuti dalla calibrazione del modello, in termini di capacità di riprodurre le variazioni temporali e spaziali osservate nei livelli piezometrici dell'acquifero, attraverso le procedure iterative di affinamento sopradescritte, sono illustrati nei grafici e nelle mappe delle Figure 7.35 - 7.41 e nelle Figure 7.43-7.45 di seguito riportate.

Nelle Figure 7.35, 7.36, 7.37 sono riportati i diagrammi di confronto tra le serie temporali dei livelli piezometrici simulati e quelle dei livelli piezometrici osservati nel periodo 2005-2017 rispettivamente per le stazioni di misura "Bresciana", "Staglio 3" e "Staglio 11" della rete regionale di monitoraggio freatimetrico del corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara.

Nelle Figure 7.38, 7.39, 7.40, 7.41 sono riportati i diagrammi di confronto tra le serie temporali dei livelli idrici dei laghi Gorgo Basso, Gorgo Medio, Gorgo Alto, Preola simulati ed osservati nel periodo maggio-dicembre 2017 in corrispondenza delle aste di misura installate a bordo lago, che, come detto, rappresentano aree di affioramento della superficie piezometrica della falda idrica sotterranea.

I suddetti diagrammi riportano lungo l'asse orizzontale le date e lungo l'asse verticale i livelli espressi in metri sul livello medio del mare (i livelli simulati sono indicati con una linea a tratto continuo). Per ciascun diagramma di confronto la bontà del *fitting* ottenuto, valutato attraverso gli scarti tra valori osservati e simulati, è quantificato da indicatori statistici di sintesi.

L'analisi dei diagrammi di confronto riportati nelle Figure 7.35-7.41 mostra per tutti i punti di osservazione una buona corrispondenza tra i livelli simulati e quelli osservati, con valori dei residui, espressi in termini di *root mean square error* (RMSE), inferiori a 1 m, anche se la consistenza della serie temporale dei valori misurati in corrispondenza dei laghi è molto limitata rispetto all'intero intervallo temporale della simulazione.



Figura 7.35 - Confronto tra livelli osservati e simulati - piezometro "Bresciana"



Figura 7.36 - Confronto tra livelli osservati e simulati - piezometro "Staglio 3"



Figura 7.37 - Confronto tra livelli osservati e simulati - piezometro "Staglio 11"



Figura 7.38 - Confronto tra livelli osservati e simulati - punto di osservazione "Gorgo Basso"



Figura 7.39 - Confronto tra livelli osservati e simulati - punto di osservazione "Gorgo Medio"



Figura 7.40 - Confronto tra livelli osservati e simulati - punto di osservazione "Gorgo Alto"



Figura 7.41 - Confronto tra livelli osservati e simulati - punto di osservazione "Preola"

Per quanto riguarda il piezometro Staglio 11, che si trova a circa 9 m di distanza dall'omonimo pozzo in emungimento continuo per uso idropotabile gestito da Sicilia Acque, è stato preso in considerazione, ai fini della calibrazione del modello, soltanto un sottoinsieme dei livelli registrati nel periodo 2005-2017. È stato infatti verificato, sulla base dei dati forniti dal Servizio Osservatorio delle Acque, che i livelli della falda registrati al piezometro Staglio 11 nel periodo 2005-2017 risentono dell'effetto di periodi più o meno prolungati di spegnimento della pompa installata nel vicino pozzo ad uso idropotabile, che, alternati ai periodi del suo funzionamento, determinano oscillazioni del livello della falda dell'ordine di 10 m in corrispondenza del piezometro (Figura 7.42).



Figura 7.42 - Andamento temporale nel periodo 2005-2017 dei livelli della falda osservati nel piezometro "Staglio 11"

Poiché non è nota l'esatta articolazione temporale dei periodi di funzionamento della pompa, e quindi la serie temporale dei volumi effettivamente prelevati dal pozzo nel periodo 2005-2017, si è scelto di simulare il comportamento dell'acquifero, in termini di risposta piezometrica locale ai prelievi del pozzo Staglio 11, considerando, analogamente a quanto fatto con gli altri pozzi idropotabili (cfr. paragrafo 7.4.3.8), un andamento temporale costante dei prelievi nel pozzo, trascurando quindi i periodi di spegnimento temporaneo dell'impianto.

Per tale ragione, ai fini della calibrazione del modello, il confronto tra i livelli simulati e quelli osservati nel piezometro Staglio 11 è stato effettuato prendendo in considerazione solo i livelli dinamici registrati al piezometro durante i periodi di funzionamento dell'impianto, escludendo invece dal confronto i livelli statici relativi a periodi certi di spegnimento dello stesso (Figura 7.37).

In Figura 7.43 è riportata la mappa di confronto tra la superficie piezometrica dell'acquifero rilevata nel mese di dicembre 2017, ricostruita per interpolazione delle misure puntuali effettuate da ARPA durante la seconda campagna di rilievo piezometrico (paragrafo 4.4), e la superficie piezometrica simulata dal modello alla fine del periodo di riferimento considerato (24 dicembre 2017).

Il confronto tra le due superfici, rappresentate dalle rispettive linee isopiezometriche (in azzurro quelle simulate, in giallo quelle misurate), mostra una generale corrispondenza in termini di andamento e valori delle isopieze, evidenziando al contempo la presenza di aree caratterizzate da maggiori scostamenti tra le due superfici. Tali scostamenti possono essere attribuiti in parte a criticità nella calibrazione del modello in tali aree, ed in parte all'incertezza nella ricostruzione della superficie piezometrica sperimentale relativa al mese di dicembre 2017, basata sull'interpolazione di un ridotto numero di misure puntuali e su una loro distribuzione irregolare rispetto all'intera superficie dell'acquifero (cfr. Figura 7.44).

A conferma di ciò, l'analisi di regressione lineare effettuata tra le quote piezometriche osservate nei 66 pozzi rilevati nel mese di dicembre 2017, e le quote calcolate dal modello a fine periodo di simulazione (24/12/2017) negli stessi punti del rilievo, mostra una buona correlazione tra le due variabili, con un valore del coefficiente R<sup>2</sup> pari a 0,9556 (Figura 7.45).

Pertanto, nell'ambito di un successivo affinamento del modello integrato del sistema idrogeologico, al fine di migliorare il grado di calibrazione dello stesso, si dovrà disporre da una parte di un maggiore numero di punti di osservazione del livello piezometrico ben distribuiti sull'acquifero, e dall'altra di un numero ed una distribuzione adeguata di valori dei parametri idrodinamici dell'acquifero, ottenuti tramite prove di pompaggio, con riferimento non soltanto alla conducibilità idraulica, ma anche alla porosità efficace ed al coefficiente di immagazzinamento: di questi ultimi

infatti, in mancanza di dati disponibili relativi al sistema in esame, si è potuto effettuare ad oggi soltanto una stima basata su dati di letteratura. Inoltre, al fine di calibrare il flusso idrico superficiale nel reticolo idrografico del fiume Modione ed il flusso di scambio fiume-falda in corrispondenza dei tratti fluviali interconnessi con l'acquifero, si dovrà disporre di serie temporali di dati di portata relativi al fiume Modione e di risultati di misure differenziali di portata effettuate lungo tale corso d'acqua.



Figura 7.43 - Confronto tra superficie piezometrica rilevata nel dicembre 2017 (isopieze in giallo) e superficie piezometrica simulata dal modello nel dicembre 2017 (isopieze in azzurro). In rosso sono indicati i corsi d'acqua, in blu i limiti dei relativi bacini idrografici



Figura 7.44 - Ubicazione dei 66 pozzi rilevati nella campagna piezometrica del dicembre 2017



Figura 7.45 - Regressione lineare tra le altezze piezometriche rilevate nel mese di dicembre 2017 e le altezze piezometriche simulate dal modello al 24 dicembre 2017

## 7.4.5 Risultati del modello idrogeologico integrato

Gli obiettivi principali dell'attività di implementazione del modello integrato regionale del sistema idrogeologico della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara sono stati (cfr. paragrafo 7.1):

- caratterizzare, nel periodo di riferimento delle analisi modellistiche, la risposta idrodinamica dell'acquifero alle sollecitazioni naturali (ricarica) ed antropiche (prelievi) che agiscono su di esso;
- rappresentare i deflussi idrici sotterranei e la dinamica di interazione tra acque sotterranee e superficiali del sistema;
- effettuare la valutazione del bilancio idrico annuo medio dell'acquifero, utile ai fini dell'aggiornamento della valutazione dello stato quantitativo del corpo idrico sotterraneo;
- estrarre le condizioni al contorno per il modello locale di flusso relativo alla zona dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi.

In relazione agli obiettivi previsti, i risultati ottenuti dalla messa a punto e calibrazione del modello integrato regionale del sistema idrogeologico della Piana sono stati:

 l'elaborazione delle carte di distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale e verticale dell'acquifero;

- l'elaborazione della serie temporale, relativa al periodo 2005-2017, della distribuzione dell'infiltrazione efficace, pari alla ricarica dell'acquifero;
- l'elaborazione della serie temporale, relativa al periodo 2005-2017, dell'andamento della superficie piezometrica e dei deflussi idrici sotterranei;
- l'elaborazione delle serie temporali, relative al periodo 2005-2017, delle mappe di distribuzione dei flussi di scambio con i tratti fluviali interconnessi e dei flussi di drenaggio dalla zona satura;
- la valutazione del bilancio idrico a medio-lungo termine dell'acquifero, attraverso l'estrazione dei dati di bilancio relativi all'anno medio sul periodo 2008-2017, a partire dai risultati del modello di simulazione integrato calibrato;
- l'individuazione della condizione al contorno orientale per il modello di flusso locale relativo alla zona dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi (cfr. capitolo 8), a partire dalla ricostruzione della superficie piezometrica media dell'acquifero nel periodo 2008-2017.

I risultati ottenuti dal preprocessing dei dati di input e dalle simulazioni del modello numerico regionale sono stati utilizzati per rivedere o affinare il modello concettuale idrogeologico preliminare dell'acquifero, elaborato sulla base dei dati esistenti raccolti e degli ulteriori dati prodotti nel corso della prima parte dello studio.

Si descrivono di seguito i principali risultati ottenuti dal modello.

# 7.4.5.1 Carte di distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale e verticale dell'acquifero

Al termine della calibrazione del modello sono state individuate, per affinamenti successivi a partire dai dati puntuali di K ricavati da prove di pozzo, le mappe di distribuzione dei valori di conducibilità idraulica orizzontale  $K_o$  e verticale  $K_v$  dell'acquifero che consentono di minimizzare gli scarti tra valori misurati e valori simulati del livello piezometrico in corrispondenza dei punti di osservazione. Tali mappe sono riportate nelle Figure 7.46 e 7.47.

I valori di conducibilità idraulica orizzontale ottenuti sono compresi entro un *range* di variazione coerente con quello riscontrato sperimentalmente a partire dai valori puntuali di K ricavati dalle prove di pompaggio (Tabella 7.4). L'ampio *range* di valori ottenuti è compatibile con l'eterogeneità delle caratteristiche di permeabilità (tipologia e grado) del complesso idrogeologico calcarenitico-sabbioso che ospita l'acquifero, ed in particolare della Formazione Marnoso-Arenacea della Valle

del Belice. La mappa ottenuta individua nel settore centro-meridionale della Piana un'ampia zona, caratterizzata da un valore medio di conducibilità orizzontale (2.7\*10<sup>-5</sup> m/s) più basso rispetto al resto dell'acquifero, al cui interno ricade l'area compresa tra C.da Bresciana e C.da Canalotto Favata. Ciò è coerente con il modello concettuale preliminare elaborato (cfr. paragrafi 3.2, 4.2 e 4.5), che individua in tale zona la presenza di intercalazioni e lenti argillose discontinue all'interno dei termini sabbioso-calcarenitici della Fm. Marnoso-arenacea della Valle del Belice ed in parte delle soprastanti Calcareniti di Marsala, le quali svolgono complessivamente il ruolo di acquitardo locale interposto tra i terreni più permeabili, determinando un locale assetto multifalda dell'acquifero.

Tabella 7.4 - Confronto tra i valori di conducibilità idraulica ottenuti dalla calibrazione del modello ed i valori sperimentali puntuali ottenuti da prove di pompaggio

	Valore massimo	Valore minimo	Valore medio	Deviazione standard
Conducibilità idraulica orizzontale ottenuta al termine della calibrazione (statistiche sull'intera area del modello)	8.0*10 <sup>-3</sup> m/s	4.0*10 <sup>-6</sup> m/s	1.3*10 <sup>-4</sup> m/s	2.2*10 <sup>-4</sup> m/s
Conducibilità idraulica ricavata da dati sperimentali puntuali (statistiche su 41 prove di pompaggio)	8.0*10 <sup>-3</sup> m/s	2.2*10 <sup>-6</sup> m/s	3.6*10 <sup>-4</sup> m/s	1.4*10 <sup>-3</sup> m/s



Figura 7.46 - Carta dei valori di conducibilità idraulica orizzontale  $K_o$  dell'acquifero ottenuta al termine delle procedure di calibrazione del modello



Figura 7.47 - Carta dei valori di conducibilità idraulica verticale  $K_v$  dell'acquifero ottenuta al termine delle procedure di calibrazione del modello

## 7.4.5.2 Serie temporale della distribuzione dell'infiltrazione efficace nell'acquifero

È stato restituito, tra i risultati del modello, l'andamento temporale della ricarica dell'acquifero relativo al periodo di simulazione 2005-2017, attraverso il calcolo dell'infiltrazione efficace  $I_e$  a partire dai dati dell'eccedenza idrica e del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo inseriti come dati di input al modello (paragrafi 7.4.3.1 e 7.4.3.2).

In particolare è stata restituita, per ciascuno *step* mensile del periodo di simulazione, la mappa di distribuzione spaziale del valore medio mensile dell'infiltrazione efficace, espressa in mm/giorno, relativa all'acquifero. In Figura 7.48 è riportata la serie temporale della distribuzione di I<sub>e</sub> relativa al mese più piovoso (solitamente compreso tra gennaio e marzo) di ciascun anno del periodo considerato. Il valore medio areale di infiltrazione efficace sulla superficie dell'acquifero, relativo al mese più piovoso di ciascun anno, varia da un massimo di 3.75 mm/giorno, riscontrato nel gennaio 2017, ad un minimo di 0.66 mm/giorno, riscontrato nel gennaio 2008, con una media nel periodo di 1.96 mm/giorno.

La ricarica totale annua dell'acquifero relativa al periodo 2005-2017 è compresa tra un valore minimo di 110.1 mm/anno riscontrato nel 2006, ad un valore massimo di 291.1 mm/anno riscontrato nel 2013, con un valore medio nel periodo pari a 178.7 mm/anno (Tabella 7.5).

Tabella 7.5 - Serie temporale relativa al periodo 2005-2017 dell'infiltrazione efficace totale annua nell'acquifero

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Media
I <sub>e</sub> (mm/ anno)	201.2	110.1	158.3	125.5	244.2	152.9	149.2	138.8	291.1	171.4	283.4	111.1	186.0	178.7

La serie temporale della distribuzione dell'infiltrazione efficace rappresenta la sollecitazione naturale esterna al sistema rispetto alla quale, unitamente alla sollecitazione antropica derivante dai prelievi nei pozzi di emungimento, si vuole analizzare la risposta idrodinamica dell'acquifero, in termini di variazioni della superficie piezometrica, dei deflussi idrici sotterranei e degli scambi fiume-falda nel periodo di riferimento delle simulazioni modellistiche.



Figura 7.48 - Serie temporale della distribuzione dell'infiltrazione efficace nel periodo 2005-2017 (valori medi mensili espressi in mm/giorno relativi al mese più piovoso di ciascun anno)

## 7.4.5.3 Serie temporale dell'andamento della superficie piezometrica e dei deflussi idrici sotterranei nell'acquifero

Tra i risultati del modello è stata ottenuta la serie temporale dell'andamento della superficie piezometrica e dello spessore saturo dell'acquifero, per ciascuno *step* mensile del periodo di simulazione 2005-2017. Ai fini dell'analisi del comportamento idrodinamico del sistema è stato preso in esame solo il decennio 2008-2017, non analizzando i risultati relativi al triennio iniziale 2005-2007, in quanto potenzialmente influenzati dalle approssimazioni della condizione iniziale di riferimento di livello piezometrico assegnata in input al modello (cfr. paragrafo 7.4.3.5).

L'analisi dei risultati ottenuti mostra all'interno del sistema zone caratterizzate da un comportamento idrodinamico differente, in funzione delle caratteristiche idrogeologiche e geometriche dell'acquifero, nonché dell'entità della ricarica meteorica e della distribuzione degli emungimenti idrici localizzati. Si analizzano di seguito i risultati ottenuti relativamente alle aree principali del corpo idrico sotterraneo.

Nell'area di Contrada Bresciana, posta a sud-est dell'abitato di Campobello di Mazara, il campo di moto della falda è condizionato dalla presenza del campo pozzi in emungimento continuo per uso idropotabile "Bresciana": in tale area la superficie piezometrica risulta caratterizzata, per tutto il periodo temporale analizzato, dalla presenza di un'ampia depressione verso la quale convergono i flussi idrici sotterranei provenienti prevalentemente da zone poste a NNE e a NO rispetto al campo pozzi (cfr. Figure 7.49, 7.51, 7.52). Il confronto diacronico relativo alla stagione primaverile ed a quella autunnale mostra una tendenza complessiva sul periodo 2008-2017 ad una leggera riduzione della zona di influenza degli emungimenti a sud del campo pozzi, riconoscibile dallo spostamento verso mare delle isopiezometriche 10 m e 5 m. La zona di influenza a sud del campo pozzi Bresciana, analizzata sulla base dei risultati del modello, presenta tuttavia delle oscillazioni annuali sull'intero periodo, con anni, quali il 2011 ed il 2012, caratterizzati da un suo avanzamento verso mare, ed anni, quali il 2013, 2015 e 2017, caratterizzati da un suo arretramento, con un andamento temporale correlabile a quello della ricarica meteorica dell'acquifero (cfr. Tabella 7.5). La tendenza complessiva, sul periodo 2008-2017, alla riduzione della zona di influenza degli emungimenti a sud del campo pozzi "Bresciana" appare pertanto da mettere in relazione ai maggiori apporti meteorici verificatisi sul territorio della Piana negli ultimi anni del periodo considerato ed in particolare nel 2013, 2015 e 2017. Alla luce di ciò, vista l'intensa pressione antropica rappresentata dagli emungimenti idrici continui e consistenti del campo pozzi, con prelievi complessivi che ammontano a 7,5 Mm<sup>3</sup>/anno in una zona che dista circa 5 km dal mare, l'area di Contrada Bresciana, sebbene mostri nel periodo 2008-2017 una lieve tendenza alla riduzione della zona di influenza in area

costiera, rimane un'area da tenere sotto osservazione per il connesso rischio di intrusione salina nell'acquifero, come evidenziato al riguardo da studi pregressi effettuati nell'area (Bonanno et al., 2000). Per quanto riguarda la zona posta immediatamente a nord-ovest del campo pozzi "Bresciana", dai risultati del modello emerge un leggero aumento della zona di influenza degli emungimenti, riconoscibile da uno spostamento in direzione nord-ovest della isopiezometrica 25 m sul periodo 2008-2017 con un abbassamento del livello dell'ordine di 3 m in tale area (Figura 7.49). Tale abbassamento corrisponde una riduzione dello spessore saturo dell'acquifero di pari entità nel settore di nord-ovest, come si evince dallo spostamento dell'isopaca 120 m nella Figura 7.50.



Figura 7.49 - Confronto tra l'andamento della superficie piezometrica nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nel settore centrale dell'acquifero (in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)



Figura 7.50 - Confronto tra l'andamento dello spessore saturo dell'acquifero nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nel settore centrale del corpo idrico sotterraneo (in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)



Figura 7.51 - Confronto tra la distribuzione dei flussi idrici sotterranei lungo l'asse y nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nel settore centrale dell'acquifero (le frecce nere rappresentano i vettori di flusso; in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)



Figura 7.52 - Confronto tra la distribuzione dei flussi idrici sotterranei lungo l'asse x nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nel settore centrale dell'acquifero (le frecce nere rappresentano i vettori di flusso; in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)

Nell'area di Contrada Staglio, posta ad est dell'abitato di Castelvetrano, ed in particolare nella zona in destra idrografica del fiume Modione, in prossimità del piezometro Staglio 3 della rete freatimetrica regionale, il campo di moto della falda è condizionato dalla presenza di diversi pozzi, la maggior parte dei quali in emungimento continuo per uso idropotabile, tra cui i pozzi Staglio A, Staglio B, Staglio E, Staglio F, Ingrasciotta 1, Ingrasciotta 2, Ingrasciotta 3, che prelevano complessivamente circa 2,5 Mm<sup>3</sup>/anno dall'acquifero. In tale area la superficie piezometrica risulta caratterizzata, per tutto il periodo 2008-2017, dalla presenza di una depressione, verso la quale convergono i flussi idrici sotterranei provenienti prevalentemente da zone poste a nord e ad est rispetto ai pozzi (Figure 7.53, 7.54, 7.55). L'analisi dell'evoluzione della superficie piezometrica nell'area di Contrada Staglio evidenzia una tendenza complessiva sul periodo 2008-2017 ad una generale stazionarietà del fronte di richiamo indotto dagli emungimenti ubicati in destra idrografica del fiume Modione, riscontrabile sia dal confronto diacronico primaverile che da quello autunnale (cfr. Figura 7.53). L'area di Contrada Staglio posta in sinistra idrografica del fiume Modione, in una zona compresa tra i piezometri Staglio 3 e Staglio 11 della rete freatimetrica regionale, è caratterizzata dalla presenza di diversi pozzi in emungimento continuo per uso idropotabile, quali i pozzi Staglio D, Staglio 7, Staglio 9, Staglio 10, Staglio 11, Staglio 12, i quali prelevano complessivamente circa 2 Mm<sup>3</sup>/anno dall'acquifero, nonché di alcuni pozzi per uso irriguo, che determinano complessivamente un richiamo delle acque di falda dal settore posto a nord-nord-est dei pozzi (cfr. Figure 7.54, 7.55). La superficie piezometrica dell'acquifero mostra in tale area una tendenza alla generale stazionarietà nel corso dell'intero periodo simulato.

L'<u>area occidentale dell'acquifero</u>, ad ovest dell'abitato di Campobello di Mazara, è caratterizzata da un andamento delle linee isopiezometriche che si mantiene, per tutto il periodo analizzato, subparallelo alla linea di costa, con direzione prevalente di deflusso da nord verso sud nel settore più orientale e da nord-est verso sud-ovest nel settore costiero occidentale (cfr. Figure 7.56, 7.57 e 7.58). In quest'ultimo settore si osservano gradienti piezometrici maggiori rispetto a quello orientale; tali gradienti si riducono notevolmente nella zona immediatamente a monte dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, in corrispondenza dei quali si verifica un affioramento localizzato della superficie piezometrica. Complessivamente nel periodo 2008-2017 si osserva un avanzamento delle isopiezometriche 5 m e 10 m, che interessa per lo più il settore orientale dell'area ed è riconoscibile sia nel confronto diacronico primaverile che in quello autunnale. La presenza di molteplici pozzi ad uso irriguo nell'area non determina variazioni, sull'intero periodo analizzato, dell'andamento della superficie piezometrica e dei flussi idrici sotterranei ed influisce solo sulle oscillazioni stagionali di tali andamenti.



Figura 7.53 - Confronto tra l'andamento della superficie piezometrica dell'acquifero nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nella zona di Contrada Staglio (in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)



Figura 7.54 - Confronto tra la distribuzione dei flussi idrici sotterranei lungo l'asse y nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nella zona di Contrada Staglio (le frecce nere rappresentano i vettori di flusso; in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)



Figura 7.55 - Confronto tra la distribuzione dei flussi idrici sotterranei lungo l'asse x nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nella zona di Contrada Staglio (le frecce nere rappresentano i vettori di flusso; in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)



Figura 7.56 - Confronto tra l'andamento della superficie piezometrica nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nell'area occidentale dell'acquifero (in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)



Figura 7.57 - Confronto tra la distribuzione dei flussi idrici sotterranei lungo l'asse y nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nell'area occidentale dell'acquifero (le frecce nere rappresentano i vettori di flusso; in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)



Figura 7.58 - Confronto tra la distribuzione dei flussi idrici sotterranei lungo l'asse x nei mesi di aprile e ottobre del 2008 e del 2017 nell'area occidentale dell'acquifero (le frecce nere rappresentano i vettori di flusso; in rosso sono indicati i pozzi di emungimento)

#### 7.4.5.4 Serie temporale dei flussi di scambio fiume-falda

Uno dei risultati del modello integrato regionale è stato quello di rappresentare la dinamica delle interazioni fiume-falda in corrispondenza dei segmenti fluviali del reticolo idrografico del Modione connessi idraulicamente con l'acquifero, coincidenti con i tratti del fiume Modione e del canale Ricamino che attraversano i terreni del complesso calcarenitico-sabbioso sede dell'acquifero.

L'output del modello è consistito nella serie temporale, relativa al periodo 2005-2017, dei flussi di scambio idrico fiume-falda in corrispondenza dei suddetti tratti fluviali. Per ciascuno *step* mensile del periodo di simulazione è stata restituita la mappa di distribuzione spaziale dei flussi, espressi in  $m^3/s$ , con l'individuazione dei segmenti alimentanti e quelli drenanti la falda idrica sotterranea, identificati rispettivamente da flussi negativi e flussi positivi secondo la convenzione dei segni dei risultati del modello. I valori dei flussi ottenuti derivano dall'applicazione ai tratti fluviali interagenti con l'acquifero di un valore costante del *leakage coefficient* (coefficiente di dispersione del letto fluviale) pari a 1\*10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>, derivante da procedure iterative di aggiustamento del parametro effettuate durante la fase di calibrazione del modello integrato (cfr. paragrafo 7.4.4).

Ai fini dell'analisi delle interazioni fiume-falda è stato preso in esame solo il decennio 2008-2017, non analizzando i risultati relativi al triennio iniziale 2005-2007, in quanto potenzialmente influenzati dalle approssimazioni della condizione iniziale di riferimento di livello piezometrico assegnata in input al modello (cfr. paragrafo 7.4.3.5).

Nella Figura 7.59 è riportato l'andamento stagionale dei flussi di scambio fiume-falda relativamente all'anno 2015, caratterizzato dal più alto valore di precipitazione netta invernale calcolato per la stazione pluviometrica "Castelvetrano" nel periodo 2008-2017 (cfr. Tabella 5.1). Nella Figura 7.60 è riportato l'andamento stagionale dei flussi di scambio relativamente all'anno 2008, caratterizzato dal più basso valore di precipitazione netta invernale calcolato per la stessa stazione pluviometrica. Nelle suddette figure è riportata anche l'ubicazione dei pozzi di emungimento (indicati in rosso).

L'analisi dei risultati ottenuti mette in evidenza una variabilità temporale dei processi di scambio fiume-falda legata principalmente al ciclo idrologico ed al regime dei deflussi, con entità degli scambi dipendente dalla variazione, stagionale e pluriennale, del  $\Delta$ h tra livello idrico nel fiume e livello piezometrico nell'acquifero. Gli emungimenti continui per uso idropotabile di Contrada Staglio, nonché gli emungimenti stagionali ad uso irriguo ivi presenti, sebbene non determinino variazioni significative dell'assetto piezometrico dell'acquifero nel periodo analizzato (2008-2017), possono influire sui processi di scambio fiume-falda, nella misura in cui determinino una depressione della superficie piezometrica tale da indurre un comportamento alimentante del corso d'acqua.

Lungo l'asta fluviale del Modione si distinguono, all'interno di ciascuno *step* temporale del periodo analizzato, tratti con comportamento esclusivamente alimentante la falda, ubicati a monte della confluenza con il Ricamino, e tratti con comportamento esclusivamente drenante la falda, ubicati a valle di detta confluenza. Lungo l'asta del canale Ricamino si riscontra, all'interno di ciascuno *step* temporale, un comportamento esclusivamente alimentante la falda, tranne in prossimità della confluenza con il Modione, dove il comportamento diventa drenante. La suddivisione delle aste del Modione e del Ricamino in tratti alimentanti e drenanti si mantiene inalterata per tutto il periodo temporale analizzato, sebbene con le oscillazioni dell'entità dei flussi legate al ciclo idrologico prima descritte: ciò in quanto essa è funzione dell'andamento topografico del profilo longitudinale dei corsi d'acqua e dell'andamento della superficie piezometrica, che in tale area e nel periodo 2008-2017 si mantiene stazionario (cfr. paragrafo 7.4.5.3).

Sulla base dei risultati del modello, pertanto, il tratto fluviale individuato come drenante l'acquifero è il tratto dell'asta del Modione compreso tra la confluenza con il Ricamino ed il limite dell'affioramento delle Argille del Santerniano-Emiliano (cfr. paragrafi 3.1 e 3.2). Tale segmento fluviale è quello di interesse ai fini della valutazione dello stato chimico del corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, nel caso in cui si debba applicare ad esso il test "acque superficiali connesse" della batteria di test per la verifica delle condizioni concernenti il buono stato chimico dei corpi idrici sotterranei riportata in Figura 2.2, prendendo in considerazione le interazioni con il fiume Modione oltre che con i laghi di Preola e Gorghi Tondi (cfr. capitolo 2).


Figura 7.59 - Andamento stagionale dei flussi di scambio fiume-falda lungo il reticolo idrografico del Fiume Modione - anno 2015



Figura 7.60 - Andamento stagionale dei flussi di scambio fiume-falda lungo il reticolo idrografico del Fiume Modione - anno 2008

# 7.4.5.5 Serie temporale dei flussi di drenaggio della zona satura dell'acquifero

Il drenaggio in zona satura è un particolare tipo di condizione al contorno usato da MIKE SHE per definire i sistemi di drenaggio, naturali o artificiali, che non possono essere definiti dalla rete fluviale principale, quali il reticolo idrografico secondario o il deflusso subsuperficiale.

La condizione al contorno di drenaggio in zona satura assegnata in input al modello (paragrafo 7.4.3.7), utilizzata al fine di rappresentare il drenaggio dell'acquifero operato dal reticolo idrografico secondario o causato dal locale affioramento della superficie piezometrica, ha prodotto, come output, la serie temporale, relativa al periodo 2005-2017, dei flussi di drenaggio uscenti dalla zona satura dell'acquifero.

In particolare, per ciascuno *step* mensile del periodo di simulazione, è stata restituita la mappa di distribuzione spaziale dei flussi di drenaggio, espressi in m<sup>3</sup>/s, con l'individuazione delle zone in cui si verificano tali fenomeni di drenaggio, caratterizzate da flussi uscenti, quindi positivi secondo la convenzione dei segni dei risultati del modello.

Ai fini dell'analisi dell'andamento temporale dei flussi di drenaggio, è stato preso in esame, analogamente a quanto fatto per tutti gli altri risultati del modello, solo il decennio 2008-2017, non analizzando i risultati relativi al triennio iniziale 2005-2007, in quanto potenzialmente influenzati dalle approssimazioni della condizione iniziale di riferimento di livello piezometrico assegnata in input al modello (cfr. paragrafo 7.4.3.5).

Nella Figura 7.61 è rappresentato l'andamento stagionale dei flussi di drenaggio della zona satura dell'acquifero relativamente all'anno 2015, caratterizzato dal valore di precipitazione netta invernale mediamente più alto per l'intera area della Piana nel periodo 2008-2017 (cfr. Tabella 5.1). Nella Figura 7.62 è riportato l'andamento stagionale dei flussi di drenaggio relativamente all'anno 2008, caratterizzato dal valore di precipitazione netta invernale più basso per l'intera area della Piana nel periodo 2008-2017.

L'analisi dei risultati ottenuti evidenzia un andamento temporale dei flussi di drenaggio legata al ciclo idrologico, con entità dei flussi dipendente dalla variazione, stagionale e pluriennale, dei livelli piezometrici dell'acquifero in funzione dell'andamento degli apporti meteorici.

Le mappe di distribuzione riportate nelle Figure 7.61 e 7.62, oltre a rappresentare l'andamento temporale del fenomeno, individuano le aree dell'acquifero dove il drenaggio si verifica per effetto del reticolo idrografico secondario dei fiumi Modione, Belice e Delia-Arena (quest'ultimo interessato solo per i tratti più periferici) e dell'affioramento delle acque sotterranee in

corrispondenza di locali depressioni della superficie topografica (sorgenti per affioramento della piezometrica). La distribuzione di dette aree di drenaggio si mantiene inalterata per tutto il periodo temporale analizzato, a meno delle variazioni connesse con le oscillazioni della superficie piezometrica nel periodo 2008-2017.

La Figura 7.63 mette in evidenza la generale corrispondenza tra la distribuzione spaziale delle aree di drenaggio della zona satura risultanti dal modello e le porzioni di reticolo idrografico secondario dei fiumi Modione, Belice e Delia-Arena ricadenti all'interno dell'acquifero.

La Figura 7.63 evidenzia, inoltre, la presenza di aree caratterizzate da drenaggi puntuali sparsi in alcune aree dell'acquifero, specie nella zona nord-orientale del dominio del modello, ed in particolare nell'area a nord-est e sud-est dell'abitato di Partanna, nonché, più a sud, lungo il versante in destra idrografica del fiume Belice. La distribuzione di tali aree, indicative della presenza di sorgenti connesse al locale affioramento della superficie piezometrica, mostra una corrispondenza in termini generali con la mappatura delle principali sorgenti dell'acquifero realizzata dalla Cassa per il Mezzogiorno nell'ambito delle "Indagini idrogeologiche per l'approvvigionamento idrico del Sistema II Nord Occidentale della Sicilia" (Cassa per il Mezzogiorno, 1982), di cui è riportata in Figura 7.64 uno stralcio relativo alla Tavoletta 1:25.000 "Partanna".



Figura 7.61 - Andamento stagionale dei flussi di drenaggio dalla zona satura dell'acquifero - anno 2015



Figura 7.62 - Andamento stagionale dei flussi di drenaggio dalla zona satura dell'acquifero - anno 2008



Figura 7.63 - Ubicazione delle aree di drenaggio della zona satura (aree di colore arancionerosso) rispetto al reticolo idrografico dei fiumi Modione, Belice e Delia (linee di colore nero)



Figura 7.64 - Confronto relativo alla zona di Partanna tra la distribuzione delle aree di drenaggio dell'acquifero (aree di colore arancione-rosso a sinistra) e la mappa delle principali sorgenti censite nello studio della Cassa del Mezzogiorno, 1982 (simboli azzurri a destra)

### 7.4.5.6 Valutazione del bilancio idrico dell'acquifero

Il modello numerico integrato, messo a punto e calibrato secondo le procedure descritte nei paragrafi 7.4.3 e 7.4.4, è stato utilizzato per effettuare la valutazione del bilancio idrico a mediolungo termine dell'acquifero, in cui i volumi idrici considerati sono valori annui medi relativi ad un periodo idrologico di 10 anni (2008-2017), sufficientemente rappresentativo e rispondente al criterio minimo di 6 anni indicato nei documenti guida nazionali (ISPRA, 2017) e comunitari (European Commission, 2009) in materia.

Per la valutazione quantitativa delle componenti del bilancio idrico dell'acquifero, è stata utilizzata la schematizzazione di calcolo adottata dal modello numerico integrato, estraendo i dati relativi alle singole componenti del bilancio a partire dai risultati delle simulazioni del modello, calibrato secondo la procedura descritta al paragrafo 7.4.4.

Sono state in tal modo quantificate, per l'intera area dell'acquifero, pari a 258.6 km<sup>2</sup>, e sull'anno idrologico medio (media sul decennio 2008-2017), le componenti di flusso relative alle entrate nel sistema ("infiltrazione efficace", "flussi entranti dalle condizioni al contorno", "flussi entranti da fiumi perdenti") e le componenti di flusso relative alle uscite dal sistema ("flussi uscenti dalle condizioni al contorno", "prelievi da pozzi", "flussi uscenti da drenaggi della zona satura", "flussi uscenti verso fiumi drenanti"). Il termine "variazione di immagazzinamento" corrisponde alla variazione tra le condizioni iniziali e finali dell'acquifero nel periodo complessivamente analizzato.

In Figura 7.65 è riportato, in forma grafica, il risultato della valutazione del bilancio idrico dell'acquifero relativo al decennio 2008-2017, con la quantificazione delle singole componenti, ciascuna espressa in termini di altezza d'acqua totale sul decennio (mm).

In Tabella 7.6 è riportato, in forma tabellare, il risultato della valutazione del bilancio idrico medio annuo dell'acquifero (valori medi riferiti al decennio 2008-2017), con la quantificazione delle singole componenti, ciascuna espressa in termini di flussi medi annui (mm/anno, Mm<sup>3</sup>/anno e % sul totale).

I risultati ottenuti mostrano come la componente principale di controllo del bilancio dell'acquifero sia costituita dall'infiltrazione efficace, che rappresenta il 94% del totale delle voci di entrata, mentre i flussi entranti da perdite in subalveo (fiumi perdenti) ed i flussi entranti dalle condizioni al contorno costituiscono ciascuno il 3% rispetto al totale delle voci di entrata. Per quanto riguarda le uscite dal sistema, le voci principali sono costituite dai flussi uscenti da drenaggi della zona satura e dai prelievi da pozzi, che rappresentano rispettivamente il 45% ed il 32% del totale delle voci di uscita, seguite dai flussi uscenti dalle condizioni al contorno (23%) e flussi uscenti verso fiumi

drenanti (1%). Per quanto riguarda la componente dei drenaggi della zona satura, l'elevata percentuale riscontrata è legata principalmente ai flussi uscenti in corrispondenza del margine orientale dell'acquifero, lungo il versante in destra idrografica del fiume Belice (cfr. Figure 7.61, 7.62), dove, per ragioni connesse all'andamento morfologico della superficie topografica nonché ai ridotti spessori dell'acquifero, si verifica in tutto il periodo temporale analizzato il drenaggio della zona satura ad opera del reticolo idrografico secondario e per effetto dell'affioramento della superficie piezometrica.

Per quanto concerne la componente dei prelievi da pozzi, la percentuale del 31% rappresentata va riferita alla stima dei volumi annui emunti, basata sui dati comunicati dai gestori, per i pozzi ad uso idropotabile, e sui dati desunti dalle pratiche di concessione idrica, per i pozzi ad uso irriguo selezionati tra quelli censiti presso l'Amministrazione Regionale sulla base dei criteri descritti al paragrafo 5.2.2. Al riguardo bisogna ricordare che la valutazione dei prelievi idrici da pozzi rappresenta uno degli elementi maggiormente problematici nell'ambito dell'analisi del bilancio idrico di un sistema idrogeologico e che la stima degli emungimenti idrici da pozzi utilizzata come dato di input nel modello, sebbene effettuata con l'obiettivo di minimizzare sovrastime o sottostime dei prelievi, è comunque caratterizzata da un livello di incertezza, difficilmente quantificabile sulla base dei dati ad oggi disponibili, che incide sul livello di confidenza finale della valutazione del bilancio.

Il risultato complessivo della valutazione del bilancio idrico, in termini di variazione dell'immagazzinamento nell'acquifero, valutata come differenza tra entrate ed uscite nel periodo preso in esame (2008-2017), mostra un valore medio annuo di variazione di immagazzinamento sul periodo pari a 1.3 Mm<sup>3</sup>/anno, corrispondente al 3% del totale delle voci di entrata. Non emergono pertanto, nel periodo temporale analizzato, condizioni di deficit di bilancio dell'acquifero, ma bensì, in presenza di flussi in uscita dello stesso ordine di grandezza dei flussi in entrata, condizioni prossime all'equilibrio di bilancio.

Il grado di confidenza complessivo dei risultati della valutazione del bilancio idrico dell'acquifero dipende dall'accuratezza della stima dei prelievi e dal grado di calibrazione raggiunto dal modello. Ulteriori affinamenti del modello di bilancio potranno derivare dal miglioramento del grado di calibrazione del modello integrato, per il quale sarà necessario disporre di un maggiore numero di punti di osservazione del livello piezometrico dell'acquifero, di una distribuzione adeguata di valori dei parametri idrodinamici del sistema idrogeologico ottenuti tramite prove di pompaggio (conducibilità idraulica, porosità efficace, coefficiente di immagazzinamento), di serie temporali di

dati di portata relativi al fiume Modione e di risultati di misure differenziali di portata effettuate lungo tale corso d'acqua.



Accumulated waterbalance from for 12000 to 2412/2017. Data type . Storage deput [minimeter].

Figura 7.65 - Valutazione del bilancio idrico dell'acquifero della Piana di Castelvetrano – Campobello di Mazara relativo al decennio 2008-2017 (altezze totali espresse in mm)

Tabella 7.6 - Valutazione del bilancio idrico medio annuo dell'acquifero della Piana di Castelvetrano - Campobello di Mazara (flussi medi annui riferiti al decennio 2008-2017)

ENTRATE	mm/anno	Mm <sup>3</sup> /anno	%
Infiltrazione efficace	183.2	47.4	94%
Flussi entranti dalle condizioni al contorno	5.1	1.3	3%
Flussi entranti da fiumi perdenti	6.1	1.6	3%
Totale entrate	194.4	50.3	100%
USCITE	mm/anno	Mm <sup>3</sup> /anno	%
Flussi uscenti dalle condizioni al contorno	43.4	11.2	23%
Prelievi da pozzi	60.1	15.5	32%
Flussi uscenti da drenaggi della zona satura	84.5	21.9	45%
Flussi uscenti verso fiumi drenanti	1.4	0.4	1%
Totale uscite	189.5	49.0	100%
	mm/anno	Mm <sup>3</sup> /anno	%
Variazione di immagazzinamento	5.0	1.3	3%

# 7.4.5.7 Definizione della condizione al contorno orientale per il modello di flusso locale relativo alla zona dei laghi

Uno dei risultati del modello numerico integrato dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara è stata la definizione della condizione al contorno orientale del modello di flusso a scala locale relativo alla zona dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi (v. capitolo 8). In particolare, al fine di definire il dominio del modello di flusso locale, è stata scelta come limite orientale dell'area una linea di deflusso delle acque sotterranee perpendicolare all'andamento medio sul periodo 2008-2017 delle isopiezometriche simulate dal modello regionale integrato. La linea di deflusso è stata selezionata in modo tale da includere all'interno dell'area del modello le sorgenti di contaminazione ed i relativi potenziali bersagli, cioè i laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi ed il pozzo ad uso idropotabile San Nicola 1 posto a sud dei laghi. Il margine orientale del dominio del modello definito in tal modo ha consentito di rappresentare tale limite con una condizione al contorno di flusso nullo (cfr. capitolo 8).

In Figura 7.66 è riportata l'ubicazione del limite orientale del dominio del modello di flusso a scala locale relativo alla zona dei laghi, assieme alla carta isopiezometrica media, sul periodo 2008-2017, dell'acquifero ottenuta come risultato del modello integrato regionale.



Figura 7.66 - Ubicazione del limite orientale del dominio del modello di flusso a scala locale relativo alla zona dei laghi (linea continua rossa)

# 8 Implementazione del modello di flusso e trasporto nell'area dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi

# 8.1 Modello concettuale del settore occidentale del corpo idrico sotterraneo

Sulla base dell'approccio metodologico generale dello studio descritto nel capitolo 2, l'attività conclusiva della task T.3 del POA Acque sotterranee ha riguardato l'implementazione di un modello numerico di simulazione locale dei processi di flusso e trasporto in falda, nella zona dei corpi idrici superficiali costituiti dai laghi Murana, Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio, Gorgo Basso, avente come finalità principale quella di stimare l'eventuale trasferimento dei contaminanti presenti in falda ai sistemi idrici superficiali connessi e di fornire elementi di valutazione utili a stimare i probabili relativi impatti di tale trasferimento.

L'implementazione del modello di simulazione dei processi di flusso e trasporto in falda nel settore occidentale del corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, dove ricadono i laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi nonché la risorsa idrica sotterranea vincolata per usi civili, di cui al PRGA della Sicilia, costituita dal pozzo idropotabile S. Nicola 1, si è basata sul modello concettuale locale del corpo idrico sotterraneo, che a sua volta è stato elaborato a partire dai risultati di tutte le attività dello studio descritte nei capitoli precedenti del presente documento ed in particolare sui seguenti elementi principali di conoscenza:

- quadro delle pressioni antropiche presenti e dello stato chimico del corpo idrico sotterraneo e dei corpi idrici superficiali connessi (cfr. paragrafo 3.4);
- caratterizzazione idrogeologica ed idrodinamica dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara e relativo modello concettuale idrogeologico preliminare (cfr. capitolo 4);
- quantificazione degli emungimenti idrici locali (cfr. paragrafo 5.2);
- valutazione dell'eccedenza idrica (cfr. paragrafo 5.1.1) e del coefficiente di infiltrazione potenziale locale (cfr. paragrafo 5.1.2);
- caratterizzazione topo-batimetrica del fondale dei laghi (cfr. paragrafo 6.2);
- caratterizzazione idrochimica delle acque dei laghi e dell'acqua della falda idrica sotterranea in prossimità della discarica RSU di C.da Misiddi-Campana (cfr. paragrafo 6.3);
- individuazione del limite orientale dell'area del modello locale sulla base dell'assetto piezometrico regionale dell'acquifero (cfr. paragrafo 7.4.5.7).

Per quanto concerne il modello concettuale idrogeologico locale si è fatto riferimento ai risultati della caratterizzazione idrogeologica ed idrodinamica dell'acquifero ed al relativo modello concettuale preliminare sintetizzato nel paragrafo 4.5.

Per quanto riguarda l'elaborazione del modello concettuale locale delle relazioni tra le fonti di pressione ed i relativi potenziali impatti sui corpi idrici, l'analisi dei dati raccolti ed elaborati ha consentito di individuare le principali fonti di pressione antropica che insistono sul settore occidentale della Piana ed i relativi potenziali impatti attesi sullo stato qualitativo dei corpi idrici, secondo quanto esplicitato nella Tabella 8.1. In tale tabella sono riportate soltanto le fonti di pressione che possono causare un impatto sullo stato qualitativo dei corpi idrici, in linea con l'obiettivo finale dell'attività. Le fonti di pressione che possono causare un impatto sullo stato qualitativo dei pozzi, sebbene non direttamente correlati con le variazioni di stato qualitativo dei corpi idrici, specie alla luce dei risultati del modello regionale dell'acquifero nel settore occidentale della Piana, sono stati comunque presi in considerazione nell'implementazione del modello di flusso locale, al fine di simulare gli effetti sul campo di moto della falda degli emungimenti idrici localizzati.

In Figura 8.1 è riportata l'ubicazione delle fonti di pressione che insistono sul settore occidentale della Piana, assieme a quella dei recettori della potenziale contaminazione da esse rilasciata e cioè i corpi idrici superficiali Murana, Preola e Gorghi Tondi e la risorsa idrica sotterranea vincolata per usi civili, di cui al PRGA della Sicilia, costituita dal pozzo idropotabile S. Nicola 1 ricadente nel comune di Mazara del Vallo. Nella figura 8.1 è riportata anche l'ubicazione dei pozzi di emungimento.



Figura 8.1 - Pressioni antropiche relative al settore occidentale della Piana: aree interessate da attività agricola e zootecnica (aree con Fpfm=1-3 e Fpfo=2 - aree colorate in giallo -), discariche RSU (triangoli fucsia), impianto IED (stella azzurra), pozzi di emungimento (cerchi rossi). In blu sono indicati i laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi ed il pozzo idropotabile S. Nicola 1

I parametri indicatori del potenziale impatto delle pressioni antropiche presenti sullo stato qualitativo dei corpi idrici del settore occidentale della Piana, selezionati per l'analisi modellistica, sono stati:

- l'arsenico, per quanto riguarda le pressioni puntuali rappresentate dalle discariche RSU dismesse (specificate in Tabella 8.1) presenti nella zona a nord-est dei laghi e del pozzo idropotabile S. Nicola 1;
- i nitrati, per quanto riguarda le pressioni diffuse rappresentate dalle aree soggette ad attività agricole e zootecniche, nonché le pressioni puntuali rappresentate dalle discariche RSU dismesse.

La selezione di tali parametri è stata effettuata sulla base dei seguenti dati:

- risultati dell'indagine idrochimica effettuata da ARPA nel 2017 nell'ambito del presente studio sulle acque dei laghi e sull'acqua della falda idrica sotterranea in prossimità della discarica RSU di C.da Misiddi-Campana;
- risultati delle analisi chimiche relative alle acque sotterranee prelevate dai piezometri della rete di monitoraggio dell'impianto della discarica di C.da Misiddi-Campana, effettuate dal

gestore dell'impianto tra il 2010 e il 2014, in attuazione del piano di monitoraggio e controllo della discarica allegato al provvedimento di AIA;

 risultati del monitoraggio, effettuato da ARPA, dello stato chimico del c.i. sotterraneo, nel periodo 2011-2017, e dello stato chimico ed ecologico dei c.i. superficiali connessi, nel periodo 2013-2015.

Un approfondimento specifico merita, per la problematica connessa alla possibile origine naturale dell'arsenico nelle acque sotterranee, l'individuazione di tale elemento come parametro indicatore del potenziale impatto, sullo stato qualitativo dei corpi idrici della Piana, delle discariche RSU dismesse ivi presenti. Tale individuazione è stata effettuata sulla base dei seguenti dati ed elementi conoscitivi:

- presenza di arsenico, rilevata nel periodo 2010-2014, sia nel percolato della discarica di C.da Misiddi-Campana (concentrazione di 800±100 µg/l nel campionamento del 11/12/2013) sia nelle acque sotterranee prelevate dai piezometri della rete di monitoraggio dell'impianto (concentrazioni medie del piezometro P1 di 68 µg/l nel periodo 2010-2014), come risulta dalle attività di monitoraggio e controllo della discarica effettuate nel periodo 2010-2014 dal gestore dell'impianto (Belice Ambiente, 2014; EOS, 2011);
- presenza di arsenico, rilevata nell'anno 2018, nelle acque sotterranee prelevate dai piezometri della rete di monitoraggio della discarica (concentrazioni di 58±17 µg/l nel campionamento del 20/02/2018 del piezometro P1; concentrazioni di 592±130 µg/l nel campionamento del 20/02/2018 del piezometro P8), come risulta dall'indagine effettuata da ARPA nel 2018 nell'ambito dell'attuazione del POA acque sotterranee (cfr. paragrafo 6.3);
- presenza di arsenico, rilevata nell'anno 2017, nelle acque prelevate dalle stazioni di monitoraggio rappresentative del corpo idrico sotterraneo della Piana (concentrazioni comprese tra 1.27 ed 1.66 µg/l nel campionamento del 3° trimestre del 2017 nei pozzi Perez, Ingrasciotta, S. Nicola 1, posti a sud-ovest delle discariche), come risulta dal monitoraggio dello stato chimico del corpo idrico sotterraneo effettuato da ARPA nell'ambito dell'attuazione del POA acque sotterranee;
- presenza di arsenico, rilevata nell'anno 2017, nelle acque dei corpi idrici superficiali dei laghi Murana, Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio, Gorgo Basso (concentrazioni superiori al LOQ ed in alcuni casi superiori allo SQA-MA di 5 µg/l di cui alla Tab. 1/B del D. lgs. 172/2015 per le acque superficiali, nei campionamenti dei laghi effettuati nel gennaio 2018, con valori massimi di 8.6 µg/l rilevati in corrispondenza di Gorgo Basso e valori progressivamente decrescenti verso nord-ovest lungo l'allineamento dei laghi, fino a

concentrazioni minime rilevate di 3.09  $\mu$ g/l in corrispondenza di Murana), come risulta dall'indagine effettuata da ARPA nel 2018 nell'ambito dell'attuazione del POA acque sotterranee (cfr. paragrafo 6.3);

- presenza di arsenico, rilevata nel periodo 2013-2015, nei corpi idrici superficiali dei laghi Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio, Gorgo Basso (concentrazioni medie annue nelle acque superiori allo SQA-MA di 5 µg/l di cui alla Tab. 1/B del DM 260/2010 in Gorgo Basso, Gorgo Alto e Preola e di poco inferiori allo SQA-MA in Gorgo Medio; concentrazioni nei sedimenti superiori allo SQA-MA di 12 mg/kg di cui alla Tab. 3/B del DM 260/2010 in Gorgo Basso, Gorgo Medio, Gorgo Alto e di poco inferiori allo SQA-MA in Preola), come risulta dal monitoraggio dello stato chimico ed ecologico dei corpi idrici di transizione effettuato da ARPA negli anni 2013 e 2015;
- modello concettuale di circolazione idrica sotterranea nella zona occidentale dell'acquifero, supportata dai risultati del modello integrato regionale (cfr. paragrafo 7.4.5), secondo il quale i laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, idraulicamente interconnessi con l'acquifero, si trovano in una posizione di valle idrogeologico rispetto alle discariche RSU dismesse e la falda idrica sotterranea ivi circolante rappresenta il vettore della contaminazione eventualmente proveniente dalle stesse.

La presenza di arsenico in concentrazioni > SQA-MA nelle acque e nei sedimenti dei laghi, ed in concentrazioni > LOQ in alcuni campionamenti del corpo idrico sotterraneo, non appare peraltro riconducibile, sulla base dei dati ad oggi disponibili, ad un'origine naturale dello stesso, eventualmente derivante dalla risalita di fluidi idrotermali o dalla lisciviazione di minerali ricchi in arsenico.

Non sono infatti presenti manifestazioni idrotermali di superficie nella zona in esame ed i risultati dello studio di valutazione della risorsa geotermica nella zona di Mazara del Vallo effettuato nell'ambito del progetto VIGOR hanno evidenziato la presenza di un serbatoio geotermico a scala regionale, ospitato nelle unità carbonatiche mesozoiche, che si trova a profondità di almeno 1500 m, separato dalla superficie, e quindi dai laghi, da potenti successioni clastico-terrigene mioplioceniche presenti nell'area di Mazara del Vallo (CNR, 2014).

D'altra parte non sono presenti nella zona in esame litotipi quali vulcaniti, metamorfiti o depositi sulfurei caratterizzati da elevati tenori naturali di arsenico, che potrebbero determinare un apporto geogenico di tale elemento nelle acque locali. Infatti, come risulta dall'Atlante geochimico-ambientale d'Italia (De Vivo et al., 2009), i depositi della Fm. Gessoso-Solfifera che si rinvengono nella successione stratigrafica della zona occidentale della Sicilia non risultano caratterizzati da

significative mineralizzazioni a solfuri (quali quelle rinvenibili nel bacino centrale della Gessoso-Solfifera), che potrebbero contenere maggiori tenori di tale elemento e determinarne un apporto di origine naturale nelle acque.

Si ritiene pertanto che l'arsenico rinvenuto nelle acque e nei sedimenti dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi e nel corpo idrico sotterraneo del settore occidentale della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, possa essere riconducibile ad apporti antropogenici, tra i quali risulta rilevante localmente quello derivante dalle discariche RSU dismesse presenti nell'area.

Tipologia	Fonti di pressione	Potenziali impatti sul corpo idrico sotterraneo	Potenziali impatti sui corpi idrici superficiali connessi
Fonti puntualin. 4 discariche RSU dismesse inserite nel Piano Regionale Bonifiche della Sicilia: 2 site nel comune di Campobello di Mazara (1 in C.da Misiddi- Campana, dove si trova anche un impianto IED <sup>4</sup> , 1 in C.da Fosso del Pino); 2 site nel comune di Mazara del Vallo (1 in C.da S. Nicola, 1 in C.da Nicolò Soprano loc. Gilletto)	Inquinamento chimico che può determinare uno stato chimico scarso del c.i. o un trend all'aumento della concentrazione degli inquinanti monitorati o una non conformità delle aree protette (aree protette per le acque destinate al consumo umano) con effetti quali il pennacchio di contaminazione del c.i. e/o la sua espansione. Elementi di qualità interessati dall'impatto: inquinanti indicatori dell'impatto di cui alla Tab. 3 del DM 06/07/16	Inquinamento chimico che può determinare uno stato ecologico o uno stato chimico non buono del c.i. o un loro deterioramento, con effetti quali la variazione dei carichi o delle concentrazioni delle sostanze prioritarie o degli inquinanti specifici trasferiti dal corpo idrico sotterraneo. Elementi di qualità interessati dall'impatto: Inquinanti specifici (Tabelle 1/B e 3/B) e Sostanze prioritarie (Tabelle 1/A e 2/A) di cui al D.lgs, 172/2015	
	Inquinamento da nutrienti che può determinare uno stato chimico scarso del c.i. o un trend all'aumento della concentrazione di azoto/nitrati o una non conformità delle aree protette (ZVN e aree protette per le acque destinate al consumo umano) con effetti quali il pennacchio di contaminazione del c.i. e/o la sua espansione. Elementi di qualità interessati dall'impatto: Nitrati	Inquinamento da nutrienti che può determinare uno stato ecologico non buono del c.i. o un suo deterioramento, con effetti quali la variazione dei carichi o delle concentrazioni di nutrienti trasferiti dal corpo idrico sotterraneo e l'eutrofizzazione delle acque superficiali. Elementi di qualità interessati dall'impatto: Elementi chimico-fisici a sostegno (Azoto inorganico disciolto e Ossigeno disciolto <sup>5</sup> )	
Fonti diffuse	Aree interessate da attività agricole e zootecniche (aree con Fpfm compreso tra 1 e 3 e Fpfo =2 da mappa indicatore IPNOA)	Inquinamento da nutrienti che può determinare uno stato chimico scarso del c.i. o un trend all'aumento della concentrazione di azoto/nitrati o una non conformità delle aree protette (ZVN e aree protette per le acque destinate al consumo umano) con effetti quali il pennacchio di contaminazione del c.i. e/o la sua espansione. Elementi di qualità interessati dall'impatto: Nitrati	Inquinamento da nutrienti che può determinare uno stato ecologico non buono del c.i. o un suo deterioramento, con effetti quali la variazione dei carichi o delle concentrazioni di nutrienti e l'eutrofizzazione delle acque. Elementi di qualità interessati dall'impatto: Elementi chimico-fisici a sostegno (Azoto inorganico disciolto e Ossigeno disciolto <sup>5</sup> )

# Tabella 8.1 - Pressioni antropiche presenti nel settore occidentale della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara ed analisi dei potenziali impatti attesi sul corpo idrico sotterraneo e sui corpi idrici superficiali connessi

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Vedi nota 3

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Nel caso in cui i c.i. superficiali Preola e Gorghi Tondi venissero ricompresi nella categoria dei laghi naturali sarebbero valutati altri indicatori tra cui l'EQB Fitoplancton come specificato nel documento ARPA "*Monitoraggio acque di transizione - attività 2015*"

#### 8.2 Messa a punto e calibrazione del modello di flusso

Per l'implementazione del modello locale di flusso e trasporto in falda è stato utilizzato il codice di calcolo FEFLOW - Finite Element subsurface FLOW system, un codice numerico agli elementi finiti per la modellazione bi e tridimensionale dei processi di flusso e trasporto in mezzi porosi e fratturati, in condizioni sia sature che insature. FEFLOW presenta diverse funzionalità che permettono di simulare molteplici e complesse situazioni di flusso e trasporto, quali il flusso dipendente dalla densità, il trasporto di calore, il trasporto reattivo multispecie. Esso permette inoltre di supportare l'intero flusso di lavoro per lo sviluppo di un modello numerico di simulazione, dal preprocessing dei dati di input, alla simulazione al posprocessing dei risultati ed è supportato da applicazioni specifiche, quali l'interfaccia grafica FePEST per l'uso del software PEST per la calibrazione dei modelli sviluppati con FEFLOW.

Per quanto concerne la simulazione dei processi di flusso in condizioni sature, oggetto di studio nell'ambito del presente lavoro, il flusso saturo, descritto dall'equazione di continuità (principio di conservazione della massa) e dalla legge di Darcy (principio di conservazione della quantità di moto con equilibrio tra forze inerziali e forze viscose), viene risolto da FEFLOW generando sul dominio di interesse una *mesh* costituita da elementi finiti, nei quali le equazioni del flusso sono applicate e risolte numericamente tramite tecniche di approssimazione algebrica. Per ciò che concerne i processi di trasporto dei contaminanti in condizioni sature, anch'essi oggetto di studio nell'ambito del presente lavoro, il trasporto di massa nel mezzo saturo, descritto dall'equazione di continuità per l'inquinante che esprime il bilancio di massa della sostanza all'interno del mezzo poroso, viene risolto dal codice applicando agli elementi finiti della *mesh* l'equazione del trasporto e risolvendola numericamente con analoghe tecniche di approssimazione algebrica.

Nel caso di studio l'utilizzo del codice FEFLOW è stato finalizzato alla messa a punto, nel settore occidentale dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, di un modello di simulazione del flusso saturo in regime stazionario relativo ad un acquifero libero.

Per il set-up del modello è stata innanzitutto definita l'area del dominio di calcolo, sulla base delle condizioni ai limiti geologici e idrodinamici locali dell'acquifero. L'area così definita risulta pertanto delimitata a sud, ovest e nord dal perimetro dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, mentre il margine orientale dell'area è rappresentato da una linea di deflusso delle acque sotterranee simulata dal modello regionale integrato (cfr. paragrafo 7.4.5.7), scelta in modo da includere all'interno dell'area del modello le sorgenti di contaminazione ed i relativi potenziali bersagli (laghi e pozzo ad uso idropotabile).

Sulla base del dominio areale del modello così definito, è stata quindi generata la *mesh* di elementi finiti relativa al dominio di calcolo, costituita da elementi triangolari con lato di lunghezza media di 80 m, riportata in Figura 8.2 assieme alla delimitazione dell'area del modello. Per la discretizzazione verticale del dominio è stato configurato un solo *layer*, corrispondente all'acquifero a falda libera della Piana, compreso tra la superficie topografica ed il substrato impermeabile dell'acquifero. La superficie topografica al tetto del layer di calcolo è rappresentata dal DTM dell'area modello, integrato in corrispondenza dei laghi con i risultati del rilievo topobatimerico dei fondali di cui al paragrafo 6.2. In Figura 8.3 è rappresentato il layer di calcolo tridimensionale dell'area del modello.

Sono state quindi assegnate al modello le condizioni al contorno del flusso idrico. In particolare è stata assegnata una condizione al contorno di carico idraulico imposto (condizione di 1° tipo o di *Dirichlet*) con h=0 lungo il margine costiero sud-occidentale dell'acquifero, una condizione al contorno di flusso nullo lungo la restante parte del perimetro ed una condizione al contorno di pozzi in emungimento nei nodi del dominio corrispondenti all'ubicazione dei pozzi, per un totale di 122 pozzi per uso prevalentemente irriguo ed in alcuni casi idropotabile o domestico. I laghi sono stati modellizzati come zone di affioramento della piezometrica, non come condizioni al contorno.



Figura 8.2 - Delimitazione del dominio del modello locale (a sinistra) e mesh di calcolo (a destra)



Figura 8.3 - Definizione del layer di calcolo tridimensionale dell'area modello

Ai fini della simulazione del flusso in condizioni stazionarie, i volumi annui emunti dai pozzi sono stati considerati equamente distribuiti nell'arco dell'anno.

È stata quindi assegnata all'area modello la mappa di distribuzione dell'infiltrazione efficace  $I_e$  nell'acquifero, calcolata a partire dal dato di precipitazione efficace annua media relativa al periodo 2005-2017 per la stazione pluviometrica Mazara del Vallo, pari a 185 mm/anno, e dalla mappa di distribuzione del coefficiente di infiltrazione potenziale complessivo elaborata a partire dalle caratteristiche di permeabilità dei litotipi affioranti, dalla pendenza e dall'uso del suolo (cfr. paragrafi 5.1.1 e 5.1.2). In Figura 8.4 è riportata la mappa dell'infiltrazione efficace annua media, sul periodo 2005-2017, dell'acquifero assegnata all'area modello, che presenta valori compresi tra un massimo di 139 mm/anno ed un minimo di 69.5 mm/anno.

Per quanto riguarda l'assegnazione delle proprietà materiali dell'acquifero, si è scelto, nell'ambito del primo set-up del modello, di assegnare agli elementi del layer un valore inizialmente omogeneo in tutto il dominio di conducibilità idraulica, con Kxx e Kyy poste pari a 1\*10-4 m/s, corrispondente al valore medio della conducibilità idraulica orizzontale dell'acquifero ottenuta dalla calibrazione del modello integrato regionale (cfr. Tabella 7.4), e Kzz posta pari al 10% di Kxx e Kyy. I valori omogenei di conducibilità idraulica inizialmente assegnati al dominio sono stati utilizzati come valori di partenza per la ricerca, tramite procedura di autocalibrazione effettuata con il software FePEST, della distribuzione dei valori di Kxx, Kyy, Kzz all'interno del dominio in grado di minimizzare lo scostamento tra livelli piezometrici simulati e livelli piezometrici misurati in un set di punti di osservazione derivanti dalle attività di rilievo piezometrico dell'acquifero effettuate nel corso del 2017. Ai fini del processo di calibrazione del modello sono stati utilizzati i livelli piezometrici medi dell'acquifero rilevati, nel corso dell'anno, in corrispondenza di 49 punti di osservazione, di cui 44 costituiti da pozzi utilizzati per il rilievo piezometrico primaverile ed invernale dell'acquifero e 5 costituiti dai laghi, nei quali è stato effettuato il rilievo mensile del livello idrico (cfr. paragrafi 4.4 e 6.1). L'ubicazione dei punti di osservazione utilizzati per la calibrazione del modello di flusso è riportata in Figura 8.5, dove è mostrato, per ciascuno dei punti utilizzati per la calibrazione, lo scostamento tra livello simulato ed osservato, attraverso il plot della barra dell'errore puntuale in relazione all'intervallo di confidenza posto pari ad 1 m. Le barre verdi indicano scostamenti entro l'intervallo di confidenza, quelle rosse gli scostamenti che superano l'intervallo di confidenza. Nella Figura 8.5 è riportato altresì l'andamento della superficie piezometrica dell'acquifero, con le relative isolinee, ottenuta al termine della simulazione in stato stazionario dal modello di flusso.



Figura 8.4 - Distribuzione dell'infiltrazione efficace annua media sul periodo 2005-2017 nel settore occidentale dell'acquifero

Lo scostamento tra valori di livello piezometrico simulato e misurato in corrispondenza dei punti di osservazione è mostrato, in forma di *scatterplot*, nella finestra in alto a destra della Figura 8.5, nella quale è altresì riportato il risultato complessivo ottenuto al termine della calibrazione del modello, in termini di errore assoluto  $\overline{E}$ , di *root mean square* RMS e deviazione standard  $\sigma$ . I valori ottenuti sono stati i seguenti:

# $\overline{E} = 1.18 m$

RMS=1.92 m

 $\sigma = 1.94 \text{ m}$ 

La calibrazione mostra una buona corrispondenza tra livelli simulati ed osservati nella zona centrale e sud-occidentale del dominio, dove si osservano scostamenti generalmente contenuti entro l'intervallo di confidenza di 1 m, ed una corrispondenza minore nel settore nord-occidentale, dove si riscontrano scostamenti superiori all'intervallo di confidenza, con una media di 2.7 m. I maggiori scostamenti ottenuti in tale area possono essere riconducibili in parte ad una criticità della calibrazione in tali zone del dominio, che richiede l'acquisizione di nuovi dati sul campo e conseguenti successivi affinamenti del modello di flusso, ed in parte all'elevata variabilità locale dei livelli piezometrici misurati nell'acquifero, dove la presenza di lenti ed intercalazioni limosoargillose nelle Formazioni del complesso idrogeologico calcarenitico-sabbioso possono determinare variazioni locali del livello piezometrico della falda, di scarsa significatività ai fini della rappresentazione complessiva del campo di moto della falda.

Il bilancio dei flussi idrici entranti ed uscenti dal dominio del modello calibrato in regime stazionario è mostrato nella finestra in basso a destra nella Figura 8.5, dove sono riportati i flussi uscenti dalla condizione al contorno di bordo mare (12896  $m^3$ /giorno), le portate uscenti dai pozzi (4110  $m^3$ /giorno) e le portate di ricarica meteorica entranti (17015  $m^3$ /giorno), con un termine di sbilanciamento risultante (8.4  $m^3$ /giorno) che rappresenta lo 0.05% del termine di ricarica.

La distribuzione dei valori di conducibilità idraulica orizzontale dell'acquifero (Kxx e Kyy, con Kxx assunta uguale a Kyy), ottenuta al termine della procedura di calibrazione del modello effettuata con FePEST, è riportata nella Figura 8.6. La distribuzione dei valori di conducibilità idraulica verticale Kzz presenta lo stesso andamento ma con valori pari ad 1/10 di Kxx.



Figura 8.5 - A sinistra: andamento della superficie piezometrica simulata ed ubicazione dei punti di osservazione utilizzati per la calibrazione del modello locale di flusso con relative barre di errore. In alto a destra: scatterplot dei valori simulati vs. misurati di livello piezometrico. In basso a destra: il bilancio dei flussi idrici entranti ed uscenti dal dominio del modello



Figura 8.6 - Distribuzione dei valori di conducibilità idraulica Kxx (m/s) dell'acquifero ottenuta al termine della procedura di calibrazione del modello

#### 8.3 Implementazione del modello di trasporto dei contaminanti

#### 8.3.1 Modello di trasporto dell'arsenico: messa a punto e presentazione dei risultati

Una volta definito e calibrato il modello di flusso, è stato messo a punto il modello di trasporto in falda dell'arsenico proveniente dalle discariche, simulando in regime transitorio il flusso di massa advettivo, dispersivo e diffusivo del contaminante presente in fase disciolta nella zona satura dell'acquifero, senza considerare il trasporto reattivo, ai fini di una valutazione cautelativa della propagazione del *plume* dell'inquinante.

Per simulare le sorgenti di contaminazione di arsenico rappresentate dalle discariche, non essendo disponibili dati relativi alle perdite del percolato in falda, è stata utilizzata una condizione al contorno di trasporto di 1° tipo (condizione di *Dirichlet*), con concentrazione imposta di arsenico disciolto alle sorgenti. Sono state considerate due sorgenti areali di contaminazione, una posta in corrispondenza della discarica di C.da Misiddi-Campana, che comprende le altre due vicine discariche di C.da Fosso del Pino e C.da S. Nicola, e l'altra posta in corrispondenza della discarica di C/da S. Nicola Soprano - Localita Gilletto, a nord ovest della prima. Il valore di concentrazione di arsenico disciolto assegnato alle sorgenti è stato assunto costante nel tempo, non essendo possibile ricostruire, in base ai dati disponibili, un trend significativo di variazione della concentrazione del contaminante in falda; il suo valore è stato assunto pari al valore medio di 97  $\mu g/l$ , rilevato sulla base dei monitoraggi effettuati nel biennio 2013-2014 nel piezometro P1 della discarica di C.da Misiddi-Campana e confermato sulla base del nuovo campionamento effettuato nel febbraio 2018 nell'ambito del presente studio.

È stata quindi assegnata lungo il margine costiero sud-occidentale dell'acquifero una condizione al contorno di trasporto di 1° tipo vincolata al flusso di massa proveniente dalle discariche.

Per quanto riguarda i parametri chimico-fisici del mezzo necessari alla simulazione del trasporto, sono stati assegnati in input al modello valori, uniformi su tutto il dominio, di porosità, dispersività longitudinale, dispersività trasversale e diffusione molecolare. Il trasporto dell'arsenico nelle acque sotterranee è stato simulato in regime transitorio per un periodo di 30 anni, pari all'età presunta delle discariche, al fine di valutare l'entità del trasporto advettivo, dispersivo e diffusivo del contaminante a 30 anni dall'attivazione degli impianti. Non sono stati simulati nel modello processi di degradazione del contaminante o di adsorbimento alla matrice solida dell'acquifero, con l'obiettivo di effettuare una valutazione cautelativa dell'evoluzione temporale del pennacchio di arsenico in falda.

In Figura 8.7 sono mostrati i risultati ottenuti dal modello di trasporto relativamente al tempo T=0, T=1 anno, T=5 anni, T=10 anni, T=20 anni, T=30 anni dalla data di attivazione degli impianti. In Figura 8.8 è mostrato il risultato relativo allo *step* finale della simulazione, dove è riportato l'andamento del pennacchio di arsenico disciolto (concentrazioni espresse in  $\mu$ g/l) e, nella finestra in alto a destra, i risultati del bilancio di massa del contaminante relativo al dominio del modello sull'intero periodo temporale.

Le concentrazioni di As disciolto, simulate a fine periodo dal modello, in corrispondenza del pozzo idropotabile "S. Nicola 1" (5.4 µg/l) trovano una buona corrispondenza con le concentrazioni osservate in tale pozzo nel corso dei monitoraggi effettuati da ARPA nell'ultimo triennio 2015-2017 (valore medio 1.3 µg/l, valore massimo 3.3 µg/l). Le concentrazioni di As disciolto simulate a fine periodo dal modello in corrispondenza dei pozzi "Perez" ed "Ingrasciotta" (rispettivamente 0.25 µg/l e 0.005 µg/l) risultano più basse rispetto ai valori osservati nel corso dei monitoraggi effettuati da ARPA nell'ultimo triennio (Perez: valore medio 1 µg/l, valore massimo 1.44 µg/l; Ingrasciotta: valore medio 1 µg/l, valore massimo 3.5 µg/l). Le ragioni di tale scostamento andrebbero ricercate innanzitutto nelle assunzioni fatte per la stima degli apporti inquinanti provenienti dalla discarica di C/da S. Nicola Soprano - Località Gilletto, in assenza di dati di caratterizzazione o monitoraggio specifici per tale sito (concentrazione alla sorgente assunta uniforme e costante, pari al valore medio rilevato nel 2013-2014 nel piezometro P1 della discarica di C.da Misiddi-Campana). Tali assunzioni, infatti, potrebbero avere determinato una sottostima dell'entità dei rilasci del contaminante nelle acque sotterranee e quindi una minore concentrazione di arsenico disciolto rilevato nei pozzi posti a valle di tale discarica. Un'altra possibile ragione degli scostamenti rilevati potrebbe essere la presenza di sorgenti antropiche aggiuntive di arsenico, legate all'applicazione diffusa sulle superfici agricole di fertilizzanti chimici o pesticidi contenenti arsenico come impurezza o additivo, che potrebbero determinare un ulteriore rilascio in falda di As in fase disciolta, come meglio specificato più avanti nel presente paragrafo. A tale riguardo si evidenzia che il monitoraggio 2017 dello stato chimico del corpo idrico sotterraneo effettuato da ARPA nelle stazioni rappresentative "Perez", "Ingrasciotta" e "S. Nicola 1" ha rilevato la presenza di concentrazioni superiori al LOQ, ma inferiori allo SQ di cui alla Tab. 2 del DM Ambiente 06/07/2016, per i pesticidi diazinone, oxadixil e terbutilazina desetil. In particolare le concentrazioni superiori al LOQ del pesticida diazinone sono state rilevate nelle stazioni "Perez" ed "Ingrasciotta" nei campionamenti relativi alla stagione tardoautunnale/invernale (la stessa stagione in cui sono state rilevate concentrazioni superiori al LOQ di As in tali stazioni). Con riferimento al rilevamento della presenza di tale pesticida nelle acque sotterranee, va detto che recenti ricerche

hanno evidenziato la presenza, in tale principio attivo, di arsenico in concentrazioni comprese tra  $625 e 995 \mu g/kg$ , con un valore medio di 708  $\mu g/kg$  (Jayasumana et al., 2015). Le concentrazioni superiori al LOQ dei pesticidi oxadixil e terbutilazina desetil sono state invece rilevate nella stazione "S. Nicola 1" nei campionamenti della stagione primaverile e/o tardoautunnale.

L'andamento temporale della concentrazione di As disciolto calcolata dal modello in corrispondenza dei punti di osservazione dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, durante l'intero periodo di simulazione, è mostrato in Figura 8.9. In tale figura è riportata anche la mappa di concentrazione dell'arsenico disciolto nella zona dei laghi al termine del trentennio simulato.

Le concentrazioni simulate mostrano un andamento temporale crescente in particolare nei laghi Gorgo Medio, Gorgo Alto e Preola (per quest'ultimo, l'andamento crescente delle concentrazioni non si rileva nel punto di osservazione a centro lago, posto in una posizione marginale rispetto al pennacchio di contaminazione, ma in corrispondenza dell'estremità orientale del lago). I valori di concentrazione raggiunti a fine periodo ( $0.3 \mu g/l$  a Gorgo Medio,  $0.5 \mu g/l$  a Gorgo Alto,  $0.8 \mu g/l$  a Preola) risultano più bassi rispetto a quelli medi osservati nelle campagne di monitoraggio 2013-2015 e nella campagna di indagine 2018 effettuate da ARPA ( $4.9 \mu g/l$  a Gorgo Medio,  $7.4 \mu g/l$  a Gorgo Alto,  $6.2 \mu g/l$  a Preola). Le ragioni di tale scostamento andrebbero ricercate, oltre che nelle approssimazioni relative alla stima degli apporti inquinanti provenienti dalla discarica di C/da S. Nicola Soprano - Località Gilletto, anche nelle seguenti cause:

- il possibile rilascio nelle acque dei laghi dell'arsenico presente nella matrice sedimento, in
  fase adsorbita o in fase solida, attraverso processi di desorbimento o dissoluzione favoriti da
  determinate condizioni redox e dagli equilibri geochimici che ne derivano. In tali condizioni
  la matrice sedimento, contaminata dagli apporti provenienti dalle fonti di pressioni che
  insistono sul corpo idrico sotterraneo, diventerebbe una sorgente secondaria di
  contaminante, che determinerebbe, attraverso i suddetti processi di rilascio, maggiori
  concentrazioni di arsenico disciolto nelle acque dei laghi;
- il possibile arricchimento di arsenico nelle acque dei laghi causato dai processi evaporativi che ivi si verificano (Smadley P.L., Kinninburgh D.G., 2002), fattore non considerato nel modello di simulazione;
- la presenza di un'ulteriore possibile sorgente antropica di arsenico, connessa all'applicazione diffusa sulle superfici agricole di fertilizzanti chimici o pesticidi contenenti arsenico come impurezza o come additivo, che possono determinare un rilascio aggiuntivo di tale elemento nelle acque sotterranee. Sebbene, infatti, gran parte dei pesticidi ed erbicidi

contenenti arsenico siano stati banditi negli ultimi decenni, alcuni di essi vengono ancora utilizzati; inoltre i fertilizzanti chimici possono contenere quantità variabili di arsenico come impurezza. A tale proposito alcune ricerche hanno evidenziato la presenza di quantità significative di As in alcuni concimi chimici fosfatici e quantità minori, ma purtuttavia non trascurabili, di tale elemento in alcuni pesticidi (Jayasumana et al., 2015; Charter et al., 1995).

I risultati del bilancio dei flussi di massa dell'arsenico disciolto relativo ai 5 laghi della Piana sull'intero periodo simulato sono mostrati in Figura 8.10. Essi mettono in evidenza l'esistenza di un trasferimento di massa del contaminante in esame dalla falda idrica sotterranea ai laghi, con flussi entranti in particolare nei laghi Preola (0.18 g/giorno), Gorgo Alto (0.05 g/giorno) e Gorgo Medio (0.02 g/giorno).

Poiché i trasferimenti di massa riguardano il parametro arsenico, che è uno degli elementi chimici (di cui alle Tabb. 1/B e 3/B del D.M 260/2010) a sostegno della valutazione di stato ecologico dei corpi idrici superficiali, e poichè, sulla base dei monitoraggi 2013-2015 effettuati negli stessi, tale elemento risulta al di sopra degli SQA-MA per la matrice acqua, per la matrice sedimento o per entrambi (cfr. paragrafo 8.1), è possibile ipotizzare che il trasferimento dell'arsenico dal corpo idrico sotterraneo contribuisca a determinare il superamento di detti SQA-MA nei corpi idrici superficiali connessi, generando un impatto sullo stato ecologico dei laghi.



Figura 8.7 - Evoluzione del pennacchio di contaminazione di arsenico simulato dal modello (concentrazioni espresse in  $\mu g/l$ )



Figura 8.8 - Andamento del pennacchio di arsenico a fine simulazione (concentrazioni espresse in  $\mu g/l$ ), con riportato nella finestra in alto a destra il bilancio di massa del contaminante relativo al dominio del modello



Figura 8.9 – In basso: Andamento temporale della concentrazione di As disciolto (in mg/l) simulata in corrispondenza dei punti di osservazione dei laghi Murana, Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio, Gorgo Basso durante l'intero periodo di simulazione (tempo espresso in giorni). In alto: distribuzione areale della concentrazione di As disciolto (mg/l) in falda a fine periodo di simulazione



Figura 8.10 - Bilancio dei flussi di massa dell'arsenico disciolto relativo ai 5 laghi della Piana sull'intero periodo simulato

### 8.3.2 Modello di trasporto dei nitrati: messa a punto e presentazione dei risultati

Tra i parametri che contribuiscono a determinare lo stato chimico scarso del corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, c'è lo ione nitrato, il quale è stato rinvenuto, nel corso del monitoraggio effettuato da ARPA nel periodo 2011-2016, in concentrazioni medie annue superiori allo SQ di 50 mg/l di cui alla Tab. 2 del D.lgs. 30/2009, in alcune stazioni di monitoraggio rappresentative, tra cui i pozzi "S. Nicola 1", "Perez", "Ingrasciotta" ricadenti nell'area di studio.

Il superamento puntuale dello SQ del parametro nitrati riscontrato nelle stazioni di monitoraggio del corpo idrico sotterraneo della Piana, e la conseguente attribuzione al corpo idrico dello stato chimico scarso, rappresenta, come indicato nella Tabella 8.1 del presente documento, un possibile impatto delle fonti di pressione diffusa di tipo agricolo e zootecnico, nonché delle fonti di pressione puntuale rappresentate dalle discariche RSU dismesse presenti sul territorio.

Al fine di valutare l'entità di tale impatto sul corpo idrico sotterraneo, in termini di estensione della contaminazione da nitrati in falda, nonché di valutare l'eventuale trasferimento dei nitrati presenti nel corpo idrico sotterraneo ai corpi idrici superficiali connessi dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, è stato implementato con il codice di calcolo FEFLOW un modello di trasporto in falda dei nitrati provenienti sia dalle fonti di pressione diffusa che puntuale, simulando in regime transitorio il flusso di massa advettivo, dispersivo e diffusivo del contaminante presente in fase disciolta nella zona satura dell'acquifero.

Preliminarmente all'implementazione del modello, per quantificare i carichi diffusi di azoto rilasciati in falda, sono stati stimati gli apporti diffusi, partendo dalla carta dell'uso e della copertura del suolo *Corine Land Cover 2012* ed utilizzando, in funzione della tipologia di apporto da valutare, i seguenti ulteriori dati:

 carta del fattore di pericolo da fertilizzanti minerali Fpfm, elaborata dal Dipartimento Regionale per l'Agricoltura nell'ambito del calcolo dell'indice IPNOA (Regione Siciliana, 2017), con le relative classi di apporto di azoto individuate per ciascuna classe di Fpfm. Tale dato è stato utilizzato per la <u>stima degli apporti diffusi di origine agricola</u>. Nella zona di studio sono presenti soltanto tipi colturali classificati in classe di pericolo 3 ed è stato pertanto adottato per tutte le superfici agricole ricadenti nell'area di studio un valore costante di apporto di azoto, coincidente con l'estremo superiore dell'intervallo della classe di apporto (100 kg/ha/anno);

- carta del fattore di pericolo da fertilizzanti organici Fpfo, elaborata da ARPA Sicilia ai fini del calcolo dell'indice IPNOA, con il valore di apporto di azoto valutato per ciascuna classe di Fpfo e per ciascun comune, e dati dei carichi diffusi di origine zootecnica riportati nel "Piano di Tutela delle Acque della Sicilia B.16 Bacini minori tra Arena e Modione" (Regione Siciliana, 2007). Tali dati sono stati utilizzati per la stima degli apporti diffusi di azoto di origine zootecnica. È stato quindi stimato per tutte le superfici agricole e per le aree soggette a pascolo ricadenti nell'area di studio un valore di apporto di azoto di origine zootecnica pari a 2.63 kg/ha/anno;
- dati dei carichi potenziali domestici non fognati riportati nel "Piano di Tutela delle Acque della Sicilia – B.16 Bacini minori tra Arena e Modione" (Regione Siciliana, 2007). Tali dati sono stati utilizzati per la <u>stima degli apporti diffusi di azoto di origine domestica</u>. È stato pertanto stimato per le superfici urbanizzate residenziali con tessuto discontinuo ricadenti nell'area di studio, un valore di apporto di azoto di origine domestica pari a 0.14 kg/ha/anno.

Non essendo disponibili dati specifici sul surplus di azoto, per la valutazione dei carichi di azoto in falda è stata stimata una percentuale di percolazione degli apporti, derivante da concimazioni in eccesso rispetto ai fabbisogni delle colture, pari al 20%, cui è stato applicato un fattore correttivo dipendente dal valore di conducibilità idraulica dell'acquifero, al fine di tenere conto della diversa velocità di circolazione idrica nel mezzo in funzione del suo grado di permeabilità. Al fattore correttivo sono stati assegnati valori compresi tra 1 (nelle aree caratterizzate da più alti valori di conducibilità), e 0.25 (nelle aree caratterizzate da più bassi valori di conducibilità), utilizzando come base la distribuzione dei valori di K ottenuta al termine della calibrazione del modello di flusso (cfr. Figura 8.6).

Il risultato delle valutazioni effettuate, consistente nell'elaborazione della carta dei carichi diffusi di azoto rilasciati in falda nel settore occidentale del corpo idrico sotterraneo, è riportato nella Figura 8.11.

Il modello di trasporto dei nitrati è stato implementato, in regime transitorio, a partire dal modello di flusso calibrato, precedentemente messo a punto (paragrafo 8.2).

Per la modellazione dei processi di trasporto dei nitrati, è stata assegnata una condizione al contorno di trasporto di 2° tipo (condizione di *Neumann*), con flusso di massa di azoto imposto in tutta l'area del modello in cui è stato stimato un carico diffuso in falda. Il valore del flusso di massa assegnato
come condizione al contorno coincide con la distribuzione dei carichi diffusi di azoto illustrata in Figura 8.11.



Figura 8.11 - Carta dei carichi diffusi di azoto in falda (valori espressi in  $g/m^2/d$ )

Per simulare le sorgenti di contaminazione di nitrati rappresentate dalle discariche, non essendo disponibili dati relativi alle perdite del percolato in falda, è stata utilizzata una condizione al contorno di trasporto di 1° tipo (condizione di *Dirichlet*), con concentrazione imposta di azoto totale alle sorgenti. Analogamente al modello di trasporto dell'arsenico, sono state considerate due sorgenti areali di contaminazione, una posta in corrispondenza della discarica di C.da Misiddi-Campana, e l'altra posta in corrispondenza della discarica di C/da S. Nicola Soprano - Localita Gilletto. Il valore di concentrazione di azoto totale assegnato alle sorgenti è stato assunto costante nel tempo, non essendo possibile ricostruire, in base ai dati disponibili, un trend significativo di variazione della concentrazione del contaminante in falda; il suo valore è stato assunto pari al valore relativo al campionamento effettuato da ARPA nel piezometro P1 della discarica di C.da Misiddi-Campana nel febbraio 2018 (39 mg/l).

È stata quindi assegnata lungo il margine costiero sud-occidentale dell'acquifero una condizione al contorno di trasporto di 1° tipo vincolata al flusso di massa proveniente dalle discariche.

Per quanto riguarda i parametri chimico-fisici del mezzo necessari alla simulazione del trasporto, sono stati assegnati in input al modello valori, uniformi su tutto il dominio, di porosità, dispersività longitudinale, dispersività trasversale e diffusione molecolare.

Il trasporto dei nitrati nelle acque sotterranee è stato simulato in regime transitorio per un periodo complessivo di 80 anni, a partire dalla data presunta di inizio dell'utilizzo dei fertilizzanti chimici in agricoltura (T=0). La simulazione è stata effettuata in due step successivi:

- un primo *step*, finalizzato a simulare i primi 50 anni di trasporto dei nitrati in falda, provenienti esclusivamente da fonti di pressione di tipo diffuso;
- un secondo *step*, finalizzato a simulare i successivi 30 anni di trasporto dei nitrati in falda, provenienti oltre che da fonti diffuse, anche da fonti puntuali costituite dalle discariche RSU presenti nell'area di studio, la cui data di attivazione degli impianti è stata fatta risalire a circa 30 anni fa.

Le Figure 8.12 e 8.14 mostrano i risultati ottenuti rispettivamente dal primo e dal secondo *step* di simulazione, in termini di concentrazione in falda di azoto totale, espressa in mg/l di NO<sub>3</sub>, derivante dai carichi di azoto rilasciati dalle pressioni: è stato considerato solo lo ione nitrato in quanto rappresenta la forma più stabile delle specie azotate in ambiente ossidante e quindi quella presunta prevalente nella falda idrica sotterranea, come peraltro confermato dai risultati del monitoraggio 2017 effettuato nei pozzi Perez, Ingrasciotta e S. Nicola 1. Nella Figura 8.12 è mostrata la distribuzione della concentrazione di nitrati relativa al tempo T=0, T=5 anni, T=10 anni, T=30 anni, T=40 anni, T=50 anni dalla data presunta di inizio dell'utilizzo dei fertilizzanti chimici in agricoltura; nella Figura 8.14 la distribuzione della concentrazione al tempo T=50 anni + 1 giorno, T=51 anni, T=55 anni, T=60 anni, T=70 anni, T=80 anni dallo stesso riferimento temporale.

L'andamento temporale della concentrazione di azoto totale (mg/l di N totale) calcolata dal modello in corrispondenza dei punti di osservazione dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, è invece riportata nelle Figure 8.13 e 8.16, rispettivamente per il primo e per il secondo *step* di simulazione. In tali figure sono riportati anche la mappa di concentrazione dell'azoto totale nella zona dei laghi al termine di ciascuno *step e*, nella finestra in alto a destra, i risultati del bilancio di massa del contaminante relativi al dominio del modello, sui due periodi di simulazione.

In Figura 8.15 è riportata la distribuzione della concentrazione in falda di azoto totale, espressa in mg/l di  $NO_3^-$ , relativa al tempo finale di simulazione (T=80 anni), con evidenziata la linea ad isoconcentrazione 50 mg/l, che rappresenta lo SQ del parametro nitrati di cui alla Tab. 2



dell'Allegato 1 (lettera B, parte A) della Parte Terza del D. lgs. 152/06 (così come modificato dal DM Ambiente 06/07/2016).

Figura 8.12 - Evoluzione della concentrazione di  $NO_3$  (mg/l) in falda durante il I step di simulazione



Figura 8.13 - I step di simulazione: Andamento temporale della concentrazione di N totale (mg/l) in falda in corrispondenza dei punti di osservazione dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi (riquadro in basso). Distribuzione areale della concentrazione di N totale (mg/l) in falda a fine periodo (riquadro in alto). Bilancio di massa i N totale (g/d) relativo al dominio del modello a fine periodo (riquadro in alto a destra)

I risultati ottenuti dal primo *step* di simulazione mostrano come i carichi di azoto, rilasciati in falda da pressioni diffuse di tipo prevalentemente agricolo, determinino alla fine del periodo (T=50 anni) una contaminazione diffusa da  $NO_3^-$ , con concentrazioni superiori allo SQ di 50 mg/l, di cui alla Tab, 2 dell'Allegato 1 del D. lgs. 152/06 (così come modificato dal DM Ambiente 06/07/2016), in quasi tutto il settore nord-orientale del dominio (Figura 8.12). I valori e la distribuzione areale della concentrazione di nitrati in falda tendono a stabilizzarsi temporalmente dopo circa 25 anni dall'inizio della simulazione, mostrando successivamente piccole variazioni, significative solo localmente.

Nella zona dei laghi le concentrazioni simulate di N totale nel primo cinquantennio mostrano un andamento temporale crescente in corrispondenza di tutti e 5 i corpi idrici (Figura 8.13), sebbene con velocità inizialmente differenti; le concentrazioni tendono a stabilizzarsi dopo circa 25 anni attorno ad un valore di 12.8 mg/l di N totale (corrispondenti a 57 mg/l di NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), tranne in Gorgo Basso dove la concentrazione tende a stabilizzarsi dopo circa 35 anni attorno ad un valore di 11.3 mg/l di N totale (corrispondenti a 50 mg/l di NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

I risultati ottenuti dal secondo *step* mostrano come i carichi di azoto, rilasciati in falda dalle discariche RSU in aggiunta a quelli diffusi di origine prevalentemente agricola, determinino alla fine del periodo simulato (T=80 anni), una contaminazione da nitrati non molto differente da quella determinata dalle sole pressioni diffuse al tempo T=50 anni. La distribuzione spaziale della concentrazione di nitrati non presenta infatti sostanziali modifiche tra inizio e fine del secondo *step* di simulazione, con valori che si mantengono pressoché stazionari o, nelle zone poste a valle idrogeologico rispetto alle discariche, in leggero aumento. Solo localmente, in prossimità delle stesse discariche, si osserva un trend di crescita più significativo della concentrazione di nitrati in falda (Figura 8.14). Complessivamente quindi, al termine del secondo *step* di simulazione si osserva come i carichi di azoto, rilasciati da pressioni diffuse e puntuali, determinino nella falda idrica sotterranea uno stato di contaminazione diffusa da nitrati con concentrazioni superiori allo SQ di 50 mg/l in quasi tutto il settore nord-orientale del dominio, come mostrato in Figura 8.15.

La concentrazione di NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in falda simulata al tempo T=80 anni in corrispondenza delle stazioni di monitoraggio del corpo idrico sotterraneo "Perez" (78 mg/l), "Ingrasciotta" (76 mg/l) e "S. Nicola 1" (58 mg/l), trova una buona corrispondenza con il valore medio osservato in tali stazioni nel corso dei monitoraggi effettuati da ARPA nell'ultimo triennio 2015-2017 ("Perez": 86 mg/l; "Ingrasciotta": 69 mg/l; "S. Nicola 1": 56 mg/l). La corrispondenza tra valori simulati ed osservati è stata riscontrata anche nel pozzo "Bosco", ricadente nel settore meridionale del dominio del modello (cfr. Figura 8.14) e sottoposto a monitoraggio dal Dipartimento Agricoltura della Regione

Siciliana al fine di valutare l'efficacia del Programma d'Azione obbligatorio previsto per le aziende agricole in attuazione della Direttiva 91/676/CEE: la concentrazione di  $NO_3^-$  in falda, simulata al tempo T=80 anni, in corrispondenza di pozzo Bosco risulta pari a 47 mg/l, a fronte di un valore medio osservato di 48.9 mg/l derivante dai monitoraggi effettuati dal Dipartimento Agricoltura negli anni 2015-2016 (Regione Siciliana, 2017).

Nella zona dei laghi le concentrazioni simulate di N totale in Gorgo Alto, Gorgo Medio e Preola nell'ultimo trentennio mostrano una leggera tendenza all'aumento, con valori raggiunti a fine periodo compresi tra 12.7 e 14.7 mg/l (corrispondenti rispettivamente a 56 e 65 mg/l di NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), mentre non si osservano aumenti di concentrazione in Gorgo Basso e Murana dove essa si attesta rispettivamente intorno a 11.3 e 12.7 mg/l (Figura 8.16). Per quanto concerne il lago Preola, la leggera tendenza all'aumento delle concentrazioni riscontrata non si rileva nel punto di osservazione a centro lago, posto in una posizione marginale rispetto al pennacchio di contaminazione, ma in corrispondenza dell'estremità orientale del lago stesso.

A fronte delle concentrazioni di azoto totale simulate in corrispondenza dei laghi, il modello restituisce, tra i risultati del bilancio di massa, i valori dei flussi di massa del contaminante che dalla falda vengono trasferiti ai corpi idrici superficiali. Tali risultati sono riportati in Figura 8.17 per ciascuno dei 5 laghi relativamente al trentennio considerato nella seconda simulazione. I risultati ottenuti indicano l'esistenza di un trasferimento di massa di azoto totale dalla falda idrica sotterranea ai laghi, in atto in tutti e 5 i laghi, con valori maggiori in corrispondenza del lago Preola (21780 g/giorno), seguito dal Murana (3081 g/giorno), Gorgo Basso (1534 g/giorno), Gorgo Alto (1364 g/giorno) e Gorgo Medio (930 g/giorno).

I valori di concentrazione di N totale simulati al tempo T=80 anni nella zona dei laghi (compresi tra 11.3 e 14.7 mg/l) risultano più alti rispetto a quelli medi osservati nelle campagne di monitoraggio 2013-2015 e nella campagna di indagine 2018 effettuate da ARPA (2.7 mg/l in Gorgo Basso, 2.0 in Gorgo Medio, 2.0 mg/l a Gorgo Alto, 1.2 mg/l a Preola). Tale scostamento va interpretato attraverso una lettura integrata dei risultati del modello con i risultati del monitoraggio dello stato chimico ed ecologico dei laghi e dello stato chimico del corpo idrico sotterraneo della Piana.

Va infatti osservato che l'elemento di qualità biologica fitoplancton, analizzato da ARPA nel corso del monitoraggio dello stato ecologico dei laghi Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio e Gorgo Basso negli anni 2013 e 2015, ha fatto emergere la presenza in tali corpi idrici superficiali di fioriture di cianobatteri lungo tutto il periodo monitorato ed in modo particolare durante la stagione estivaautunnale, quando le fioriture diventano talora massicce (ARPA, 2016). In concomitanza con tali fioriture sono stati registrati nei laghi valori generalmente bassi di azoto inorganico disciolto (solo in Gorgo Alto di poco superiore allo SQA per tale elemento), e concentrazioni elevate di nitrati nel corpo idrico sotterraneo (superiori allo SQ), mentre i risultati del modello evidenziano la presenza di un flusso di massa di azoto dal corpo idrico sotterraneo ai laghi. Poiché il fitoplancton rappresenta un elemento biologico molto sensibile all'arricchimento di nutrienti e le fioriture di cianobatteri possono essere favorite da un loro eccesso, è possibile ipotizzare, sulla base dei dati disponibili, che i bassi valori di azoto inorganico disciolto riscontrati nelle acque dei laghi siano conseguenza della fioritura di cianobatteri, la cui proliferazione sarebbe quindi favorita dagli apporti di azoto provenienti dal corpo idrico sotterraneo contaminato. Le fioriture di cianobatteri, indicative di condizioni di eutrofizzazione dei laghi, potrebbero quindi essere considerate un impatto causato dal trasferimento del contaminante nitrato dal corpo idrico sotterraneo ai corpi idrici superficiali connessi.



Figura 8.14 - Evoluzione della concentrazione di  $NO_3^-$  (mg/l) in falda durante il II step di simulazione



Figura 8.15 - Distribuzione della concentrazione di  $NO_3^-$  (mg/l) in falda a fine periodo di simulazione (T=80 anni). In grassetto rosso è evidenziata la linea ad isoconcentrazione 50 mg/l di nitrato



Figura 8.16 - II step di simulazione: Andamento temporale della concentrazione di N totale (mg/l) in falda in corrispondenza dei punti di osservazione dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi (riquadro in basso). Distribuzione areale della concentrazione di N totale (mg/l) in falda a fine periodo (riquadro in alto). Bilancio di massa di N totale (g/d) relativo al dominio del modello a fine periodo (riquadro in alto a destra)



Figura 8.17 - Bilancio dei flussi di massa dell'azoto totale relativo ai 5 laghi della Piana sul secondo periodo di simulazione

## 9 Sintesi dei risultati e conclusioni

Lo studio del sistema idrogeologico della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, effettuato in attuazione della task T.3 del POA Acque sotterranee, ha avuto come obiettivo la valutazione delle interazioni tra l'omonimo corpo idrico sotterraneo individuato dal PdG, caratterizzato da superamenti puntuali di SQ e VS di cui al D.lgs. 30/2009, ed i corpi idrici superficiali ad esso connessi, con particolare riferimento ai laghi Preola e Gorghi Tondi, caratterizzati da uno stato chimico non buono ed uno stato ecologico cattivo o sufficiente, al fine di verificare se siano soddisfatte le condizioni concernenti il buono stato chimico del corpo idrico sotterraneo definite dal D. lgs. 30/2009 - All. 3, parte A, tabella 1.

Lo studio è consistito in una prima fase conoscitiva, finalizzata all'inquadramento ed alla modellizzazione concettuale del sistema, ed una seconda fase di valutazione dei processi idrologici, idrogeologici e di trasporto dei contaminanti, effettuata con strumenti di modellistica numerica di simulazione e basata sul quadro di conoscenza del sistema derivante dalla fase iniziale.

La fase conoscitiva iniziale ha portato all'elaborazione del modello concettuale idrogeologico preliminare dell'acquifero ed all'acquisizione degli ulteriori dati necessari alla successiva implementazione dei modelli di simulazione.

La valutazione dei processi idrologici, idrogeologici e di trasporto dei contaminanti, effettuata con codici di calcolo differenti in base ai processi da simulare ed alla loro scala di rappresentazione, secondo un approccio "modelli in cascata" con dettaglio di approfondimento crescente dalla scala regionale a quella locale, ha consentito di ottenere:

- la rappresentazione del sistema di flusso dell'acquifero e delle sue interazioni con i sistemi idrici superficiali connessi, con particolare riferimento agli scambi idrici con il reticolo idrografico interagente (scambi fiume-falda), e la valutazione del bilancio idrico annuo medio dell'acquifero riferito al periodo 2008-2017 (valutazioni a scala regionale effettuate con i codici MIKE SHE, MIKE HYDRO RR – NAM, MIKE HYDRO River HD);
- la rappresentazione del flusso idrico sotterraneo nel settore occidentale dell'acquifero, la simulazione del trasporto in falda dell'arsenico e dei nitrati provenienti dalle fonti di pressione puntuali e diffuse presenti, la stima delle concentrazioni dei contaminanti trasferite ai laghi ed alla captazione idropotabile posta a sud degli stessi, la stima dei flussi di massa dei contaminanti trasferite ai laghi (valutazioni a scala locale effettuate con il codice FEFLOW).

I risultati ottenuti dai modelli hanno consentito di migliorare la comprensione generale dei processi che caratterizzano il sistema e di rivedere, ed in alcuni casi affinare, il modello concettuale preliminare dell'acquifero.

I principali risultati ottenuti dallo studio vengono di seguito riepilogati:

- A. <u>Delimitazione dell'acquifero e del corpo idrico sotterraneo</u>. L'analisi dei dati geologici ed idrogeologici acquisiti ha consentito di ridefinire la perimetrazione dell'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara rispetto a quella contenuta nel PdG, attraverso la mappatura del limite inferiore del *complesso idrogeologico calcarenitico-sabbioso* permeabile riconosciuto nell'area. La delimitazione del corpo idrico sotterraneo ospitato nel suddetto acquifero può, almeno in prima approssimazione, essere assunta coincidente con quella dell'acquifero perimetrato, sulla base dei criteri indicati dal D. lgs. 30/2009, Allegato 1, Parte A4.
- B. <u>Comportamento idrodinamico dell'acquifero</u>. Il settore centro-meridionale dell'acquifero è caratterizzato dall'ampia depressione piezometrica indotta dai prelievi continui per uso idropotabile del campo pozzi di C.da Bresciana. L'evoluzione della superficie piezometrica in tale zona, simulata nel periodo 2008-2017 dal modello integrato a scala regionale, mostra una lieve tendenza all'aumento, in direzione nord-ovest, della zona di influenza del campo pozzi ed una leggera tendenza alla sua riduzione in direzione sud (zona costiera). Il settore occidentale dell'acquifero, nell'area più vicina all'abitato di Campobello di Mazara, mostra una leggera tendenza all'innalzamento dei livelli piezometrici. In C.da Staglio, zona interessata da emungimenti continui per uso idropotabile posta nel settore centro-settentrionale dell'acquifero, si osserva un andamento sostanzialmente stazionario della superficie piezometrica nel periodo temporale analizzato. Tuttavia in tale zona, prossima al limite nord-orientale dell'acquifero, le incertezze legate alla ricostruzione del substrato, emerse sulla base dei risultati del modello, rendono necessaria l'acquisizione di nuovi dati ed il loro utilizzo all'interno dello strumento modellistico messo a punto, al fine di verificare il comportamento idrodinamico di tale settore dell'acquifero.
- C. <u>Scambi fiume-falda</u>. Il reticolo idrografico del fiume Modione è idraulicamente connesso con l'acquifero della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara. In tale reticolo si distinguono, in tutto il periodo simulato dal modello regionale (2008-2017), tratti con comportamento esclusivamente alimentante la falda (fiume Modione a monte della confluenza con il Ricamino e canale Ricamino) e tratti con comportamento esclusivamente drenante la falda (fiume Modione compreso tra la confluenza con il canale Ricamino ed il limite dell'affioramento delle

Argille del Santerniano-Emiliano). Quest'ultimo tratto dell'asta del Modione (tratto fluviale drenante l'acquifero), è quello da prendere in considerazione ai fini della valutazione dello stato chimico del corpo idrico sotterraneo, nel caso in cui si debba applicare ad esso il test "acque superficiali connesse" della batteria di test per la verifica delle condizioni concernenti il buono stato chimico dei corpi idrici sotterranei, prendendo in considerazione le interazioni con il fiume Modione oltre che con i laghi di Preola e Gorghi Tondi (cfr. capitolo 2).

- D. Drenaggi dell'acquifero. L'acquifero, oltre ad essere drenato localmente in corrispondenza di alcuni tratti delle aste principali dei fiumi Modione e Belice (quest'ultimo solo per il tratto che delimita ad est l'acquifero), viene drenato anche dal reticolo idrografico secondario di tali fiumi e marginalmente dal reticolo secondario del fiume Delia-Arena, nonché da sorgenti connesse all'affioramento della superficie piezometrica in corrispondenza di locali depressioni della superficie topografica. La presenza di tali sorgenti riguarda specialmente la zona nord-orientale dell'acquifero, ed in particolare l'area a nord-est e sud-est dell'abitato di Partanna, nonché, più a sud, l'area posta lungo il versante in destra idrografica del fiume Belice. L'ubicazione delle sorgenti restituita dal modello trova una generale corrispondenza con la mappatura delle principali sorgenti dell'acquifero realizzata dalla Cassa per il Mezzogiorno nell'ambito delle "Indagini idrogeologiche per l'approvvigionamento idrico del Sistema II Nord Occidentale della Sicilia" (Cassa per il Mezzogiorno, 1982).
- E. Bilancio idrico dell'acquifero. La valutazione del bilancio idrico medio annuo dell'acquifero riferito al decennio 2008-2017, effettuata sulla base dei risultati del modello integrato regionale, mostra un valore medio annuo di variazione di immagazzinamento nell'acquifero pari a 1.3 Mm<sup>3</sup>/anno sul periodo, corrispondente al 3% del totale delle voci di entrata del bilancio. Non emergono pertanto, nel periodo analizzato, condizioni di deficit di bilancio dell'acquifero, ma bensì, in presenza di flussi in uscita dello stesso ordine di grandezza dei flussi in entrata, condizioni prossime all'equilibrio di bilancio. Il grado di confidenza complessivo dei risultati della valutazione del bilancio idrico dipende dall'accuratezza della stima dei prelievi e dal grado di calibrazione raggiunto dal modello. Ulteriori affinamenti del modello di bilancio potranno derivare dal miglioramento del grado di calibrazione del modello integrato, per il quale sarà necessario disporre di un maggiore numero di punti di osservazione del livello piezometrico dell'acquifero, di una distribuzione adeguata di valori dei parametri idrodinamici del sistema idrogeologico ottenuti tramite prove di pompaggio (conducibilità idraulica, porosità efficace, coefficiente di immagazzinamento), di serie temporali di dati di portata relativi al fiume Modione e di risultati di misure differenziali di portata effettuate lungo tale corso d'acqua.

- F. Valutazione del trasporto in falda dell'arsenico proveniente dalle discariche RSU dismesse. Le concentrazioni di As disciolto, simulate a fine periodo di simulazione (30 anni) dal modello, in corrispondenza del pozzo idropotabile "S. Nicola 1" trovano una buona corrispondenza con le concentrazioni osservate in tale pozzo nel corso dei monitoraggi effettuati da ARPA nell'ultimo triennio 2015-2017. Quelle simulate in corrispondenza dei pozzi "Perez" ed "Ingrasciotta" risultano più basse rispetto ai valori osservati nel corso dei monitoraggi effettuati da ARPA nell'ultimo triennio. La ragioni degli scostamenti rilevati andrebbero ricercate innanzitutto nelle assunzioni fatte per la stima degli apporti inquinanti provenienti dalla discarica di C/da S. Nicola Soprano Località Gilletto, che potrebbero avere determinato una sottostima dell'entità dei rilasci del contaminante nelle acque sotterranee. Un'altra possibile ragione degli scostamenti rilevati potrebbe essere la presenza di sorgenti antropiche aggiuntive di arsenico, legate all'applicazione diffusa sulle superfici agricole di fertilizzanti chimici o pesticidi contenenti arsenico come impurezza o additivo, che potrebbero determinare un ulteriore rilascio in falda di As in fase disciolta.
- G. Valutazione del trasporto ai laghi dell'arsenico proveniente dalle discariche RSU dismesse. Le concentrazioni simulate in corrispondenza dei punti di osservazione dei laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi mostrano un andamento temporale crescente in particolare nei laghi Gorgo Medio, Gorgo Alto e Preola. I valori di concentrazione raggiunti a fine periodo (30 anni) risultano più bassi rispetto a quelli medi osservati nelle campagne di monitoraggio 2013-2015 e nella campagna di indagine 2018 effettuate da ARPA. Gli scostamenti rilevati andrebbero ricercati, oltre che nelle approssimazioni relative alla stima degli apporti inquinanti della discarica di C/da S. Nicola Soprano - Località Gilletto, anche nella presenza di possibili sorgenti antropiche aggiuntive di arsenico (applicazione diffusa sulle superfici agricole di fertilizzanti chimici o pesticidi contenenti arsenico come impurezza o additivo; rilasci nelle acque dei laghi di arsenico contenuto in fase adsorbita o in fase solida nella matrice sedimento contaminata), nonché nell'arricchimento di tale elemento nelle acque dei laghi causato dai processi evaporativi. I risultati del bilancio dei flussi di massa dell'arsenico disciolto relativo ai 5 laghi della Piana sull'intero periodo simulato mettono in evidenza l'esistenza di un trasferimento di massa del contaminante in esame dalla falda idrica sotterranea ai laghi, con flussi entranti in particolare nei laghi Preola, Gorgo Alto e Gorgo Medio. Tali flussi di massa possono contribuire a determinare il superamento degli SQA-MA dell'arsenico nei corpi idrici superficiali connessi al corpo idrico sotterraneo, generando un possibile impatto sullo stato ecologico dei laghi.

- H. Valutazione del trasporto in falda dei nitrati provenienti da fonti di pressione diffuse e puntuali. Al termine del periodo di simulazione (80 anni) si osserva come i carichi di azoto, rilasciati in falda da pressioni diffuse di origine prevalentemente agricola nonché da pressioni puntuali (discariche), determinino nella falda idrica sotterranea uno stato di contaminazione diffusa da nitrati con concentrazioni superiori allo SQ di 50 mg/l di cui alla Tab, 2 dell'Allegato 1 (lettera B, parte A) della Parte Terza del D. lgs. 152/06 (così come modificato dal DM Ambiente 06/07/2016) in quasi tutto il settore nord-orientale del dominio. La concentrazione di NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in falda simulata al tempo T=80 anni in corrispondenza delle stazioni di monitoraggio del corpo idrico sotterraneo "Perez", "Ingrasciotta" e "S. Nicola 1", trova una buona corrispondenza con il valore medio osservato in tali stazioni nel corso dei monitoraggi effettuati da ARPA nell'ultimo triennio 2015-2017. La corrispondenza tra valori simulati ed osservati è stata riscontrata anche nel pozzo "Bosco", ricadente nel settore meridionale del dominio del modello e sottoposto a monitoraggio dal Dipartimento Agricoltura della Regione Siciliana al fine di valutare l'efficacia del Programma d'Azione obbligatorio previsto per le aziende agricole in attuazione della Direttiva 91/676/CEE.
- I. Valutazione del trasporto ai laghi dei nitrati provenienti da fonti di pressione diffuse e puntuali. Nella zona dei laghi le concentrazioni simulate di N totale in Gorgo Alto, Gorgo Medio e Preola a fine periodo (T=80 anni) si attestano su valori compresi tra 11.3 e 14.7 mg/l. A fronte delle concentrazioni di azoto totale simulate in corrispondenza dei laghi, si osserva l'esistenza di un trasferimento di massa di azoto totale dalla falda idrica sotterranea ai laghi, in atto in tutti e 5 i laghi, con valori maggiori in corrispondenza del lago Preola, seguito dal Murana, Gorgo Basso, Gorgo Alto e Gorgo Medio. I valori di concentrazione di N totale simulati al tempo T=80 anni nella zona dei laghi risultano tuttavia più alti rispetto a quelli medi osservati nelle campagne di monitoraggio 2013-2015 e nella campagna di indagine 2018 effettuate da ARPA. Tale scostamento va interpretato attraverso una lettura integrata dei risultati del modello con i risultati del monitoraggio qualitativo dei corpi idrici della Piana. Infatti il monitoraggio dello stato ecologico dei laghi di Preola, Gorgo Alto, Gorgo Medio e Gorgo Basso effettuato da ARPA negli anni 2013 e 2015 ha fatto emergere la presenza in tali corpi idrici di fioriture di cianobatteri, sensibili all'arricchimento di nutrienti, lungo tutto il periodo monitorato ed in modo particolare durante la stagione estiva-autunnale, in concomitanza con valori generalmente bassi di azoto inorganico disciolto, mentre il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei ha fatto emergere negli stessi periodi concentrazioni elevate di nitrati nel corpo idrico sotterraneo (superiori allo SQ). D'altra parte i risultati del modello di trasporto evidenziano la presenza di un flusso di massa di azoto dal corpo idrico sotterraneo ai laghi. È

pertanto possibile ipotizzare, sulla base dei dati disponibili, che i bassi valori di azoto inorganico disciolto riscontrati nelle acque dei laghi siano conseguenza della fioritura di cianobatteri, la cui proliferazione sarebbe quindi favorita dagli apporti di azoto provenienti dal corpo idrico sotterraneo contaminato. Le fioriture di cianobatteri, indicative di condizioni di eutrofizzazione dei laghi, potrebbero quindi essere considerate un impatto causato dal trasferimento del contaminante nitrato dal corpo idrico sotterraneo ai corpi idrici superficiali connessi.

In sintesi lo studio del sistema idrogeologico della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara, effettuato nell'ambito della Task T.3 del POA acque sotterranee, ha consentito di valutare a scala regionale le interazioni tra l'omonimo corpo idrico sotterraneo del PdG ed i corpi idrici superficiali ad esso connessi. Esso fornisce un primo quadro conoscitivo di base, utile per pervenire, previa ulteriore acquisizione dati, affinamento ed integrazione dei modelli, all'aggiornamento dello stato ambientale del corpo idrico sotterraneo ed alla verifica di scenari di pianificazione e gestione rivolti al conseguimento degli obiettivi ambientali di cui alla Direttiva 2000/60/CE.

Lo studio effettuato ha altresì consentito di stimare a scala locale l'impatto delle discariche RSU e delle aree agricole sul corpo idrico sotterraneo della Piana di Castelvetrano-Campobello di Mazara e l'entità del possibile trasferimento dei contaminanti presenti nel corpo idrico sotterraneo ai laghi Murana, Preola e Gorghi Tondi, ipotizzando le possibili tipologie di impatto sul loro stato qualitativo.

In conclusione, sebbene l'incertezza associata alla stima di alcuni dati caratteristici del sistema, inseriti in input ai modelli di simulazione, renda opportuno proseguire con le attività di monitoraggio dei corpi idrici della Piana e con l'affinamento dei modelli, è possibile affermare, sulla base dei risultati ottenuti, che non sono soddisfatte le condizioni concernenti il buono stato chimico del corpo idrico sotterraneo di cui all'art. 4, comma 2, lettera c, punto 2 del D. Igs. 30/2009, dal momento che i contaminanti trasferiti dal corpo idrico sotterraneo ai corpi idrici superficiali connessi determinano un impatto sul loro stato ecologico (in particolare sull'elemento di qualità chimica a sostegno Arsenico di cui alla Tab. 1/B del D.lgs. 172/2015), contribuendo a determinare uno stato ecologico non buono dei laghi.

## Bibliografia

- AdBArno (2008) Progetto Piano Stralcio "Bilancio Idrico". Adottato nella seduta del Comitato Istituzionale del 28 febbraio 2008 e pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 78 del 2 aprile 2008
- ARPA Sicilia (2016) Monitoraggio Acque di transizione ai sensi della Direttiva quadro europea sulle acque (2000/60/CE) - attività 2015 (http://www.arpa.sicilia.it/wpcontent/uploads/2016/12/transizione\_dati-2015.pdf)
- Aruta, L., Buccheri, G., Greco, A., and Sprovieri, R. (1973) Il Siciliano della foce del Belice (Sicilia meridionale), Riv. Min. Sic., no., 136–138, p. 234–239.
- Basilone L. (2012) Litostratigrafia della Sicilia. Arti Grafiche Palermitane s.r.l., Palermo, 160 pp, ISBN: 978-88-97559-09-2
- Belice Ambiente S.p.A. (2014) Prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento nella gestione operativa della discarica, Relazione annuale art. 10 co. 2 lett. l) D. lgs. 36/03, Discarica per rifiuti non pericolosi e in prevalenza urbani di Contrada Misiddi/Campana Campobello di Mazara (TP) Attuazione AIA DRS ARTA n, 366 del 29/06/2010 Relazione del Gestore della Discarica per l'anno 2013
- Bigi G., Bonardi G., Catalano R., Cosentino D., Lentini F., Parotto M., Sartori R., Scandone P., Turco E. (1992). Structural model of Italy: Progetto Finalizzato Geodinamica. Rome: CNR-GNDT. scale 1:500,000, Sheet N.6
- Bommarito S., D'Angelo U. & Vernuccio S. (1992) Carta geologica della Tavoletta Calatafimi (F° 257 I SE). Dip. di Geologia e Geodesia, Università di Palermo.
- Bommarito S. & Di Pietro R. (2000) Carta geologica della Tavoletta Gibellina (F° 258 III NO). Dip. di Geologia e Geodesia, Università di Palermo.
- Bonanno A., Ciabatti P., Liguori V., Provenzano M. C. & Sortino G. (2000) Studio idrogeologico ed idrogeochimico dell'acquifero multifalda della Piana di Castelvetrano e Campobello di Mazara (Sicilia occidentale). Quaderni di Geologia Applicata, 7, 4, 45-59.
- Cassa per il Mezzogiorno Ripartizione progetti idrici divisione V Schemi idrici della Sicilia (1982) - Indagini idrogeologiche per l'approvvigionamento idrico del Sistema II Nordoccidentale della Sicilia (Acquiferi principali). Arlab S.r.l.
- Castany G. (1985), Idrogeologia. Principi e metodi, Dario Flaccovio editore
- Celico P. (1988), Prospezioni Idrogeologiche, Vol. I e Vol. II, Liguori ed. Napoli
- Charter, R.A., Tabatabai, M.A., Schafer, J.W. (1995). Arsenic, molybdenum, selenium, and tungsten contents of fertilizers and phosphate rocks. Commun. Soil Sci. Plant Anal 26, p.3051-3062.

- Cipolla F. (1934). Nuovi contributi alla geologia e geografia fisica di Mazara del Vallo e suoi dintorni (Prov. di Trapani). Boll. Soc. di Scienze Naturali ed Economiche di Palermo, anno XV, 1934-XII.
- CNR (2014) VIGOR: Sviluppo geotermico nella regione Sicilia Studio di fattibilità a Mazara del Vallo, Studio di fattibilità a Termini Imerese, Valutazione geotermica con geofisica elitrasportata - Edizioni CNR – IGG Area della Ricerca di Pisa, settembre 2014
- Cusimano G., Hauser S , Vassallo M. (2006) Hydrogeochemistry of a wetland area of southwestern Sicily (Italy); EWA (European Water Association)
- Dall'Aglio M. e Tedesco C. (1968) Studio geochimico ed idrogeologico di sorgenti della Sicilia.In: Rivista Mineraria n. 112-114 luglio-dicembre 1968
- D'Angelo U., Parrino G. & Vernuccio S. (2001) Il quaternario della fascia costiera compresa tra Punta Granitola e Porto Paleo (Sicilia sud occidentale). Naturalista Sic., IV, XXV (3-4), 333-344.
- D'Angelo U. & Vernuccio S. (1994) Note illustrative della carta geologica del Foglio 617
  'Marsala' Scala 1:50.000 Dip. di Geologia e Geodesia, Università di Palermo in Boll. Soc. Geol. It., 113, 55-67
- Decima a., Wezel F.C. (1971) Osservazioni sulle evaporiti messiniane della Sicilia centromeridionale. Riv. Min. Sic., 130-132: 172-187,. Palermo.
- De Vivo D., Lima A., Cicchella D., Frizzo P., Di lella L.A., Raccagni L., Bove M.A., Albanese S., Grezzi G., Sabatini G., Protano G., Riccobono F. (2009) – Atlante geochimico-ambientale d'Italia, ARACNE Editrice S.r.l., ROMA
- Di Maggio C., Di Trapani F.P., Madonia G., Salvo D., Vattano M. (2010) Primo contributo sui sinkhole nelle evaporiti della Sicilia (Italia). In: ISPRA, Atti 2° Workshop internazionale "I Sinkholes Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato" Roma 3-4 Dicembre 2009
- EOS S.r.l. (2011), Relazione monitoraggi discarica di rifiuti solidi urbani in gestione operativa di Campobello di Mazara ATO TP2 Belice Ambiente
- European Commission (2009) Guidance on Groundwater Status and Trend Assessment, Guidance Document No. 18 2009. ISBN 978-92-79-11374-1. European Communities, 2009 Luxembour
- European Commission (2015) Technical Report on Groundwater Associated Aquatic Ecosystems, Technical Report N. 9 – 2015. ISBN 978-92-79-53895-7. European Communities, 2015 Luxembour
- Fried J.J., Mouton J., Mangano F. (1982), Carta delle risorse idriche sotterranee, 1982

- Giannotti G.P., Lombardi L., Sidoti G. (1972) Schema idrogeologico della Sicilia occidentale. In: Rivista mineraria siciliana n. 133-135, Gennaio-Giugno 1972.
- ISPRA (2017) Manuali e Linee Guida 157/2017 Percopo C., Brandolin D., Canepa M., Capodaglio P., Cipriano G., Gafà R., Iervolino D., Marcaccio M., Mazzola M., Mottola A., Sesia E., Testa M. - Criteri tecnici per l'analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei. Roma, Giugno 2017
- ISPRA (2016) Manuali e Linee Guida 143/2016 Linee guida per il monitoraggio delle sostanze prioritarie (secondo D. lgs. 172/2015). Roma, Ottobre 2016
- ISPRA Servizio Geologico d'Italia (2014) Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia Volume XCV - Geologia della Sicilia con allegata "Carta Geologica della Sicilia scala 1:250.000", Editors Fabio Lentini, Serafina Carbone, 2014.
- Jayasumana C., Fonseka S., Fernando A., Jayalath K., Amarasinghe M., Siribaddana S., Gunatilake S., Paranagama P. (2015) Phosphate fertilizer is a main source of arsenic in areas affected with chronic kidney disease of unknown etiology in Sri Lanka, Springerplus. 2015 Feb 24;4:90. doi: 10.1186/s40064-015-0868-z. eCollection 2015.
- La Rosa A., De Domenico R. (2006) Cartografia geologica, geomorfologica, idrogeologica in scala 1:50.000 Piano Territoriale Paesaggistico Ambiti regionali 2 e 3 ricadenti nella provincia di Trapani. Regione Siciliana, Assessorato dei Beni Culturali e dell'Identità Siciliana, Dipartimento dei Beni Culturali e dell'Identità Siciliana, Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Trapani, Progetto finanziato con P.O.R. Sicilia 2000-2006 Misura 2.02 Azione C
- Regione Siciliana Assessorato Regionale dell'Agricoltura, dello Sviluppo rurale e della Pesca mediterranea – Dipartimento Regionale dell'Agricoltura (2017), Metodo IPNOA – Fattore di pericolo determinato dai fertilizzanti minerali (FPfm) Regione Sicilia – Scala 1:350.000. Documento interno
- Regione Siciliana Assessorato Agricoltura e Foreste Dipartimento Interventi Infrastrutturali (2017), "Monitoraggio della Direttiva Nitrati in agricoltura". Documento interno
- Regione Siciliana Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità (2016), "Piano di Gestione del Distretto Idrografico della Sicilia – 2° ciclo di pianificazione 2015-2021. Giugno 2016
- Regione Siciliana Presidenza, Presidenza del Consiglio dei Ministri Dipartimento della Protezione Civile, Commissario Delegato per l'Emergenza Bonifiche e la Tutela delle Acque in Sicilia (2007), Piano di Tutela delle Acque della Sicilia – B.16 Bacini minori tra Arena e Modione (R19055). Dicembre 2007.

- Regione Siciliana Assessorato Regionale Territorio e Ambiente Dipartimento Territorio e Ambiente Servizio 4 "Assetto del territorio e difesa del suolo" (2006), Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) Area Territoriale tra il Bacino Idrografico del Fiume Arena ed il Bacino Idrografico del Fiume Modione (055), Bacino idrografico del Fiume Modione ed Area Territoriale tra il Bacino Idrografico del F. Modione ed il Bacino Idrografico del F. Belice (056). Relazione.
- Smadley, P.L., Kinninburgh, D.G. (2002) A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry 17, p.517-568
- Thornthwaite C.W. & Mather J.R. (1957) Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Certerton, N.J.
- Trevisan L. &Di Napoli E. (1937) Tirreniano, Siciliano e Calabriano nella Sicilia sud-occidentale.
  Note di stratigrafia, paleontologia e morfologia. Giornale di Sc. Naturali ed Economiche. Mem.
  n. 8 (1937); Palermo
- Vassallo M. (2000) Caratterizzazione idrogeologica e geochimica delle acque del Lago Preola e dei Gorghi Tondi (Mazara del Valo); tesi di laurea anno accademico 2000-2001; corso di laurea in Scienze Geologiche, Università di Palermo
- Vitale F. P. (1990) Studi sulla Valle del Medio Belice (Sicilia centro-occi- dentale). L'avanfossa Plio-Pleistocenica nel quadro dell' evoluzione paleotettonica dell'area. tutore: Prof. R. Catalano. tesi di dottorato, II Ciclo.
- Vitale F. P. (1997) The Belice and the Men Basins: sequence stratigraphy and evolution during the Pliocene and the Early Pleistocene. In: Catalano R. (Ed.): Time scales and basin dynamics. Sicily, the adjacent Mediterranean and other natural laboratories». Field Workshop in Western Sicily, 8th workshop ILP task Force, Field workshop guidebook: 48-58
- Vitale F. P. & Sulli A. (1997) The Regional Pattern of the Belice and Menfi basins: a deep geologic profile. In: Catalano R. (Ed.): Time scales and basin dynamics. Sicily, the adjacent Mediterranean and other natural laboratories». Field Workshop in Western Sicily, 8th workshop ILP task Force, Field workshop guide book: 59-69
- WWF (2011) Piano di Gestione "Sciare e zone umide di Mazara e Marsala" (SIC ITA010005 "Laghetti di Preola e Gorghi Tondi e Sciare di Mazara", SIC ITA 010014 "Sciare di Marsala", ZPS ITA 010031 "Laghetti di Preola e Gorghi tondi, Sciare di Mazara e Pantano Leone", SIC ITA010012 "Marausa: macchia a Quercus calliprinos"), Luglio 2011