



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO**

**ISTITUTO DI IDRAULICA AGRARIA
VIA CELORIA 2 - 20133 MILANO**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA "A. DESIO"
SEZIONE DI GEOFISICA
VIA CICOGNARA 7 - 20129 MILANO**

***REALIZZAZIONE DI UN MODELLO PRELIMINARE
DEL FLUSSO IDRICO NEL SISTEMA ACQUIFERO
DELLA PROVINCIA DI CREMONA***

RELAZIONE FINALE



Milano, luglio 2007



**Provincia di Cremona
Settore Ambiente**

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento va a tutti coloro che hanno con grande cortesia e disponibilità fornito dati, informazioni e competenze utili alla realizzazione di questa ricerca:

- ARPA Lombardia per i dati meteorologici ed idrometrici;
- Autorità di Bacino del Fiume Po per i rilievi topografici dei principali corsi d'acqua;
- Consorzio per l'Incremento dell'Irrigazione nel Territorio Cremonese, Consorzio di Bonifica Naviglio-Vacchelli, Consorzio di Bonifica Dugali, Consorzio di Bonifica Navarolo e Consorzio di II grado Adda-Serio per aver fornito informazioni e dati indispensabili per la realizzazione delle mappe dei comizi irrigui e per la definizione delle caratteristiche del sistema irriguo provinciale;
- Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca per aver fornito i dati della rete di monitoraggio idrometrico e freaticometrico consortile e per il supporto nella scelta dei pozzi per l'esecuzione delle prove di portata;
- Consorzio dell'Adda e Consorzio dell'Oglio per i dati relativi alle portate derivate;
- D.G. Agricoltura-Regione Lombardia per aver fornito alcuni dati raccolti nell'ambito del progetto SIGRIA;
- D.G. Risorse Idriche e Servizi di Pubblica Utilità – Unità organizzativa Risorse Idriche – Regione Lombardia per i dati relativi al Programma di Tutela e Uso delle Acque;
- D.G. Territorio e Urbanistica - U.O. Infrastruttura per l'Informazione Territoriale - U.O.O. Sistema Informativo Geologico per avere concesso gli applicativi per l'archiviazione delle stratigrafie di pozzo;
- ERSAF Lombardia per le informazioni sulla pedologia e l'uso del suolo;
- Padania Acque S.p.A., per aver messo a disposizione i dati relativi ai prelievi da falda e le misure effettuate della rete di monitoraggio piezometrico della società, nonché le informazioni sulle misure di controllo periodicamente eseguite;
- Cogeide S.p.A. per il supporto per l'esecuzione delle prove di portata a Treviglio.

Indice

1	Introduzione.....	1
1.1	Modalità di svolgimento del lavoro.....	4
2	La banca dati.....	5
2.1	Agrometeorologia.....	5
2.2	Uso del suolo.....	8
2.3	Pedologia.....	9
2.4	Idrografia superficiale.....	12
2.4.1	Reticolo idrico naturale e artificiale.....	12
2.4.2	Fontanili.....	12
2.5	Idrometria.....	13
2.5.1	Stazioni idrometriche.....	13
2.5.2	Derivazioni da corsi d'acqua superficiali.....	15
2.5.3	Impianti di sollevamento da corsi d'acqua superficiali.....	17
2.5.4	Fontanili.....	17
2.6	Piezometria.....	18
2.6.1	Piezometria dell'acquifero freatico.....	19
2.6.2	Piezometria dell'acquifero semi-confinato.....	20
2.7	Prelievi da acque sotterranee.....	20
2.8	Trasmissività.....	20
2.9	Stratigrafie di pozzi per acqua.....	20
2.10	Sistema irriguo.....	22
2.10.1	Gestione delle acque irrigue.....	22
2.10.2	Dotazioni irrigue.....	23
3	Il modello di simulazione del bilancio idrologico del terreno e dei flussi di ricarica alla falda.....	25
3.1	Caratteristiche del modello di simulazione.....	25
3.1.1	Modulo di bilancio idrologico del suolo.....	26
3.1.2	Modulo delle fasi fenologiche colturali.....	27
3.1.3	Modulo del sistema irriguo.....	28
3.2	Implementazione del modello di simulazione.....	36
3.2.1	Uso del suolo di riferimento.....	37
3.2.2	Parametri colturali.....	41
3.2.3	Spessori e parametri idraulici degli strati della zona di radicazione.....	44
3.2.4	Comizi irrigui.....	47
3.2.5	Serie giornaliera di dati agrometeorologici e loro spazializzazione.....	60
3.2.6	Serie giornaliera di portate derivate da corsi d'acqua superficiali.....	65
3.2.7	Serie giornaliera di portate da fontanili.....	66
3.2.8	Serie giornaliera di portate da coli.....	68
3.3	Risultati delle simulazioni.....	71
3.3.1	Simulazione dello stato di fatto.....	71
3.3.2	Simulazione degli effetti di interventi sul sistema irriguo.....	81
4	Elaborazione di carte tematiche e modello concettuale dell'acquifero.....	87
4.1	Definizione dell'area di studio.....	88
4.2	Topografia.....	89
4.3	Piezometria.....	91
4.3.1	Piezometria dell'acquifero freatico.....	91
4.3.2	Piezometria dell'acquifero semi-confinato.....	106
4.4	Parametri dell'acquifero semi-confinato da prove in pozzo.....	111

4.4.1	Trasmissività “apparente” dell’acquifero semi-confinato	111
4.4.2	Conducibilità idraulica dell’acquifero semi-confinato	112
4.4.3	Portate specifiche dell’acquifero semi-confinato	113
4.5	Prelievi.....	114
4.6	Struttura idrogeologica del sistema acquifero	115
4.6.1	Base del sistema acquifero	115
4.6.2	Base dell’acquifero freatico equivalente	116
4.6.3	Analisi della permeabilità dei sedimenti del sistema acquifero attraverso le stratigrafie.....	118
4.7	Il modello concettuale del sistema acquifero	121
4.7.1	Meccanismi di alimentazione	121
4.7.2	Meccanismi di drenaggio da parte del reticolo idrografico superficiale ...	122
4.7.3	Circolazione nel sistema acquifero.....	123
5	Il modello preliminare dell’acquifero.....	125
5.1	Caratteristiche generali dei modelli realizzati	125
5.2	Il modello monostrato equivalente – M ² ME-CR.....	126
5.2.1	Caratteristiche del modello M ² ME-CR	126
5.2.2	Calibrazione del modello.....	129
5.3	Il modello bistrato M ² S-CR.....	137
5.3.1	Le caratteristiche di M ² S-CR.....	138
5.3.2	I parametri fisici di M ² S-CR.....	138
5.3.3	Risultati di M ² S-CR.....	141
6	Risultati.....	146
6.1	Stime del bilancio idrico.....	146
6.1.1	Risultati di M ² ME-CR	146
6.1.2	Risultati di M ² S-CR.....	148
6.2	Analisi dei risultati per scenari	149
6.2.1	Variazione del flusso entrante da monte.....	149
6.2.2	Variazione della ricarica dovuta all’irrigazione	151
6.3	Caratterizzazione e zonazione dell’acquifero.....	153
6.3.1	Descrizione delle zone.....	153
6.3.2	Caratterizzazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee.....	165
7	Prospettive	167
7.1	Progettazione di una rete di monitoraggio.....	167
7.2	Proposte per indagini su campo.....	168
7.2.1	Fontanili.....	168
7.2.2	Terrazzi geomorfologici	168
7.2.3	Rapporti tra irrigazione e ricarica della falda	168
7.2.4	Datazioni.....	168
8	Bibliografia.....	169
9	Appendici	176
9.1	Modulo di bilancio idrologico del suolo	176
9.1.1	Evapotraspirazione di riferimento	177
9.1.2	Traspirazione potenziale.....	179
9.1.3	Traspirazione	181
9.1.4	Evaporazione	183
9.1.5	Deflusso superficiale	184
9.1.6	Intercettazione	187
9.1.7	Percolazione	188
9.2	Modulo delle fasi fenologiche colturali.....	189

9.2.1	Determinazione del giorno di semina:.....	189
9.2.2	Determinazione degli stadi di sviluppo fenologico:	189
9.2.3	Esempio di applicazione.....	192
9.3	Indagini sul campo	195
9.3.1	Escursione sul territorio.....	195
9.3.2	Prove di portata nel Comune di Treviglio	202
9.4	Elenco delle tavole allegate	207
9.5	Equazioni discrete dei modelli numerici di flusso.....	208
9.6	Groundwater Modeling System.....	211
9.6.1	L'ambiente di sviluppo del modello.....	211
9.6.2	Il modello MODFLOW	211
9.7	Il metodo del modello di confronto (CMM).....	216
9.7.1	Caratteristiche del modello di confronto	216
9.8	Simulazione geostatistica	219

1 Introduzione

La normativa regionale, in particolare l'art. 43, comma 1, della L.R. 12 dicembre 2003, n. 26, attribuisce alle Province la competenza sul rilascio di autorizzazioni allo scavo dei pozzi ed agli attingimenti, sul rilascio di concessioni relative alle piccole derivazioni di acque e su ogni altra funzione amministrativa in materia di demanio idrico. A questo si associa il "Protocollo di intesa tra Regione Lombardia e le Province Lombarde per l'avvio dell'esercizio delle deleghe di funzioni in materia di usi delle acque pubbliche e per il conferimento delle relative risorse finanziarie, strumentali ed organizzative", la cui sottoscrizione da parte della Provincia di Cremona è stata approvata con D.G.P. 28 maggio 2002, n. 219.

Nell'esercizio di queste funzioni, l'amministrazione provinciale deve agire rispettando il dettato dell'art. 7, comma 8, del R.D. 11 dicembre 1933, n. 1775 e successive modificazioni che vieta all'Autorità competente di dare seguito a richieste di concessione idrica che si manifestino come contrarie al buon regime delle acque e dell'art. 95 del D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 e successive modificazioni, che vincola le Autorità preposte al rilascio delle concessioni di derivazione ad eseguire la revisione degli atti concessori vigenti, "... disponendo prescrizioni o limitazioni temporali o quantitative ..." (comma 5) per le finalità di tutela quantitativa della risorsa idrica e di raggiungimento dell'equilibrio del bilancio idrico.

L'attuale situazione delle concessioni di derivazione è tale per cui la somma delle portate concesse su ognuno dei corsi d'acqua principali del territorio provinciale è teoricamente equivalente alla portata del corpo idrico stesso, così come modulata dagli impianti di regimazione idraulica che lo regolano. Inoltre i rapporti tra acque superficiali e sotterranee sono molto stretti, per cui è prevedibile che eccessive derivazioni di acque sotterranee possano localmente depauperare il patrimonio idrico della rete idrografica superficiale, e il patrimonio naturalistico costituito dalla fascia dei fontanili. Tale impoverimento andrebbe di fatto a sottrarre risorse idriche già oggetto di concessione, per cui i titolari dei relativi atti concessori sarebbero impossibilitati ad esercitare pienamente il diritto d'uso acquisito con la concessione già ricevuta. Ovviamente situazioni come quelle appena descritte sono contrarie al buon regime delle acque e quindi sorge il problema di quantificare il massimo livello sostenibile di prelievo di acque sotterranee.

In questo caso siamo di fronte ad un esempio della importanza di considerare in modo "esteso" il concetto di sviluppo sostenibile, definito dal cosiddetto rapporto Brundtland (World Commission on Environment and Development, 1987) come "uno sviluppo che garantisce i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri". Il pieno raggiungimento dell'obiettivo dello sviluppo sostenibile deve passare anche attraverso la garanzia che non vengano danneggiati i sistemi naturali e ambientali.

La valutazione del livello di sostenibilità dei prelievi idrici dal sottosuolo non è possibile con le indagini comunemente effettuate per le richieste di concessioni alla escavazione di nuovi pozzi e non può essere nemmeno limitata alla creazione di una banca dati delle concessioni stesse. Per fissare criteri da applicare per un corretto svolgimento delle istruttorie relative alle domande di nuove concessioni di derivazione e di attingimenti la ricerca scientifica può fornire strumenti di supporto alle decisioni, in grado di descrivere in modo dinamico la situazione idraulica ed idrogeologica del territorio provinciale, di rappresentarne l'evoluzione nel tempo e di prevedere gli effetti che le derivazioni oggetto di nuove domande di concessione sono destinate a produrre. Tali strumenti non si sostituiscono al soggetto decisore, che resta in ultima istanza l'organo politico, ma possono

fornire un valido aiuto affinché le scelte politico-amministrative siano orientate da considerazioni tecnico-scientifiche il più oggettive possibili.

Il nucleo di questi strumenti di supporto alle decisioni sono i modelli matematici, nel caso specifico un modello matematico di flusso che integri le conoscenze sul sistema acquifero e sul reticolo idrografico di superficie, particolarmente complesso nella Provincia di Cremona per la contemporanea presenza di importanti corsi d'acqua come i fiumi Po, Adda, Oglio e Serio, canali naturali, fontanili, canali artificiali per la pratica irrigua.

A questo scopo un primo passo fu la realizzazione di una banca dati informatizzata, realizzata dall'Istituto di Idraulica Agraria dell'Università degli Studi di Milano (Relazione finale fase preliminare, 2004) per incarico della Provincia di Cremona, integrando i dati idraulici ed idrogeologici relativi ai corpi idrici superficiali e sotterranei del territorio della Provincia di Cremona ricevuti da numerosi soggetti coinvolti a vario titolo nella gestione e nell'utilizzo delle risorse idriche provinciali.

La Provincia di Cremona ha quindi provveduto ad affidare alla Università degli Studi di Milano la realizzazione di un modello matematico informatizzato del sistema acquifero cremonese, come naturale proseguimento del precedente lavoro.

La ricerca si è articolata in due sottoprogetti, come illustrato in Figura 1.

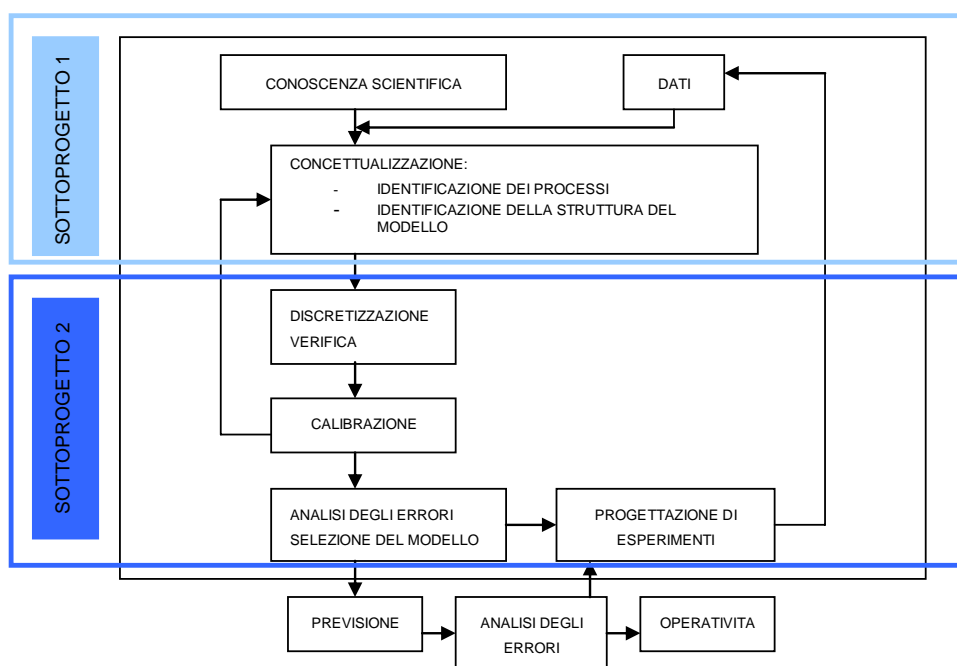


Figura 1. Descrizione schematica dei processi di modellazione di un acquifero, con suddivisione delle attività di ricerca tra le aree dei Sottoprogetti 1 e 2.

Il Sottoprogetto 1 è stato rivolto alla definizione del modello concettuale del sistema acquifero, alla predisposizione dei dati ed alla implementazione del modello matematico; il Sottoprogetto 2 ha riguardato la calibrazione e l'applicazione del modello matematico e la divulgazione dei risultati; è previsto, inoltre, l'addestramento di tecnici provinciali per l'utilizzo del modello stesso.

Il modello implementato consta in realtà di due modelli accoppiati in cascata:

- un modello per la simulazione del funzionamento del sistema irriguo e del bilancio idrologico del suolo, che consente la stima dei flussi di ricarica alla falda;
- un modello per la simulazione del flusso nel sistema acquifero provinciale.

Il Capitolo 2 illustra le attività svolte per l'aggiornamento ed il completamento della banca dei dati idrologici e territoriali necessaria per la calibrazione ed applicazione dei modelli.

Nel Capitolo 3 viene descritto il modello matematico realizzato per la simulazione del sistema irriguo e del bilancio idrologico del suolo agrario. L'agricoltura riveste un'importanza fondamentale per l'assetto idrologico ed idrogeologico dei territori della pianura cremonese; il sistema irriguo determina infatti la gran parte della circolazione idrica superficiale all'interno del territorio provinciale e produce un'aliquota assai rilevante dei volumi di ricarica alla falda, innescando intensi processi di interazione tra acque sotterranee e superficiali. Per questo è indispensabile, per la creazione di un modello di flusso nell'acquifero, l'implementazione di un bilancio idrologico nel suolo attraverso cui pervenire ad una stima dei flussi di ricarica alla falda dovuti all'irrigazione ed alle precipitazioni. Nel Capitolo 3 vengono anche descritte le modalità secondo cui sono stati predisposti i dati necessari per l'utilizzo del modello con particolare riguardo all'uso del suolo, alla pedologia ed all'agrometeorologia ed alle portate che alimentano il sistema irriguo. Infine, viene presentata un'analisi dei risultati ottenuti, sia per la simulazione dello stato di fatto, sia per la simulazione di due diversi scenari che prevedono un sostanziale riassetto dei sistemi irrigui.

Il Capitolo 4 riguarda le elaborazioni dei dati idrologici, idraulici e geologici, che sono necessarie per la identificazione del modello concettuale del sistema acquifero, cioè per determinare i principali processi che regolano il flusso delle acque sotterranee. Questo lavoro ha richiesto l'elaborazione di numerose carte tematiche, che costituiscono un approfondimento delle conoscenze sul sistema fisico in esame, che sono utili anche per altre attività della pubblica amministrazione, al di fuori di questo specifico lavoro. In particolare nel Paragrafo 4.6 viene presentato il modello concettuale del sistema acquifero, che evidenzia un doppio sistema di circolazione idrica sotterranea:

1. una porzione superficiale caratterizzata da portate notevoli - sostenute dai forti scambi con il reticolo idrografico di superficie, dalla ricarica per l'infiltrazione delle piogge e delle acque utilizzate per l'irrigazione - e da trasmissività generalmente elevate;
2. una porzione più profonda, caratterizzata da un complesso alternarsi di corpi con diverse conducibilità, ma portate regolate sostanzialmente dai prelievi di acque per approvvigionamento idropotabile, molto inferiori alle portate che transitano nella porzione superficiale.

Il Capitolo 5 descrive infine il modello preliminare dell'acquifero, che si è articolato in una prima fase in cui è stato realizzato un modello monostrato equivalente (Paragrafo 5.2), che permettesse di ricostruire le caratteristiche principali della circolazione idrica sotterranea, e una seconda fase per la realizzazione di un modello bistrato (Paragrafo 5.3) che permette di descrivere meglio il doppio sistema di circolazione idrica sotterranea identificato dal modello concettuale e per il quale sono state effettuate anche alcune simulazioni in condizioni transitorie. Per il modello monostrato è stata affrontata una calibrazione impegnativa e approfondita (Paragrafo 5.2.2).

Tra i risultati di questa ricerca, presentati nel conclusivo Capitolo 6, rientrano non solo una valutazione del bilancio idrologico del territorio provinciale e le previsioni degli effetti sulle acque sotterranee di alcuni scenari di evoluzione del sistema per effetto di modifiche delle pratiche irrigue o dei prelievi da falda, ma anche alcune proposte per il miglioramento delle reti di monitoraggio, al fine di avere una migliore conoscenza e un controllo più efficace delle risorse idriche sotterranee.

1.1 Modalità di svolgimento del lavoro

Il lavoro è stato svolto attraverso la stipula di due contratti, sottoscritte rispettivamente il 23/02/2005 e il 17/02/2006.

Per l'Università degli Studi di Milano sono stati coinvolti l'Istituto di Idraulica Agraria (IIA) e il Dipartimento di Scienze della Terra (DST).

L'IIA si è occupato sia dell'aggiornamento e completamento della banca dati per quanto riguarda il sistema irriguo, l'uso del suolo, i parametri agrometeorologici, l'idrografia superficiale che dello sviluppo del sotto-modello suolo-vegetazione.

Il DST si è occupato sia dell'aggiornamento e completamento della banca dati realizzata nel precedente studio che dello sviluppo del sotto-modello di flusso nel sistema acquifero.

I due gruppi di ricerca (IIA e DST) si sono coordinati affinché le proprie attività specifiche fossero integrate in modo efficace ed hanno svolto in comune le attività di applicazione dei modelli.

Per l'IIA la responsabilità del progetto è stata affidata al prof. Claudio Gandolfi, con il quale hanno collaborato la dott. Bianca Ortuani, la dott. Arianna Facchi, l'ing. Luca Varola, l'ing. Michele Rienzner, il dott. Davide Agostani, il p.a. Daniele Ferrari.

Per il DST la responsabilità del progetto è stata affidata ai prof. Giansilvio Ponzini e Mauro Giudici, con i quali hanno collaborato la dott. Cinzia Durante, la dott. Chiara Vassena. Inoltre l'inserimento delle stratigrafie nella banca dati è stato eseguito dal sig. Stefano Zoja e dal dott. Arnaldo Pini; la raccolta dei dati delle prove di portata e la loro analisi è stata condotta con la collaborazione della dott. Cecilia Balconi, nell'ambito del proprio elaborato finale per la laurea in fisica; la dott. Antonella Paraboni e il dott. Andrea Leone hanno collaborato alla analisi e alla interpretazione dei sondaggi elettrici verticali eseguiti dal DST, sotto la responsabilità del dott. Alfredo Lozej negli anni '90 del XX secolo (Lozej *et al.*, 1998). Infine l'ing. Guido Chiesa ha fornito il proprio contributo professionale per l'esecuzione delle prove di portata e la interpretazione dei risultati delle prove in pozzo.

Nel corso del lavoro si è mantenuto un costante collegamento con il personale della Provincia di Cremona, in particolare la dott.ssa Mara Pesaro e con il dott. Massimo Cremonini, attraverso riunioni e contatti periodici; gli stadi di avanzamento del lavoro sono stati presentati anche nel corso di riunioni della Consulta delle acque della Provincia di Cremona.

2 La banca dati

Per l'implementazione del modello idrologico del suolo e del modello di flusso nell'acquifero sono necessari una varietà di informazioni territoriali e di dati osservativi. In questo Capitolo si illustrano le informazioni ed i dati raccolti, così come sono stati ottenuti dai diversi enti, rimandando ai capitoli successivi la descrizione delle analisi e delle elaborazioni condotte. Il riferimento territoriale utilizzato è quello del dominio definito dai confini idrogeologici identificati come significativi per la realizzazione del modello dell'acquifero, sulla base dei criteri e delle considerazioni illustrati nel Paragrafo 4.1. L'area di studio (Figura 2) si estende per circa 2000 km² ed è delimitata ad ovest dal fiume Adda, che scorre in direzione sud-est da Rivolta a Crotta d'Adda dove si immette nel fiume Po, il quale delimita la parte sud-orientale della Provincia di Cremona; ad est dal fiume Oglio che scorre in direzione sud-est da Soncino (limite nord orientale della Provincia di Cremona) alla confluenza nel Po nella Provincia di Mantova. A settentrione, in assenza di un limite idrogeologico naturale tra il territorio cremonese ed il bergamasco, il limite dell'area di studio è stato posto lungo una linea con direzione ovest-est che congiunge i fiumi Adda e Oglio alcuni km a nord del confine della provincia di Cremona. In particolare questo limite è situato in corrispondenza della coordinata Gauss-Boaga 5042000.

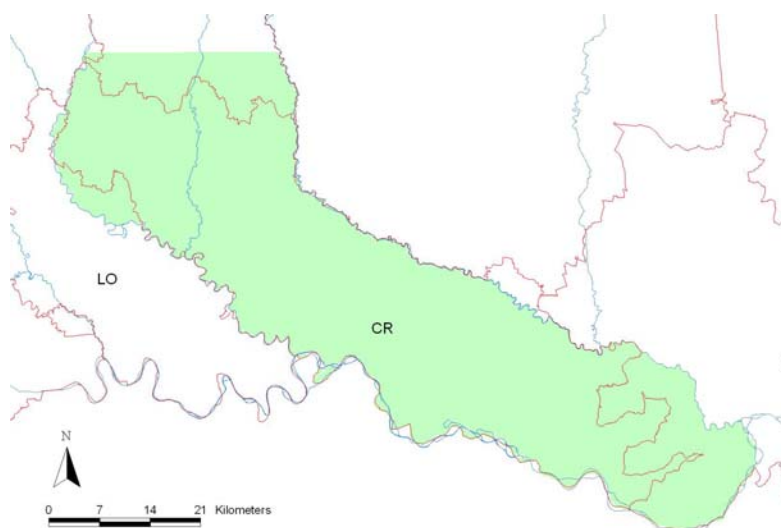


Figura 2. In verde il dominio di simulazione, in rosso i confini delle province.

2.1 Agrometeorologia

L'identificazione dell'andamento nello spazio e nel tempo delle grandezze agrometeorologiche è un elemento assolutamente essenziale per la stima del bilancio idrologico nei suoli.

Dalla rete complessiva delle stazioni meteo della Lombardia (ERSAF, ARPA Lombardia, Provincia di Brescia, Provincia di Lecco, CODIMA - Consorzio Difesa Produzioni Agricole Mantova), sono state selezionate quelle utili al lavoro utilizzando i seguenti criteri:

- copertura quanto più possibile omogenea del territorio oggetto di studio (Figura 3 e Figura 4);
- stazioni con dati relativi ai seguenti parametri meteorologici:
 - pioggia,

- temperatura,
 - umidità relativa,
 - radiazione globale,
 - direzione/velocità del vento;
- almeno una stazione all'interno di ogni area climatica omogenea individuata dallo studio ERSAL (1998), Figura 4;
 - stazioni attualmente attive e di tipo automatico, per garantire una buona continuità delle serie storiche ed un elevato numero di parametri registrati;
 - omogeneità di installazione, non includendo stazioni poste in ambito urbano e cercando di rifarsi a stazioni meteo installate secondo i dettami WMO-OMM (World Meteorological Organization; Organizzazione Meteorologica Mondiale);
 - lunghezza della serie storica disponibile di almeno 10 anni.

Le stazioni agro-meteorologiche selezionate sono 9; due di queste presentano un numero di dati validi lontano dal valore desiderato ma sono state indispensabili per coprire in modo omogeneo l'area di lavoro: si tratta delle stazioni di Palidano (8 anni) e Bargnano (6 anni disponibili in tempo utile per il presente lavoro di ricerca).

Le stazioni agro-meteo della rete definitiva sono illustrate rispetto ai confini dell'area di studio in Figura 3 e rispetto alle aree climatiche omogenee ERSAL (1998) in Figura 4. In entrambe le figure le stazioni utilizzate per le simulazioni sono contrassegnate con cerchi gialli, l'area di studio è evidenziata in verde intenso sul verde più tenue utilizzato per la superficie regionale, mentre le stazioni meteo individuate da quadrati rossi riguardano marginalmente il presente lavoro (si veda, per una più approfondita descrizione del loro utilizzo, il Paragrafo 3.2.5).

In Tabella 1 è riportato il numero di stazioni utilizzate attive per ogni anno del periodo 1993-2005, mentre in Tabella 2 si trovano le caratteristiche delle stazioni.

Tabella 1. Numero di stazioni attive nei singoli anni del periodo 1993 – 2005.

Anno	Stazioni attive da inizio anno	Anno	Stazioni attive da inizio anno
1993	6	1999	9
1994	6	2000	9
1995	6	2001	9
1996	7 (attivazione di Capralba)	2002	9
1997	7	2003	9
1998	9 (attivazione di Bargnano e Palidano)	2004	9
		2005	9

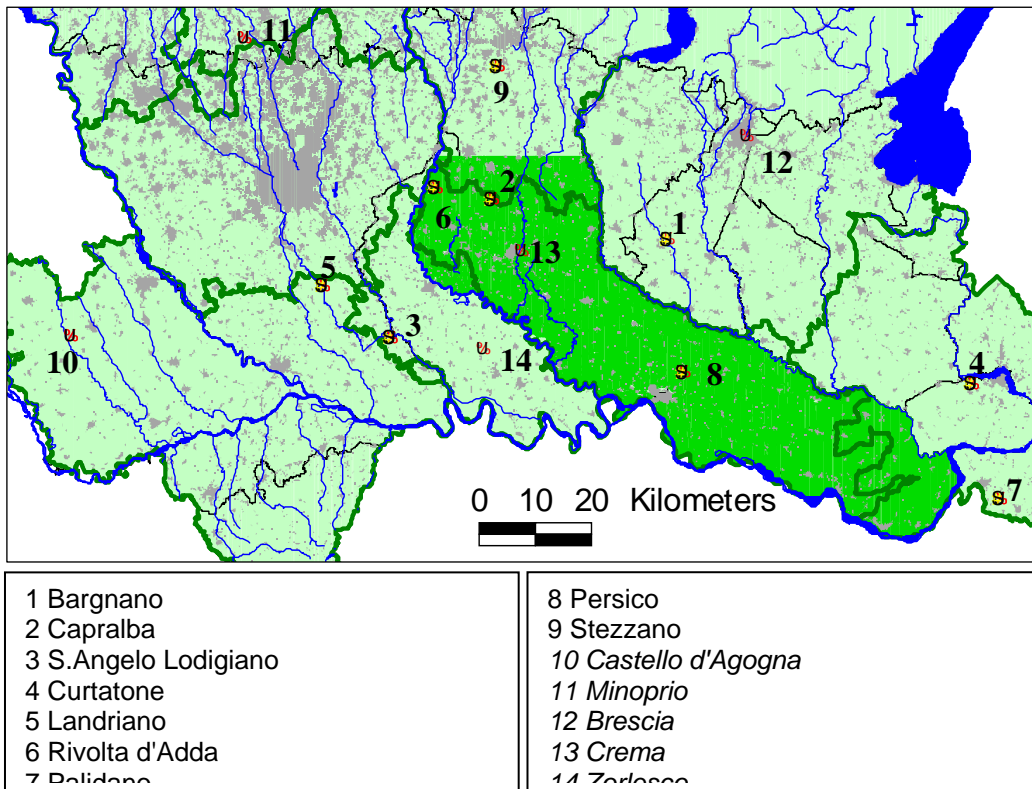


Figura 3. Nome e posizione delle stazioni agro-meteorologiche selezionate.

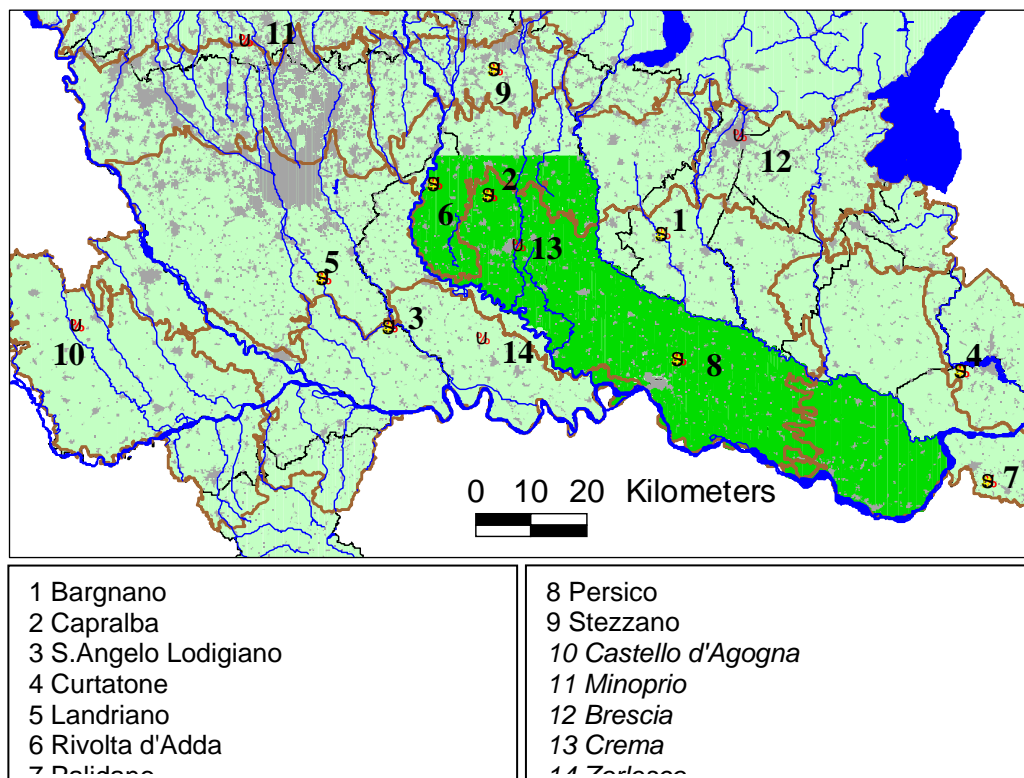


Figura 4. Posizione delle stazioni agro-meteorologiche rispetto alle aree climatiche (in marrone).

Tabella 2. Caratteristiche delle stazioni agro-meteorologiche selezionate.

Stazione (prov)	Codice SAR	Data attivaz.	Coordinate Gauss-Boaga		Quota (m slm)	Proprietà	Stato
			Est	Nord			
Bargnano (BS)	43	1998	1581186	5025998	93	ERSAF	Attiva
Capralba (CR)	18	1996	1550000	5033000	96	ERSAF	Attiva
Sant'Angelo Lodigiano (LO)	16	1993	1532000	5009000	73	ERSAF	Attiva
Curtatone (MN)	5	1993	1635000	5001000	26	ERSAF	Attiva
Landriano (PV)	14	1993	1520000	5018000	88	Uni Mi	Attiva
Rivolta d'Adda (CR)	6	1993	1540000	5035000	101	ERSAF	Attiva
Palidano (MN)	35	1998	1640000	4981000	22	ERSAF	Attiva
Persico Dosimo (CR)	4	1993	1584000	5003000	48	ERSAF	Attiva
Stezzano (BG)	1	1993	1551000	5056000	266	ERSAF	Attiva

2.2 Uso del suolo

Le fonti di informazioni relative all'uso del suolo prese in esame sono:

- ISTAT (dato aggregato a scala comunale), annata 1999/2000;
- DUSAF, anno 2000 (carta a scala 1:10.000);
- Database PAC, anno 2004 e 2005 (su base catastale);
- SIARL, anno 2004 (livelli cartografici di rilevanza regionale, provinciale e comunale).

La carta SIARL rappresenta la fonte spazializzata di maggiore dettaglio. In particolare, per lo studio si è utilizzata la carta di uso del suolo SIARL 2004, la più recente al momento dello svolgimento delle elaborazioni.

Un particolare della carta SIARL 2004 per la Provincia di Cremona è riportata in Figura 5, a titolo d'esempio.

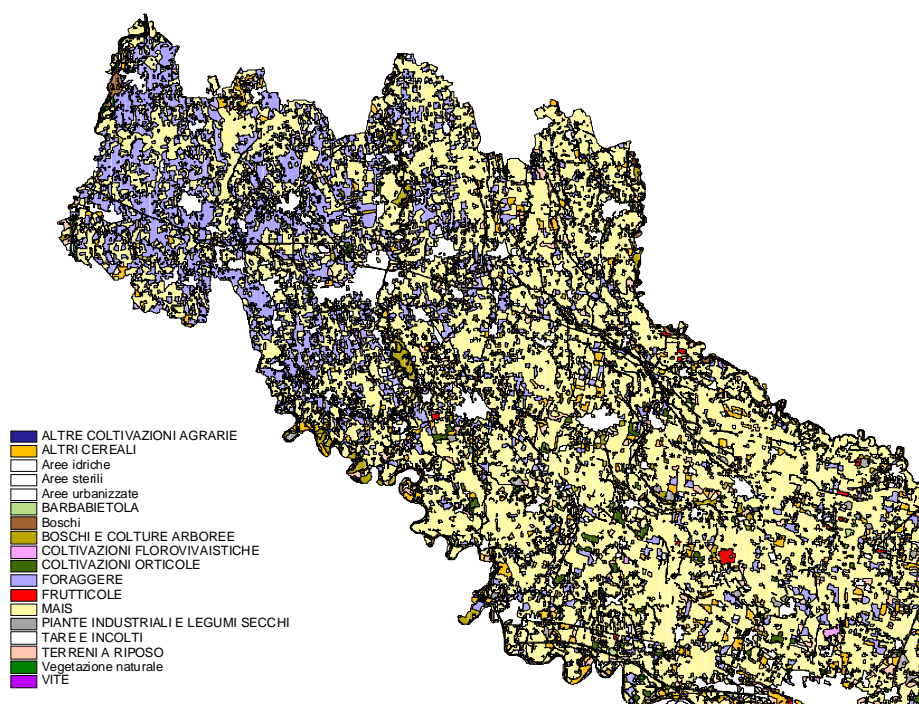


Figura 5. Carta di uso del suolo 2004, fonte SIARL a livello provinciale. Dettaglio della Provincia di Cremona.

La carta prevede classi di uso del suolo diversificate a seconda del livello di dettaglio: i livelli comunale e provinciale presentano 16 classi di uso del suolo; a livello regionale, queste classi vengono raggruppate in 8 macroclassi, come illustrato nella tabella seguente.

Tabella 3. Classi presenti a livello comunale, provinciale e regionale.

CLASSI (livello provinciale e comunale)	RAGGRUPPAMENTO CLASSI (livello regionale)
ALTRE COLTIVAZIONI AGRARIE	ALTRI TERRENI AGRARI
SEMENTI	
TARE E INCOLTI	
BOSCHI E COLTURE ARBOREE	BOSCHI
ALTRI CEREALI	CEREALI
MAIS	
BARBABIETOLA	COLTIVAZIONI INDUSTRIALI
PIANTE INDUSTRIALI E LEGUMI SECCHI	
FRUTTICOLE	COLTIVAZIONI LEGNOSE AGRARIE
OLIVO	
VITE	
COLTIVAZIONI FLOROVIVAISTICHE	COLTIVAZIONI ORTOFLOROVIVAISTICHE
COLTIVAZIONI ORTICOLE	
FORAGGERE	FORAGGERE E TERRENI A RIPOSO
TERRENI A RIPOSO	
RISO	RISO

2.3 Pedologia

La Carta Pedologica a scala di riconoscimento 1:250.000, acquisita da ERSAF, fornisce una rappresentazione generale delle caratteristiche pedologiche del territorio regionale di pianura e pedecollina. La carta di maggiore dettaglio (Carta Pedologica a scala di semidettaglio: 1:50.000), al momento dell'acquisizione dei dati per l'indagine, non risultava ancora completa di tutte le informazioni necessarie alla parametrizzazione del modello idrologico del suolo per l'area di studio.

La Carta Pedologica in scala 1:250.000 comprende circa 60 differenti unità cartografiche. Le informazioni associate ad ogni unità cartografica nella tabella degli attributi allegata alla carta sono le seguenti: codice identificativo dell'unità cartografica (UC), tessitura, gruppo idrologico, drenaggio, permeabilità. In Figura 6, a titolo esemplificativo, è illustrata la tessitura delle unità cartografiche.

Le informazioni relative a "gruppo idrologico" e "classe di drenaggio" sono state utilizzate per l'implementazione del metodo del Curve Number, applicato dal modello idrologico del suolo (descritto in Appendice A); tali grandezze sono di seguito descritte.

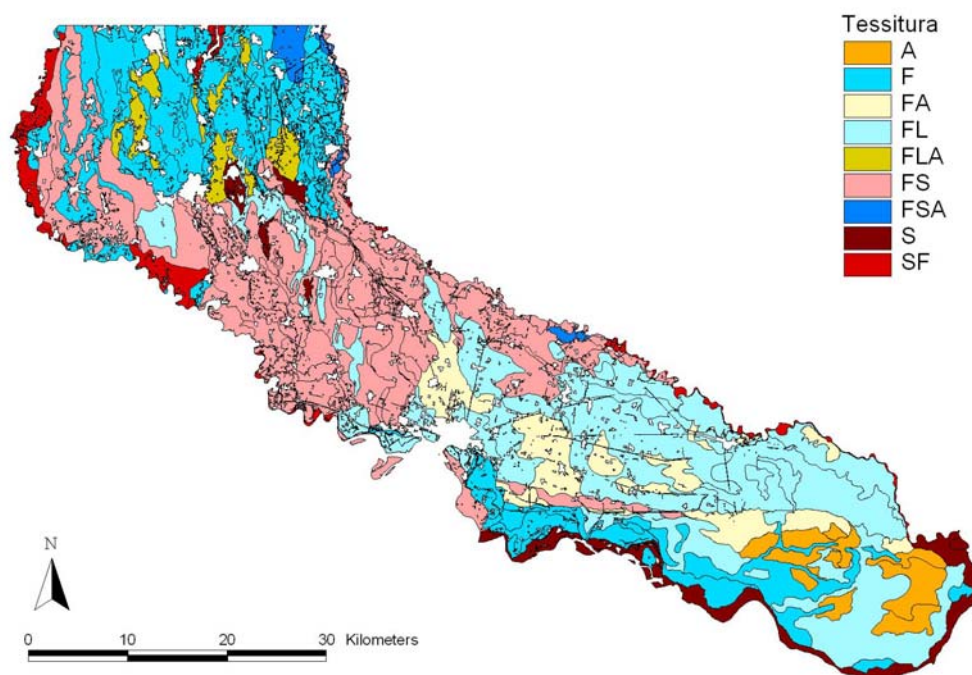


Figura 6. Carta Pedologica in scala 1:250.000, in legenda le tessiture delle UC.

Gruppo idrologico

La classe di “gruppo idrologico” viene attribuita in riferimento all’orizzonte meno permeabile presente entro 100 cm; essa qualifica i suoli che hanno lo stesso deflusso superficiale potenziale, a parità di precipitazione e copertura.

I gruppi idrologici si distinguono con le lettere A, B, C, D:

- classe A: basso deflusso superficiale. Classe di permeabilità ‘Elevata’ o valori di conducibilità idraulica satura compresi nella metà superiore della classe di permeabilità ‘Moderatamente elevata’. Classe di profondità presunta della falda ‘Molto profonda’.
- classe B: moderatamente basso deflusso superficiale. I valori di conducibilità idraulica satura sono compresi nella metà inferiore della classe di permeabilità ‘Moderatamente elevata’, o nella metà superiore della classe ‘Moderata’. Classe di profondità presunta della falda ‘Profonda’, o ‘Molto profonda’.
- classe C: moderatamente alto deflusso superficiale. I valori di conducibilità idraulica satura sono compresi nella metà inferiore della classe di permeabilità ‘Moderata’, o nella metà superiore della classe ‘Moderatamente bassa’. Classe di profondità presunta della falda ‘Moderatamente profonda’, ‘Profonda’, o ‘Molto profonda’.
- classe D: alto deflusso superficiale. I valori di conducibilità idraulica satura sono compresi nella metà inferiore della classe di permeabilità ‘Moderatamente bassa’, o in una classe di permeabilità inferiore. Classe di profondità presunta della falda ‘Poco profonda’, o ‘Superficiale’.

Drenaggio

La classe di “drenaggio” esprime la rapidità con cui l’acqua non trattenuta è rimossa dal suolo, per percolazione profonda, scorrimento superficiale, o ipodermico. La condizione di drenaggio è correlata alla frequenza e durata dello stato di saturazione anche parziale di un suolo; quindi, dipende dalle proprietà del suolo come la porosità, la permeabilità, il

drenaggio interno, ma anche dall'entità e distribuzione annuale delle precipitazioni, dalla presenza e durata del manto nevoso o di eventuali strati ghiacciati, ecc.

Le classi di drenaggio definite sono sette:

1. drenaggio rapido
2. drenaggio moderatamente rapido
3. drenaggio buono
4. drenaggio mediocre
5. drenaggio lento
6. drenaggio molto lento
7. drenaggio impedito

La classe di drenaggio è stata utilizzata come informazione utile per la valutazione della condizione idrologica nel metodo CN.

A ciascuna unità cartografica (UC) corrispondono una o più unità tassonomiche (UT) alle quali, a loro volta, corrisponde un profilo pedologico di riferimento. Le informazioni fisico-chimiche relative agli orizzonti dei profili non sono usualmente allegate alla Carta Pedologica ma vengono fornite ad ERSAF separatamente.

Per la Carta Pedologica 1:250.000 si sono ottenute da ERSAF nell'ottobre 2006 le descrizioni, elaborate su strati di differente spessore a profondità fissata, dei profili dell'unità pedologica più abbondante ricadente nell'unità cartografica. Gli strati sono i seguenti: 0-5 cm; 5-15 cm; 15-30 cm; 30-50 cm; 50-100 cm; 100-200 cm. Per questi, ERSAF ha fornito i parametri fisico-chimici del profilo di riferimento più abbondante nell'unità cartografica, necessari per la parametrizzazione del modello, ossia: % di sabbia, % di limo, % di argilla, % di scheletro; % di carbonio organico.

A titolo di esempio, in Tabella 4 sono riportate parte delle informazioni fornite da ERSAF sui diversi strati in cui il profilo è stato suddiviso. La tabella è stata riorganizzata per ottenere il formato opportuno per le elaborazioni riportate nel Paragrafo 3.2.3 (corrispondente allo standard utilizzato da ERSAF in precedenza).

Tabella 4. Informazioni fornite da ERSAF per i diversi strati dei profili di riferimento relativi alla carta 1:250.000.

N° Profilo	N° Strato	Limite superiore	Limite inferiore	Argilla %	Limo %	Sabbia %	Scheletro %	Carbonio Organico %
1	1	0	5	8	23	69	25	3.1
1	2	5	15	8	23	69	25	3.1
1	3	15	30	8	23	69	25	3.1
1	4	30	50	8	23	69	25	2.7
1	5	50	100	2	18	80	25	0.7
1	6	100	200	1	12	87	25	0.2
2	1	0	5	13	41	46	10	3.6
2	2	5	15	13	41	46	10	3.6
2	3	15	30	13	41	46	10	3.6
...

2.4 Idrografia superficiale

Sono stati acquisiti i dati relativi ai rilievi topografici dei profili longitudinali e delle sezioni trasversali dei fiumi Adda, Serio, Brembo e Oglio, rilevati nell'ambito dello Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei fiumi Adda, Serio e Oglio (Autorità di Bacino del fiume Po, 2003).

2.4.1 Reticolo idrico naturale e artificiale

I principali corsi d'acqua che interessano l'area di studio sono i fiumi Adda, Po, Serio ed Oglio; quelli che delimitano l'area di studio sono i fiumi Adda ad ovest, Po a sud/sud-ovest ed Oglio a est.

Considerando la vastità della superficie, la secolare tradizione agricola e la notevole portata irrigua in ingresso nell'area di studio, è facilmente intuibile come in esso si articoli un intricato e denso reticolo di canalizzazioni artificiali, rappresentato in Figura 7. Le derivazioni primarie che alimentano il reticolo irriguo artificiale sono 13, mentre il reticolo irriguo secondario e terziario si compone di oltre 950 canali.

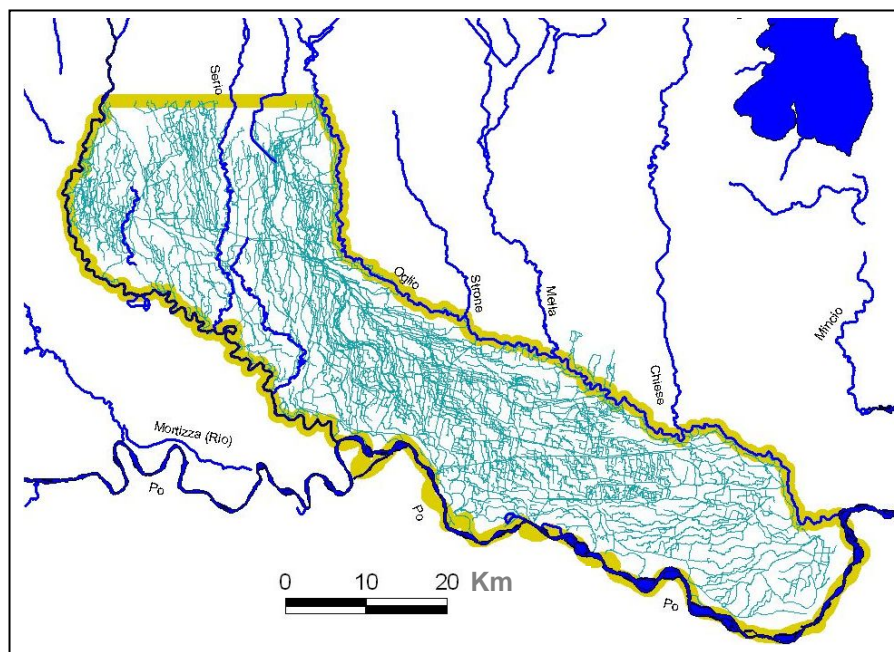


Figura 7. Il reticolo idrografico superficiale nell'area di studio.

2.4.2 Fontanili

L'idrografia dell'area di studio è caratterizzata anche dalla presenza di numerosi fontanili, le cui acque contribuiscono a soddisfare i fabbisogni irrigui del territorio indagato. I fontanili sono presenti lungo un'ampia fascia longitudinale a cavallo delle province di Bergamo e Cremona, come illustrato in Figura 8. Il loro regime idrico è strettamente connesso a quello delle portate idriche derivate dai canali irrigui. Infatti, gli ingenti volumi idrici prelevati dai corsi d'acqua ad uso irriguo sono capillarmente distribuiti sul territorio attraverso una rete di canali prevalentemente non rivestiti, contribuendo in modo determinante alla ricarica distribuita della falda acquifera, attraverso la percolazione dai canali irrigui e dalle superfici irrigate. L'apporto cospicuo dell'irrigazione alla ricarica distribuita della falda nei territori a monte della linea dei fontanili determina l'innalzamento dei livelli di falda, quindi l'alimentazione delle portate dei fontanili.

In Figura 8 è rappresentata la localizzazione delle teste di fontanile presenti nell'area di studio. Essa è stata derivata dagli strati informativi sotto riportati:

- Catasto Fontanili, condotto dal Museo Civico di Scienze Naturali di Bergamo (1988-1992);
- Censimento Fontanili, effettuato dalla Provincia di Cremona (2001-2002);
- Basi Informative Ambientali della Pianura, realizzato dall'Ente Regionale di Sviluppo Agricolo della Lombardia per la Regione Lombardia (1994).

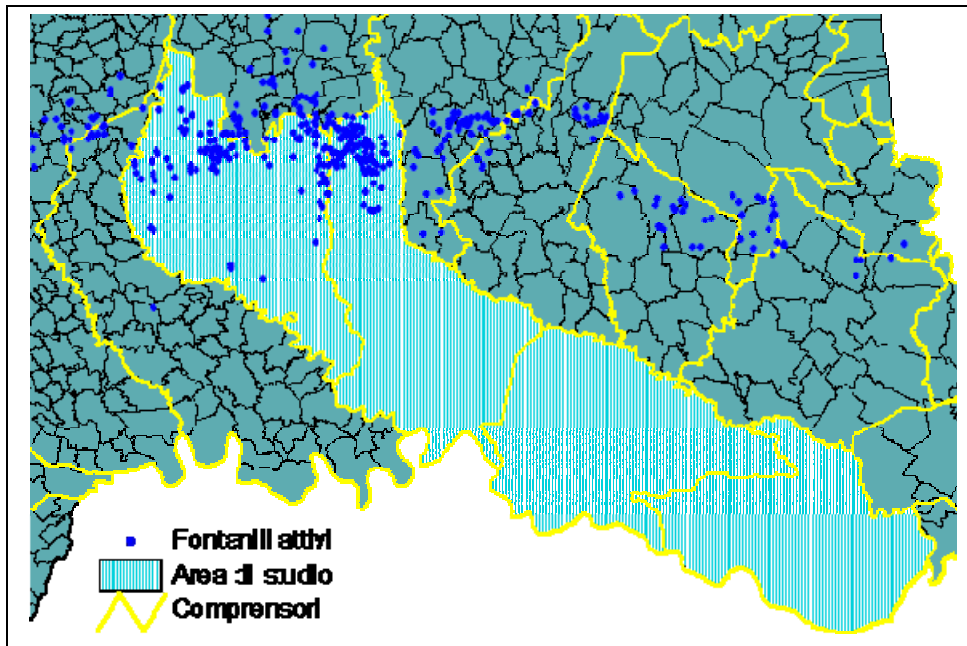


Figura 8. Localizzazione delle teste di fontanile nell'area di studio.

2.5 Idrometria

2.5.1 Stazioni idrometriche

Si sono acquisite le serie temporali delle altezze idrometriche per le stazioni di misura posizionate sui corsi d'acqua di interesse per il Progetto. La posizione delle stazioni idrometriche è indicata in Figura 9. La lista delle stazioni ed i dati disponibili presso di esse è illustrata in Tabella 5; una trattazione più esauriente dei dati raccolti e della loro attendibilità è disponibile in: Relazione finale, fase preliminare (2004).

Tabella 5. Lista delle stazioni idrometriche con i dati disponibili.

Fiume	Ente gestore	Nome Stazione	Quota m slm	Scala portate	Passo di misurazione	Tipo di misurazione	Anno di installazione	Attiva	
Adda	Consorzio Adda	Olginate Portate		NO				SI	
	Consorzio Adda e CIC	Merlino	89	NO	giornaliero	manuale	1995	SI	
	DG opere pubbliche e Protezione Civile	Pizzighettone	Boccaserio	47	NO	orario	meccanica	1996	SI
			Lodi	80	NO	orario	automatica	1998	SI
			Lodi	80	SI	giornaliero	meccanica		NO
	Enel	Lodi	80	SI	orario			NO	
Oglio	Consorzio dell'Oglio	Calcio	122	NO	semiorario	automatica	1984	SI	
		Sarnico		SI	semiorario	automatica		SI	
		Palazzolo		NO	semiorario	automatica	1984	SI	
		Ponte Vico		NO	idrogr. cartaceo	meccanica	1984	SI	
		Pontoglio	155	NO	semiorario	automatica	1984	SI	
		Seniga		NO	idrogr. cartaceo	meccanica	1984	SI	
	DG opere pubbliche e Protezione Civile	Capriolo			NO	orario	automatica	2000	SI
			Marcaria	29	NO	orario	automatica	1998	SI
Po	Consorzio di bonifica Dugali	Casalmaggiore	23	NO	orario		1971	SI	
	ARPA-Emilia Romagna	Boretto	40	SI	giornaliero	automatica	1992	SI	
	DG opere pubbliche e Protezione Civile	Boretto	Boretto	40	SI	giornaliero	automatica	1992	SI
			Borgoforte	19	SI	orario	automatica	1998	SI
			Casalmaggiore	25	NO	giornaliero	automatica	1998	SI
Cremona			47	SI	giornaliero	manuale		SI	
Serio	Consorzio Media Pianura Bergamasca	Ponte Cene		SI	orario	automatica	1986	SI	
	DG opere pubbliche e Protezione Civile	Ponte Cene			giornaliero	meccanica		SI	
			Montodine		NO		automatica	2002	SI
			Mozzanica	106.2	NO	giornaliero	automatica	1998	SI

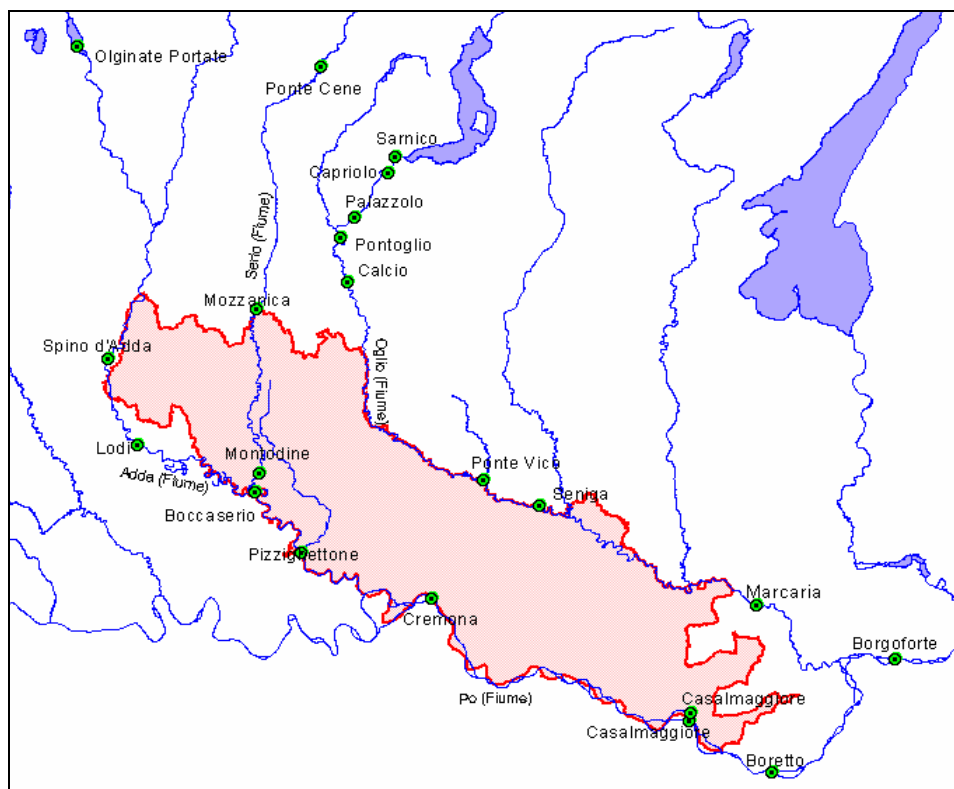


Figura 9. Localizzazione delle stazioni idrometriche.

2.5.2 Derivazioni da corsi d'acqua superficiali

I principali corsi d'acqua che interessano l'area di studio sono i fiumi Po, Adda, Oglio e Serio. Nella Figura 10 sono evidenziate le derivazioni da corsi d'acqua superficiali, accanto alle ulteriori fonti di alimentazione del reticolo irriguo dell'area di studio. I codici numerici utilizzati in figura rimandano alla Tabella 6, che riassume i valori di concessione delle principali fonti. Le fonti dalla 1 alla 13 sono derivazioni da corsi d'acqua. La fonte 14 include i pozzi del Consorzio Naviglio Civico, le fonti dalla 15 alla 21 sono impianti di sollevamento.

Tabella 6. Le fonti principali di alimentazione del reticolo irriguo in provincia di Cremona.

	Portata in concessione [m ³ /s]		Portata in concessione [m ³ /s]		Portata in concessione [m ³ /s]
R.Vailata (1)	9.50	R.Menasciutto (8)	0.40	I.Foce Morbasco (15)	8.00
R.Cremasca (2)	11.60	R.Borromea (9)	1.40	I.Isola Pescaroli (16)	10.30
R.Pandina (3)	9.40	N.Calcio (10)	10.46	I.Casalmaggiore (17)	10.00
R.Rivoltana (4)	7.00	C.Calciana (11)	3.19	I.Pluvirriguo (18)	(dato non disp.)
C.Vacchelli (5)	38.50	N.Grande (12)	8.59	I.Acque Alte (19)	1.70
R.Babbiona (6)	2.80	N.Nuovo (13)	4.60	I.S.Maria di Calvatone (20)	9.20
R.Malcontenta (7)	0.60	Pozzi CNC (14)	0.70	I.Isolina (21)	0.85

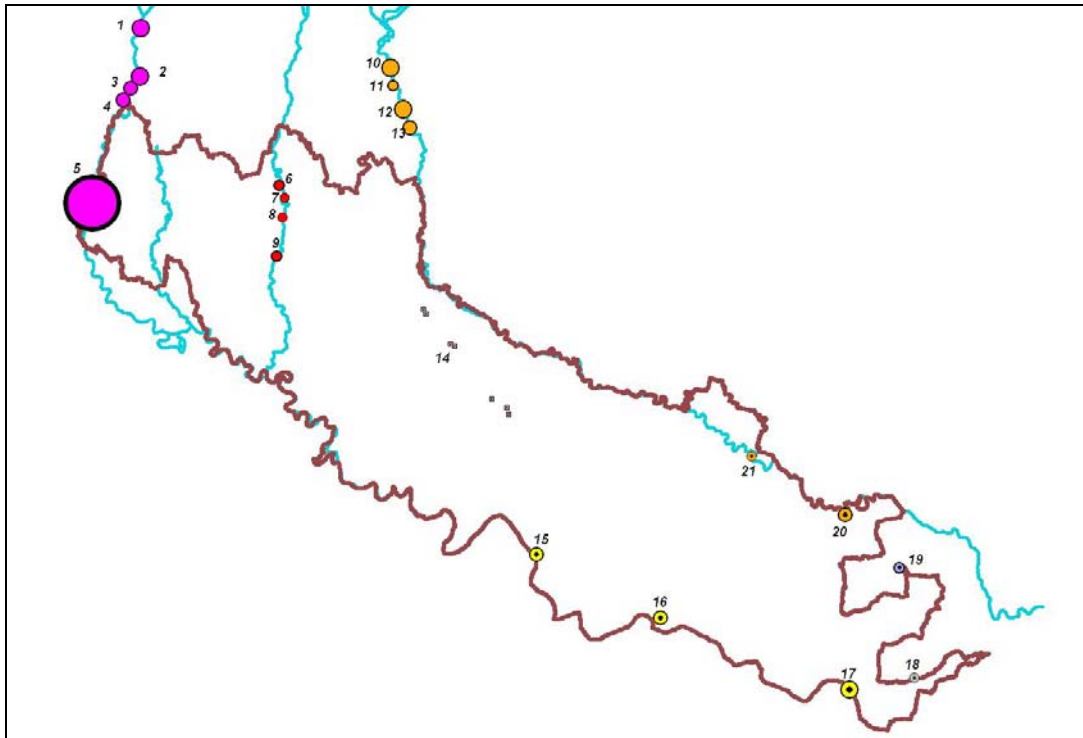


Figura 10. Le fonti principali di alimentazione del reticolo irriguo nell'area di studio: derivazioni (cerchi vuoti) e sollevamenti da corsi d'acqua (cerchi con puntino), pozzi (quadratini); le dimensioni del simbolo sono proporzionali alla portata in concessione.

Serie temporali delle derivazioni da Adda

Si sono acquisite dal Consorzio dell'Adda le serie temporali delle altezze idrometriche e delle portate medie giornaliere relative a tutti i canali derivati da Adda che interessano l'area di studio.

In sintesi, la situazione è la seguente:

- Portata media giornaliera prelevata dalla Roggia Cremasca (01/01/84→31/08/2005) ed altezza idrometrica media giornaliera (01/01/84→31/08/2005);
- Portata media giornaliera prelevata dalla Roggia Pandina (01/01/84→31/08/2005) ed altezza idrometrica media giornaliera (01/01/84→31/08/2005);
- Portata media giornaliera prelevata dalla Roggia Rivoltana (01/01/84→31/08/2005) ed altezza idrometrica media giornaliera (01/01/84→31/08/2005);
- Portata media giornaliera prelevata dal Canale Vacchelli ed altezza idrometrica media giornaliera (01/06/84→31/08/2005);
- Portata media giornaliera prelevata dalla Roggia Vailata (01/01/84→31/08/2005) e altezza idrometrica media giornaliera (01/01/84→31/08/2005).

Serie temporali delle derivazioni da Serio

Dal Serio derivano le rogge Babbiona, Malcontenta, Menasciutto e Borrromea, che adducono acqua al territorio indagato. Di queste si conoscono le portate in concessione (rispettivamente di 1.2 m³/s, 0.3 m³/s e 0.250 m³/s, 2.8 m³/s, 0.6 m³/s, 0.4 m³/s, 1.4 m³/s), ma non sono disponibili le serie delle portate derivate.

Serie temporali delle derivazioni da Oglio

Si sono acquisite dal Consorzio dell'Oglio le serie temporali delle portate medie giornaliere, nel periodo compreso tra il 01/01/1984 ed il 31/12/2005, relative al seguente canale derivato da Oglio:

- Naviglio di Calcio o Civico.

Si sono inoltre acquisite dal Consorzio per l'Incremento dell'Irrigazione nel Territorio Cremonese (CIC) le seguenti informazioni relative ai canali derivati da Oglio e gestiti dal CIC:

- Altezza idrometrica media giornaliera e scala delle portate del Naviglio Grande Pallavicino (01/01/84→31/12/2005)
- Altezza idrometrica media giornaliera e scala delle portate della Roggia Calciana (01/01/84→31/12/2005)
- Altezza idrometrica media giornaliera della Roggia Molinara (01/12/02→31/12/2005)
- Altezza idrometrica media giornaliera del Cavo di Suppeditazione (01/12/02→31/12/2005)

Si ricorda che la Roggia Molinara ed il Cavo di Suppeditazione si uniscono poco più a valle delle rispettive prese sull'Oglio per dar vita al Naviglio Nuovo Pallavicino.

2.5.3 *Impianti di sollevamento da corsi d'acqua superficiali*

La parte meridionale dell'area di studio è essenzialmente pianeggiante ed evidenzia problematiche idrauliche complesse a causa della sua altimetria. Le acque per l'irrigazione vengono prelevate, tramite sollevamento per pompaggio da Oglio, Po ed Adda e ridistribuite successivamente sul territorio. Sono presenti, in particolare, 5 impianti (fonti 15, 16, 17, 20 e 21 in Tabella 6 e Figura 10), per i quali si hanno a disposizione i volumi complessivi sollevati nella stagione irrigua e le caratteristiche dell'impianto (i.e. portata massima sollevabile dalle pompe). Due ulteriori impianti (fonti 18 e 19) sollevano acqua da canali interni. Solo per alcuni impianti e per pochi anni si hanno a disposizione serie giornaliere di portate sollevate.

Infine, si attuano ulteriori prelievi diretti dai fiumi, autorizzati mediante licenze di attingimento temporanee, per cui non sono disponibili serie giornaliere di portate prelevate.

2.5.4 *Fontanili*

La conoscenza delle portate dei fontanili è determinante per la stima dei volumi idrici disponibili all'uso irriguo, di cui costituiscono un'aliquota non trascurabile. I processi idrologici che determinano l'entità di tali portate sono articolati e complessi, mentre i dati ad oggi a disposizione sono scarsi e parziali.

Il Consorzio della Media Pianura Bergamasca (CMPB) ha effettuato misure, ad intervalli all'incirca trimestrali, delle portate in 79 sezioni di canali alimentati da teste fontanilizie (Figura 11) nel periodo dal 1989 al 1997. Tutte le misure sono state effettuate con mulinello idrometrico. I dati sono stati acquisiti e digitalizzati dall'Istituto di Idraulica Agraria nel corso di un precedente studio (Gandolfi *et al.* 2006a; b).

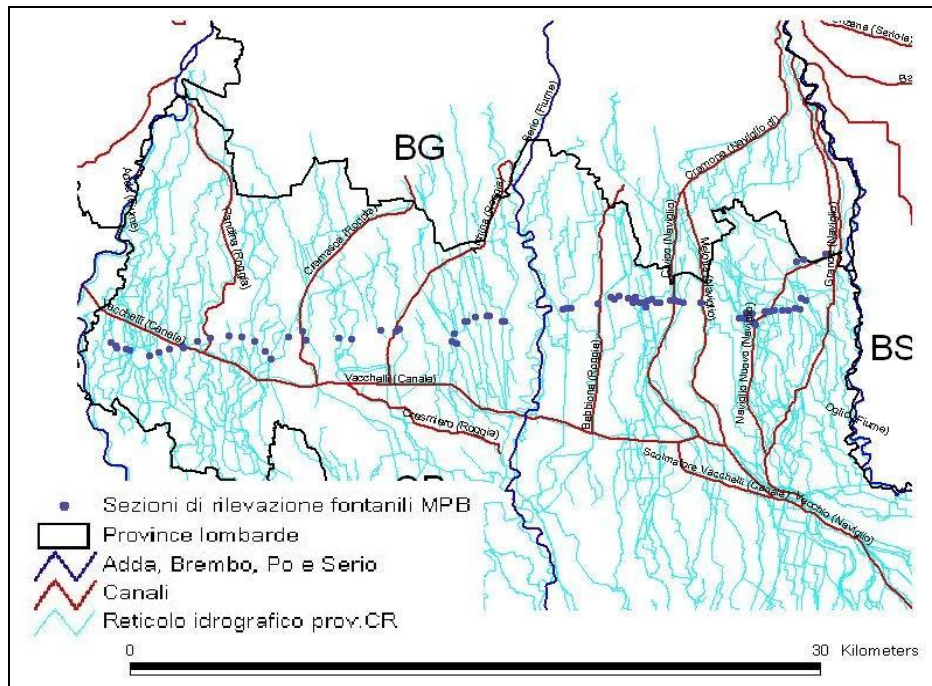


Figura 11. Punti di misura monitorati dal Consorzio della Media Pianura Bergamasca.

2.6 Piezometria

Il sistema acquifero della Provincia di Cremona è stato distinto da Beretta *et al.* (1992) in una falda superficiale e una profonda, che tendono a congiungersi in un'unica falda nell'area settentrionale e meridionale del dominio. In questo lavoro si farà riferimento a un acquifero freatico, che corrisponde indicativamente alla falda superficiale descritta da Beretta *et al.* (1992), e un acquifero semi-confinato, che corrisponde indicativamente alla falda profonda descritta da Beretta *et al.* (1992). Viene preferita questa terminologia, perché permette di indicare più chiaramente le diverse caratteristiche fisiche dei due sistemi.

Dal database del "Programma di Tutela e Uso delle Acque" (Giunta della Regione Lombardia, 2006), in seguito indicato come PTUA, sono stati tratti i dati dei livelli piezometrici degli acquiferi freatico e semi-confinato, relativi agli anni 1994, 1996 e 2001-2003.

I dati più numerosi sono relativi alle campagne di monitoraggio (acquifero freatico e semi-confinato) effettuate dal Politecnico di Milano. Per la sola provincia di Cremona sono disponibili:

- aprile 1994: 69 misure di livello di falda freatica e 121 misure di livello di falda semi-confinato;
- novembre 1996: 68 misure di livello di falda freatica e 108 misure di livello di falda semi-confinato;
- marzo 2003: 66 misure di livello di falda freatica e 121 misure di livello di falda semi-confinato.

Inoltre, per gli anni 2001-2003, sono disponibili le serie (non complete) delle misure mensili dei livelli degli acquiferi freatico e semi-confinato, effettuate da ARPA rispettivamente in 3 e 27 pozzi.

I dati piezometrici presenti nel database sono stati integrati e aggiornati come specificato nei Paragrafi 2.6.1 e 2.6.2.

2.6.1 Piezometria dell'acquifero freatico

Sono stati acquisiti dal CMPB i dati relativi alle misure mensili dei livelli dell'acquifero freatico in circa 80 pozzi e piezometri (Tabella 7 e Figura 12), eseguite dal Consorzio dal 1989 al 1997, contemporaneamente alle misure delle portate in rogge fontanilizie, di cui al Paragrafo 2.5.

Dal 1997, il numero di punti della rete di monitoraggio dell'acquifero freatico si è ridotto progressivamente; attualmente si contano 66 pozzi e piezometri, in cui le misure sono effettuate con frequenza bimestrale.

I dati relativi ai pozzi ricadenti nel territorio della provincia di Cremona sono stati inseriti nel database.

Tabella 7. Pozzi e piezometri della rete di monitoraggio dell'acquifero freatico nella pianura bergamasca; frequenza di rilievo.

Intervallo temporale	Pozzi rilevati	Frequenza (rilevi annui)
Dic. 88 – lug. 96	85	12
Ago. 96 – dic. 96	84	12
Gen. 97 – apr. 97	83	7/8
Mag. 97 – dic. 98	80	7/8
Gen. 99 – apr. 99	79	7/8
Mag. 99 – lug. 99	76	7/8
Ago. 99 – giu.00	75	7/8, 4/6
Lug. 00 – ago. 00	74	7/8, 4/6
Sett. 00 – ott. 00	72	4/6
Nov. 00 – giu. 01	71	4/6, 0/3
Lug. 01 – dic. 01	70	0/3
Gen. 02 – dic. 02	0	0
Gen. 03 – giu. 03	70	1/4
Lug. 03 – dic. 03	69	1/4
Gen. 04 – apr. 05	66	6

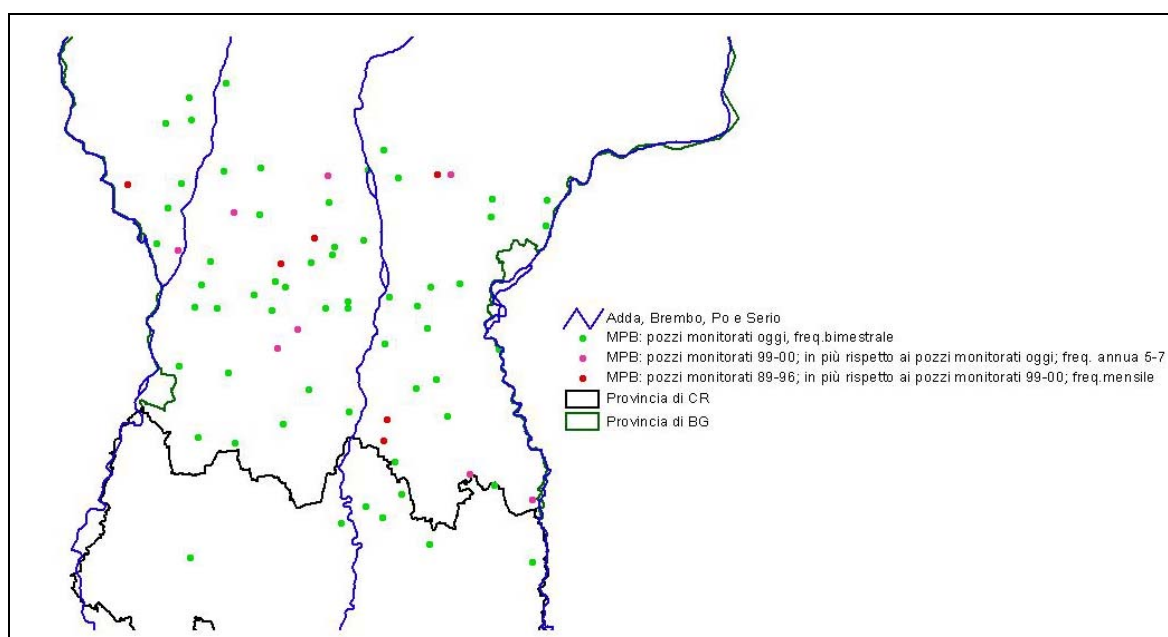


Figura 12. La rete di monitoraggio dell'acquifero freatico della Media Pianura Bergamasca: evoluzione nel tempo e stato attuale.

2.6.2 Piezometria dell'acquifero semi-confinato

I dati georeferenziati presenti nel database, relativi all'acquifero semi-confinato, sono stati verificati ed aggiornati con le informazioni più recenti fornite da Padania Acque S.p.A., disponibili fino al marzo 2005.

2.7 Prelievi da acque sotterranee

Le informazioni censite nel precedente progetto (Relazione finale, I fase, 2006) sono state integrate con i dati raccolti nel PTUA, relativi ai prelievi da pozzo per i diversi utilizzi (civile, potabile e non potabile, industriale, irriguo, piscicoltura e produzione di energia). Questi dati sono relativi alle portate medie (in l/s) in concessione per l'anno 2002, aggregate a scala comunale. Per quanto riguarda gli utilizzi irrigui includono pozzi irrigui sia aziendali sia consortili.

Inoltre, sono stati aggiornati al 2004 i dati del prelievo annuo dei pozzi di Padania Acque S.p.A.

Sono stati acquisiti anche i dati dell'archivio pozzi della Provincia di Cremona (aggiornato a giugno 2006), che contiene i dati relativi alle concessioni per singoli pozzi, in particolare la portata annua dichiarata o oggetto della concessione.

Le informazioni raccolte sui prelievi da falda possono essere così suddivise.

- a. Prelievi annui dei pozzi di Padania Acque S.p.A.: si tratta di 119 pozzi attivi per i quali sono noti i prelievi annui e misure di portata eseguite al momento della raccolta dei dati piezometrici.
- b. Prelievi per utilizzi civili, industriali, irriguo, zootecnico e piscicoltura aggregati a scala comunale e stimati in base al dato di portata registrato con la concessione dal PTUA oppure stimati per ciascun pozzo sulla base della portata annua riportata nell'archivio della Provincia di Cremona.
- c. Per i prelievi ad uso idropotabile nei comuni per i quali non è disponibile un dato di maggiore dettaglio come quello di Padania Acque S.p.A. (si tratta dunque del comune di Cremona e dei comuni appartenenti alle province di Lodi, Mantova e Bergamo compresi nel dominio del modello) è stato considerato il dato di concessione dal PTUA. In particolar modo per il comune di Cremona è stato utilizzato il dato riportato sul sito ufficiale dell'AEM Cremona S.p.A. di 12 Mm³/anno (www.aemcremona.it).

Per quanto riguarda il prelievo da falda non è disponibile alcun dato certo relativamente alla sua variazione stagionale.

2.8 Trasmissività

I dati di trasmissività usati per l'elaborazione delle relative carte e per l'analisi del sistema acquifero da modellare sono stati presi dalla Tabella 7, Capitolo 10 di Beretta *et al.* (1992) e dall'interpretazione di 81 prove a gradini e 8 curve di risalita acquisite insieme ai dati piezometrici di Padania Acque S.p.A. Questi dati si riferiscono all'acquifero semi-confinato. Per l'acquifero freatico sono invece disponibili 4 prove di portata i cui risultati sono riportati da Maione *et al.* (1991). Inoltre sono state eseguite due prove in pozzi del Comune di Treviglio, descritte in Appendice 9.3.2.

2.9 Stratigrafie di pozzi per acqua

Sono stati analizzati i dati provenienti da 427 sondaggi, distribuiti come segue:

- 201 nella provincia di Cremona relativi ai pozzi gestiti da Padania Acque S.p.A. (dei restanti 41 non erano note le coordinate geografiche e quindi non sono stati digitalizzati),

- 19 nella città di Cremona, in corrispondenza di pozzi gestiti da AEM Cremona S.p.A.,
- 12 nel territorio del CMPB,
- 24 distribuiti nella zona di Bergamo compresa nel dominio, appartenenti al database utilizzato nel PTUA.
- 171 distribuiti nei comuni della provincia di Mantova all'interno dell'area di studio e fornite dal SIT – Regione Lombardia.

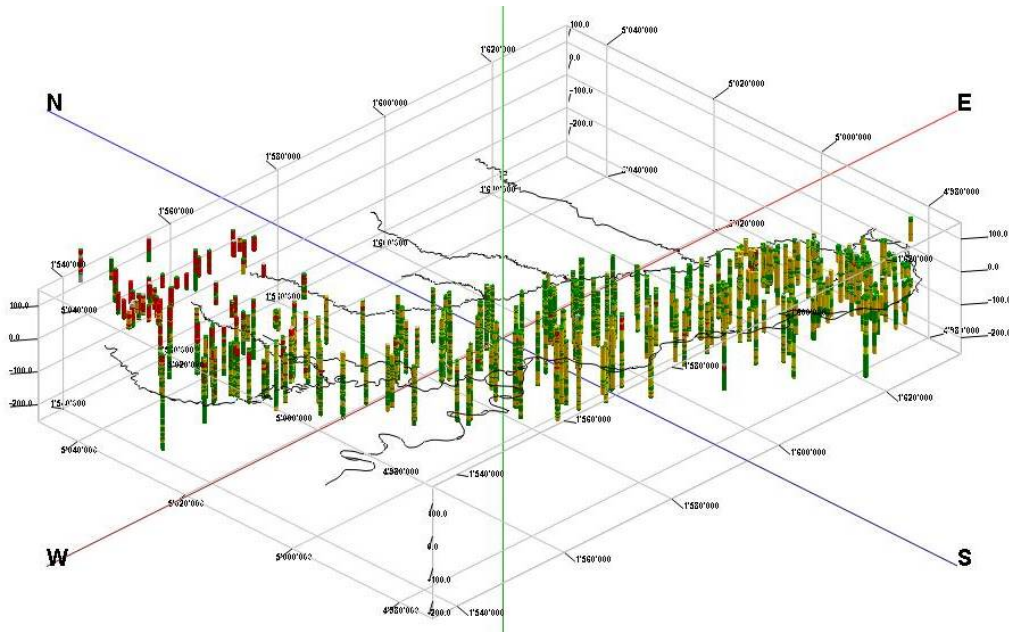


Figura 13. Distribuzione dei sondaggi.

Il dato relativo alle colonne stratigrafiche è tipicamente riportato in forma cartacea come una serie di record contenenti la descrizione della litologia dello strato considerato e le quote (solitamente relative al piano campagna) delle due superfici che delimitano superiormente e inferiormente lo strato, ad esempio:

Da (m)	A (m)	Descrizione litologica
21.5	25.5	Ghiaia e ghiaietto con sabbia e argilla

Questo formato non è adatto alla elaborazione automatica dei dati e per questo motivo si è scelto di inserire le stratigrafie con una codifica alfanumerica che permettesse una elaborazione più semplice.

Poiché a livello internazionale o nazionale non esiste una codifica standard, anche al fine di facilitare lo scambio di informazioni con l'amministrazione regionale, si è scelto di utilizzare la codifica proposta originariamente dalla Regione Emilia-Romagna e successivamente adattata dalla Regione Lombardia. Ad ogni litologia viene associata una lettera (A per argilla, G per ghiaia, S per sabbia, ecc.) e alle "congiunzioni" viene associato un numero (1 per "e", 2 per "con", ecc.). Così, ad esempio, la descrizione "Ghiaia e ghiaietto con sabbia e argilla" viene codificata come "G 1 GG 2 S 1 A".

L'inserimento dei dati è stato eseguito con un applicativo sviluppato dalla Regione Lombardia, denominato CASPITA, che permette di informatizzare colonne stratigrafiche, prove penetrometriche, analisi in situ e altri dati. Le 171 stratigrafie dei pozzi ubicati nella provincia di Mantova erano già state digitalizzate con questo sistema a cura della Regione Lombardia. Unendo i diversi file è stata ottenuta una banca dati di CASPITA, che include le 256 indagini a disposizione in modo da lavorare con un archivio organico e completo, di

facile accesso e consultazione, dal quale sono stati estratti i dati per le successive elaborazioni.

2.10 Sistema irriguo

2.10.1 Gestione delle acque irrigue

Il territorio regionale, ai sensi della L.R. 59 del 26 novembre 1994, oggi sostituita con la L.R. 7 del 16 giugno 2003, è suddiviso in Comprensori di Bonifica, unità omogenee sotto il profilo idrografico ed idraulico, per lo più delimitate da elementi naturali (fiumi e Prealpi), e frutto di aggregazioni territoriali di preesistenti enti di bonifica ed irrigui di dimensioni inferiori. I comprensori che ricadono nel territorio di studio sono essenzialmente 4: Cremasco (numero 7 nella classificazione regionale), Naviglio Vacchelli (11), Dugali (12), Navarolo (13) (Figura 14).

Il Comprensorio Cremasco si estende su una superficie di 568 Km² e comprende, totalmente o parzialmente, la superficie di 71 comuni: 47 della Provincia di Cremona, 9 della Provincia di Lodi, 12 della Provincia di Bergamo ed alcuni territori di 3 comuni della Provincia di Milano. La gestione delle acque è frazionata tra un numero elevato di enti irrigui; solo recentemente è stato raggiunto un accordo per la costituzione di un consorzio di secondo grado, che è ormai operativo, sebbene senza l'adesione di tutti gli enti presenti.

Il Comprensorio Naviglio Vacchelli, situato sulla sinistra idrografica del Fiume Adda fino alla confluenza con il Po, è costituito da una fertile pianura quasi completamente compresa nella Provincia di Cremona. Il Consorzio omonimo si occupa della gestione della rete di colo e in parte, della rete irrigua secondaria; nel comprensorio, oltre al Consorzio omonimo, esistono vari enti irrigui che operano in autonomia tra cui il principale è il Consorzio per l'Incremento dell'Irrigazione nel Territorio Cremonese. L'irrigazione viene effettuata con acque prelevate dai Fiumi Adda, Oglio e Serio. Integrazioni sono fornita da pozzi consortili.

Il Comprensorio Dugali è gestito dall'omonimo consorzio, costituito già nel 1568. Il nome deriva dal termine "dugale" utilizzato localmente per indicare i corsi d'acqua interessanti il territorio amministrativo aventi primariamente funzione di colatori delle acque in eccesso. Il territorio, sostanzialmente pianeggiante, consente l'allontanamento delle acque per la maggior parte per semplice gravità naturale grazie ai canali esistenti. L'irrigazione viene effettuata con acque prelevate dai Fiumi Po, Adda e Oglio.

Il territorio del Comprensorio Navarolo, a cavallo tra la provincia di Cremona e quella di Mantova, degrada dolcemente da ovest verso est ed evidenzia problematiche idrauliche assai complesse a causa della sua altimetria, variabile tra i 44 e 18 m s.l.m. Le acque per l'irrigazione vengono prelevate, tramite sollevamento per pompaggio, da Oglio e Po e ridistribuite successivamente su tutto il comprensorio.

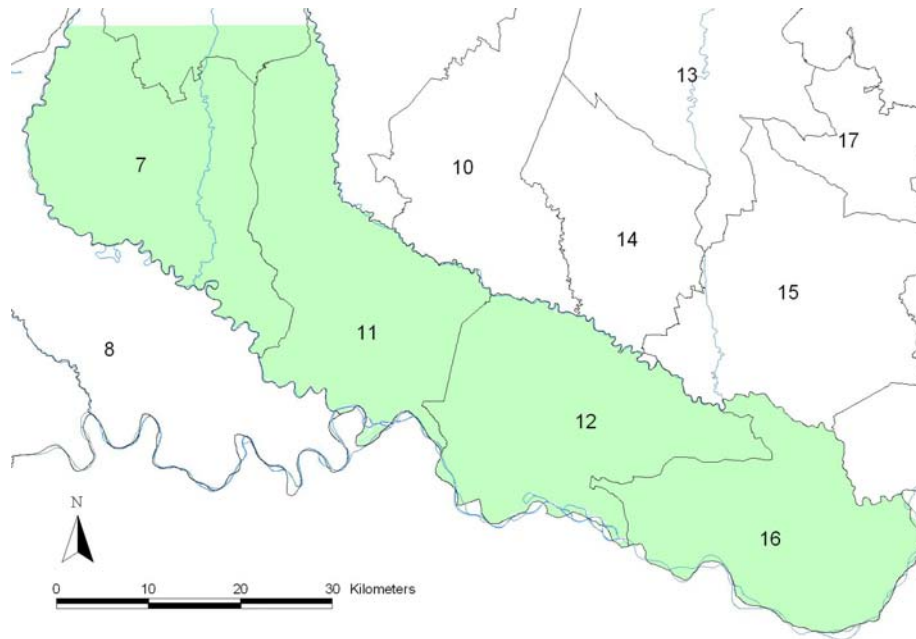


Figura 14. Area di studio e Comprensori di Bonifica.

2.10.2 Dotazioni irrigue

La notevole complessità idraulica dei territori ricadenti nella Provincia di Cremona, in cui si articola un intricato e denso reticolo di canalizzazioni naturali ed artificiali, è da molti decenni un ostacolo per la corretta determinazione dei volumi idrici ad uso irriguo; a tale complessità, si aggiungono le limitazioni nelle indagini dovute alle carenze della rete di monitoraggio.

Per la quantificazione della disponibilità idrica effettiva è stato necessario raccogliere tutte le informazioni disponibili, con l'obiettivo di individuare sul territorio le fonti irrigue diversificate (i.e. derivazioni da corsi d'acqua superficiali, fontanili, pozzi consortili, colature, sollevamento da fiumi, pozzi privati) ed effettuare il bilancio idrico per i singoli Enti irrigui.

Malgrado l'elevato interesse verso il progetto ed il notevole sforzo profuso da alcuni Consorzi, le informazioni ottenute hanno richiesto una consistente serie di integrazioni, modifiche ed elaborazioni preliminari prima che fosse possibile un loro inserimento organico nella banca dati utilizzata per le simulazioni con il modello idrologico del suolo.

La raccolta e l'analisi dettagliata dei dati hanno così innescato un virtuoso processo di verifica ed approfondimento riguardo alle problematiche legate alla gestione idraulica dei singoli Consorzi, attuato in collaborazione con questi ultimi. Ad esempio, grazie ai risultati della verifiche effettuate, si sono evidenziate alcune incertezze circa la distribuzione dei volumi idrici sul territorio di appartenenza di alcune bocche dei principali canali irrigui. I Consorzi interessati hanno quindi potuto avviare una serie di controlli mirati alla riduzione di tali incertezze.

Le informazioni raccolte sono state organizzate sistematicamente e successivamente trasferite dalla scala territoriale consortile a quella comprensoriale.

Come sarà ampiamente descritto nel Paragrafo 3.2.4, per la quantificazione della disponibilità idrica effettiva nell'area di studio, si è scelto il comizio irriguo come unità territoriale elementare di riferimento. Si è qui definito "comizio irriguo" quella porzione minima di territorio alimentata da un canale con portata di competenza continua.

I territori del Cremasco e del Cremonese sono, in tutta la regione, certamente tra quelli in cui l'articolazione dei comizi irrigui è più complessa, sia per la molteplicità delle fonti e l'intersezione e sovrapposizione delle reti di canali, che per la frammentazione della gestione tra un numero elevatissimo di enti di diversa natura ed importanza. Per questi motivi e grazie alle sinergie con un progetto parallelo - "TwoLe-B, un sistema per la pianificazione delle risorse idriche – Applicazione pilota al bacino dell'Adda", finanziato dalla Fondazione CARIPLO, di cui IIA è coordinatore - le indagini per la determinazione dei confini dei comizi irrigui sono state particolarmente approfondite. Esse hanno preso le mosse dallo studio del "Catasto delle Acque Irrigue della Provincia di Cremona" (CAI), pubblicato nel 1986 e frutto di un lavoro trentennale del Consorzio per l'Incremento dell'Irrigazione nel Territorio Cremonese (CIC). Il CAI costituisce una sorta di inventario delle disponibilità idriche ad utilizzo irriguo nelle pianure cremasca, cremonese e casalasca, rispecchiante la situazione esistente attorno al 1980. Sulla base delle tavole IGM, il CIC ha individuato, a scala 1:25.000, i comizi irrigui che interessano il territorio provinciale, la denominazione delle rogge da cui essi vengono serviti e le portate ordinarie estive disponibili. Nel CAI, le portate relative ai canali irrigui principali e secondari sono distinte per ente gestore (CIC; Consorzio di Irrigazione Naviglio Civico – CNC; Consorzio di Bonifica Naviglio Vacchelli – CNV; Consorzio di Bonifica Dugali - CD) e non per fonte principale di alimentazione del reticolo irriguo. Inoltre, le acque pubbliche interne non sono ripartite in coli, fontanili o fiumi. Le informazioni presenti nel CAI sono state quindi oggetto di una consistente serie di integrazioni e modifiche, che hanno consentito di attualizzarle e completarle con gli attributi quali-quantitativi necessari per le elaborazioni svolte.

Per la determinazione dei confini dei comizi irrigui ricadenti nel territorio del Comprensorio Navarolo e del riparto tra essi delle portate derivate dalle diverse fonti, non avendo a disposizione un documento di riferimento come lo è il CAI, si è proceduto con lo studio e l'elaborazione dei dati raccolti da URBIM (Unione Regionale Bonifiche Irrigazioni Miglioramenti fondiari) per la banca dati SIGRIA (Sistema Informativo per la Gestione delle Risorse Idriche in Agricoltura) nonché, quando necessario, di documenti cartacei ed informatici provenienti dal Consorzio Navarolo (CN).

Nell'area di studio l'irrigazione avviene anche grazie alle portate emunte dai pozzi aziendali privati. L'informazione relativa a tali portate, non presente presso i Consorzi, è stata acquisita dal PTUA (Piano di Tutela ed Utilizzo delle Acque della Regione Lombardia), in cui sono definite le portate di concessione per i prelievi da pozzi irrigui. Le portate riportate nel PTUA, riferite all'anno 2002, sono aggregate a scala comunale: ad ogni comune è associato il valore di concessione dei pozzi irrigui, sia consortili che aziendali.

3 Il modello di simulazione del bilancio idrologico del terreno e dei flussi di ricarica alla falda

3.1 Caratteristiche del modello di simulazione

I flussi di ricarica dalla superficie del suolo verso la falda in territori di pianura irrigua, come quelli della Provincia di Cremona, sono notevolmente influenzati dalle pratiche irrigue; esse determinano infatti la gran parte della circolazione idrica superficiale nei mesi primaverili ed estivi ed innescano intensi processi di scambio tra acque sotterranee e superficiali. Di conseguenza, per la creazione di un modello di flusso nell'acquifero è indispensabile l'implementazione di un modello distribuito di bilancio idrologico del suolo, che incorpori le effettive modalità secondo cui si esplica il servizio irriguo, attraverso cui pervenire ad una stima dei flussi di ricarica alla falda.

Il bilancio idrologico del suolo comporta la descrizione di diversi processi fisici e dipende dall'interazione di numerosi fattori, sia naturali che antropici, il cui peso risulta generalmente variabile all'interno del territorio e nel corso del tempo. I principali sono:

- *le caratteristiche e l'uso dei suoli e l'andamento delle grandezze meteorologiche*, che determinano i flussi naturali di ricarica della falda, in assenza di apporti irrigui;
- *le caratteristiche del sistema irriguo* (opere di presa, adduzione, distribuzione ed erogazione su campo), che determinano le modalità e l'efficienza secondo cui si esplica il servizio irriguo;
- *la risorsa idrica effettivamente disponibile a fini irrigui*, che, considerati tutti gli altri fattori, determina gli effettivi apporti idrici al suolo nelle diverse porzioni del territorio.

Pertanto, il computo del bilancio idrologico del suolo richiede informazione territoriale relativa alla pedologia, alle caratteristiche idrologiche dei suoli, alle grandezze agrometeorologiche, all'uso del suolo ed alle efficienze di adacquamento, di adduzione e di distribuzione, nonché alle portate derivate e distribuite sul territorio. Inoltre, è necessario descrivere le caratteristiche delle colture presenti, attraverso l'assegnazione dei parametri colturali per la stima dell'intercettazione fogliare e dell'evapotraspirazione. Infine, per la quantificazione della disponibilità idrica effettiva nelle diverse zone, è necessario individuare sul territorio le fonti irrigue diversificate e le loro aree di pertinenza, ovvero i comizi irrigui.

Il modello di simulazione che è stato realizzato ha le seguenti caratteristiche:

- tiene conto di tutti i fattori sopra elencati, includendo la loro variabilità nello spazio e nel tempo;
- è applicabile nel contesto dei sistemi irrigui lombardi, di cui considera le caratteristiche e la disponibilità di dati territoriali, agronomici ed idro-meteorologici e le caratteristiche delle relative reti di monitoraggio regionali;
- consente di valutare gli effetti sul bilancio idrologico di interventi di riassetto dei sistemi irrigui, di variazioni di uso del suolo e di possibili cambiamenti delle condizioni climatiche.

Il modello descritto costituisce un'evoluzione di quello già sviluppato da IIA nel corso di un precedente progetto (Facchi *et al.*, 2004; Gandolfi *et al.*, 2004); le principali estensioni si riferiscono a:

- calcolo del bilancio idrico del suolo in funzione della disponibilità idrica effettiva per l'uso irriguo, determinata dalle portate derivate e prelevate in concessione dalle

diverse fonti, dalla loro adduzione e ripartizione tra i comizi irrigui di competenza e dalla loro distribuzione all'interno dei comizi; ovvero, sviluppo di un **modello del sistema irriguo**, integrato con il modello di simulazione del bilancio idrologico del suolo;

- implementazione di un modulo che consente di tener conto dell'influenza della variabilità interannuale degli andamenti delle grandezze meteorologiche sulle fasi fenologiche delle colture (**modello delle fasi fenologiche colturali**);
- implementazione di un modulo di interfaccia con il modello di simulazione del flusso nell'acquifero.

Il modello di simulazione è dunque costituito da tre moduli tra loro integrati (Figura 15):

Bilancio idrologico del suolo: consente di calcolare i consumi, gli eventuali deficit idrici delle colture e i flussi di ricarica verso la falda, tenendo conto della variabilità spaziale delle condizioni meteorologiche, dei suoli, dei metodi e delle pratiche irrigue;

Fasi fenologiche colturali: determina la data di semina media e calcola la durata delle fasi fenologiche delle diverse colture in funzione dell'andamento della temperatura nei diversi anni di simulazione;

Sistema irriguo: considera le caratteristiche di ciascuna fonte ed acquisisce o stima (nel caso dei prelievi da pozzo) i relativi dati di portata; considera, in modo semplificato, la distribuzione delle acque ai comizi irrigui attraverso la rete dei canali irrigui e la riduzione di portata nel trasporto, tenendo conto dell'efficienza delle reti; inoltre, descrive la distribuzione dei volumi idrici disponibili all'interno di ciascun comizio, considerando le caratteristiche delle pratiche irrigue (metodo irriguo adottato, condizioni di stress idrico limitato, turnazione della disponibilità idrica, recuperi dei volumi in dotazione).

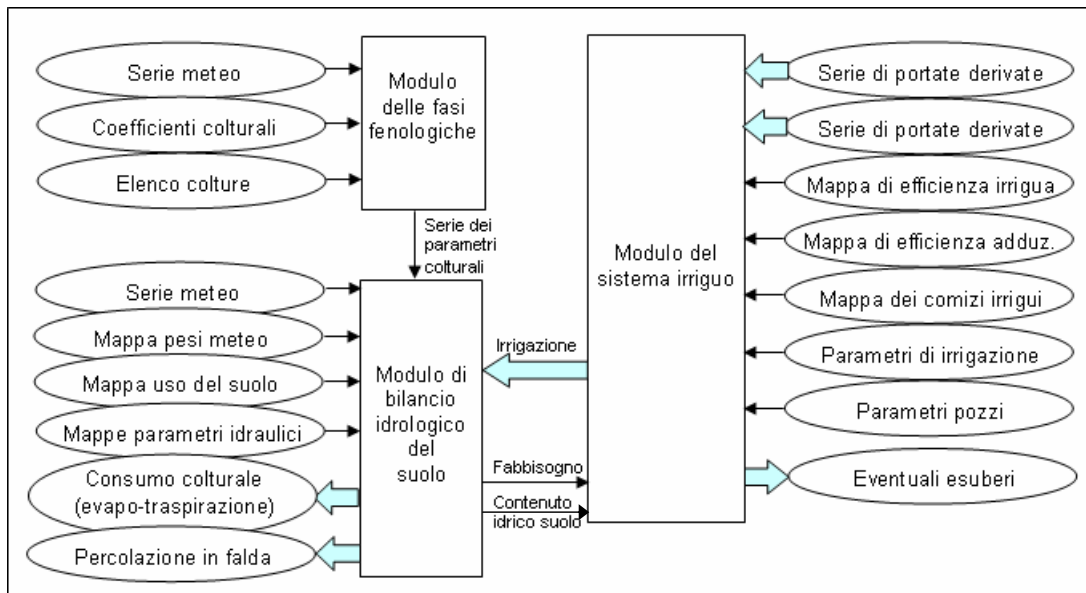


Figura 15. Struttura schematica del modello di simulazione.

3.1.1 Modulo di bilancio idrologico del suolo

Ai fini del computo del bilancio idrologico del suolo in forma distribuita, il modello di simulazione suddivide il territorio mediante una griglia regolare a maglie quadrate ed individua per ogni maglia un volume di controllo, che si estende dalla superficie del suolo

alla profondità esplorata dagli apparati radicali della vegetazione, a cui si applicano le equazioni di bilancio. Le dimensioni delle maglie devono essere tali da garantire che in ognuna di esse siano sostanzialmente omogenee le caratteristiche pedologiche e di uso del suolo, alla scala a cui queste informazioni sono disponibili.

La Figura 16 fornisce una rappresentazione schematica della struttura del modulo di bilancio, che adotta un passo di tempo giornaliero e si basa sull'equazione FAO-Penman Monteith (FAO – Paper 56, 1998) per la stima dell'evapotraspirazione e sul metodo del Curve Number (USDA-SCS, 1972; 1986) per la stima dei volumi di pioggia netta e di deflusso superficiale (si rimanda all'Appendice 9.1 per una descrizione dettagliata delle equazioni del modello di bilancio).

In assenza di apporti irrigui, le precipitazioni sono l'unico ingresso che reintegra le perdite per evapotraspirazione ed eventualmente alimenta i flussi di percolazione verso la falda.

Nella stagione irrigua, le celle che ospitano colture irrigue ricevono ulteriori apporti sotto forma, appunto, di interventi irrigui; il numero e l'entità degli interventi dipendono da numerosi fattori: la coltura ed il suolo, gli andamenti meteorologici, le pratiche irrigue, nonché, ovviamente, la disponibilità di risorsa idrica. Le modalità ed i criteri secondo cui questi fattori sono incorporati nel modello è descritta nei due Paragrafi seguenti.



Figura 16. Descrizione dei processi fisici che interessano lo spessore insaturo del suolo, compreso tra il piano campagna e la superficie freatica. I riferimenti bibliografici indicano le principali fonti utilizzate per la modellizzazione dei singoli processi.

3.1.2 Modulo delle fasi fenologiche colturali

Il metodo FAO-Penman Monteith, utilizzato nel modulo di bilancio idrologico, necessita di alcuni parametri per caratterizzare le diverse colture presenti. I valori di questi parametri (coefficiente colturale K_{cb} , indice di area fogliare LAI , profondità dello strato di suolo interessato dall'attingimento radicale Z_r e altezza della coltura h) variano a seconda della coltura ed anche, per una stessa coltura, in dipendenza dalla fase fenologica in cui essa si trova. A loro volta, le fasi fenologiche possono avere durate variabili nei diversi anni; numerosi fattori concorrono a determinare le durate delle fasi, ma, tra di essi, hanno certamente grande importanza gli andamenti delle grandezze meteorologiche e soprattutto della temperatura.

Il modulo delle fasi fenologiche colturali implementato nel modello di simulazione - per la cui descrizione dettagliata si rimanda all'Appendice 9.2 - si basa sulla teoria dei gradi giorno, secondo la quale lo sviluppo colturale può essere messo in relazione con

l'accumulo di somme termiche, calcolate a partire dalla temperatura giornaliera media registrata. Sono inoltre implementate procedure che considerano altri fattori che influenzano lo sviluppo colturale, in particolare delle colture biennali e dei cereali autunno-vernini (ad esempio, l'orzo):

- la *vernalizzazione*, ovvero la necessità di un periodo di basse temperature (in genere comprese tra 0 e 12 °C) per promuovere la successiva fioritura;
- il *fotoperiodo*, ovvero l'influenza delle ore di luce nel giorno sullo sviluppo della coltura.

In particolare, per ogni coltura è definito un intervallo di temperature (compreso tra *temperatura di base* e *temperatura massima colturale*) all'interno del quale la pianta accumula gradi utili al suo sviluppo. Per temperature inferiori a quella di base la coltura entra in stasi vegetativa; viceversa, superiormente alla temperatura massima colturale, lo sviluppo non è più limitato dalla temperatura. In particolare, lo sviluppo colturale risulta correlato in modo lineare con le temperature medie giornaliere.

L'accumulo di somme termiche inizia alla semina della coltura; i valori cumulati vengono confrontati con quelli richiesti per il raggiungimento degli stadi di sviluppo colturale, a cui corrispondono valori predefiniti dei parametri colturali. Le date in cui vengono raggiunti tali valori determinano le durate dei corrispondenti stadi di sviluppo fenologico; a titolo di esempio la Figura 17 mostra le durate delle quattro fasi fenologiche principali che caratterizzano il mais da granella negli anni dal 1993 al 2005.

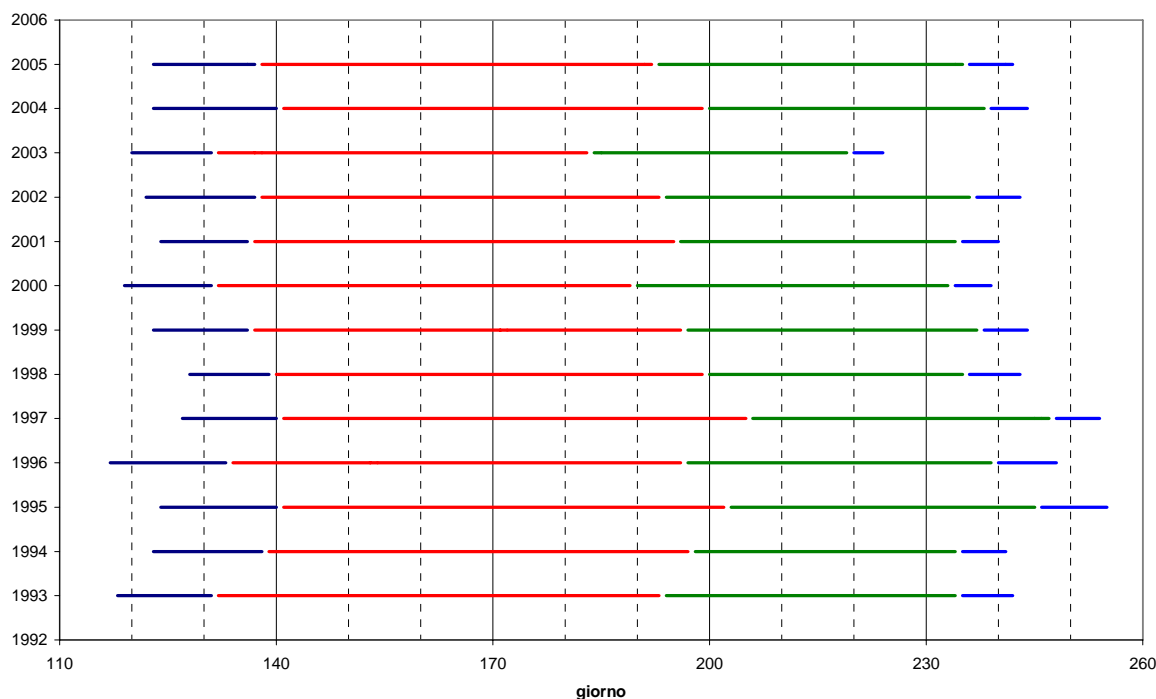


Figura 17. Durata delle fenofasi del mais negli anni 1993-2005; ogni colore rappresenta la stessa fenofase durante i diversi anni.

3.1.3 Modulo del sistema irriguo

Il valore del termine di ingresso relativo agli apporti irrigui alle singole celle nel modulo di bilancio idrologico dipende da una molteplicità di fattori: dalle portate derivate e prelevate dalle diverse fonti, dalla loro ripartizione tra i comizi irrigui di competenza, dalle caratteristiche strutturali della rete di adduzione e dalla sua gestione, dalle modalità di

distribuzione dell'acqua e dalle pratiche irrigue utilizzate all'interno dei comizi. Pertanto, la descrizione di questo complesso di fattori (che costituiscono quello che chiameremo *sistema irriguo*) è il presupposto necessario per il computo del bilancio idrologico del suolo.

Il modello di simulazione comprende un modulo del sistema irriguo articolato nelle seguenti componenti:

- fonti;
- adduzione;
- distribuzione ed adacquamento.

Fonti

Le tipologie di fonti considerate nel modello comprendono:

- derivazioni da corsi d'acqua superficiali;
- fontanili;
- colature;
- pozzi.

Derivazioni da corsi d'acqua

Le grandi derivazioni da corsi d'acqua costituiscono la fonte primaria di alimentazione dell'irrigazione in molti territori irrigui, compreso quello cremonese. La portata derivata è controllabile, nel senso che le opere di presa sono dotate di manufatti per la regolazione delle portate immesse nella rete irrigua. Il controllo delle portate viene effettuato sulla base delle esigenze irrigue del territorio servito, ma generalmente implica anche un coordinamento su scala più vasta, almeno a livello del bacino fluviale su cui insiste la derivazione. La descrizione dei processi decisionali che determinano l'andamento delle portate derivate esula dagli obiettivi della ricerca e, di conseguenza, il modello di simulazione presuppone che esse siano fornite in ingresso per l'intero orizzonte di simulazione di interesse. Se le serie relative ad una o più derivazioni non sono disponibili il modello può effettuare una loro stima sulla base dell'ipotesi che le derivazioni attingano ad una fonte con disponibilità illimitata; in sostanza il modello valuta i fabbisogni dei territori serviti dalle derivazioni e pone di giorno in giorno la portata derivata pari a quella necessaria per la loro soddisfazione, supposta in ogni caso disponibile.

Fontanili

I fontanili costituiscono una fonte irrigua peculiare di alcuni territori di pianura. Singolarmente si tratta di corpi idrici con portata modesta, ma complessivamente possono costituire una fonte di alimentazione diffusa in grado di contribuire in modo significativo all'irrigazione di vaste aree. Al contrario delle derivazioni da corsi d'acqua, essi costituiscono una fonte sostanzialmente non controllata, la cui portata dipende dai processi idrologici ed idrogeologici che hanno luogo nei territori di alimentazione della falda più superficiale drenata dai fontanili stessi. Come per le derivazioni, le serie temporali di portate giornaliere dei fontanili devono essere fornite in ingresso al modello per l'intero orizzonte di simulazione di interesse. In linea di principio è possibile associare ad ogni fontanile la relativa serie di portate; generalmente, tuttavia, dato il loro elevato numero e le portate relativamente modeste, è preferibile aggregare in un gruppo quei fontanili che alimentano in modo congiunto una stessa porzione di territorio, fornendo in ingresso la portata complessiva del gruppo (si rimanda ai Paragrafi 3.2.4 e 3.2.7 per l'illustrazione delle modalità seguite nell'individuazione dei gruppi e nella stima delle relative portate nel caso dei fontanili di interesse per l'irrigazione del territorio della Provincia di Cremona).

Colature

Parte della disponibilità idrica di alcuni comizi è costituita dalle colature dei volumi distribuiti dalla rete irrigua a monte. Le colature sono determinate da recuperi di volumi non utilizzati e da processi di drenaggio dei volumi distribuiti, ad opera della fitta rete dei canali irrigui. Per loro natura costituiscono una fonte indiretta di risorsa, diffusa sul territorio, sostanzialmente non controllata e difficilmente misurabile; di conseguenza, è generalmente necessario ricorrere ad una procedura di stima delle colature.

Un semplice criterio di stima si basa sul presupposto che l'entità delle colature sia proporzionale all'entità delle portate derivate dalle fonti dirette; l'aliquota di colature rispetto a queste ultime non è però costante, ma varia in funzione dello scostamento delle portate effettivamente derivate dalle portate massime derivabili. Anche in questo caso, come in quello dei fontanili, è generalmente opportuno suddividere il complesso dei territori alimentati dalle colature in zone omogenee; per ognuna di queste ultime la portata delle colature, $Q_{c,t}$, nel giorno t è data dalla relazione:

$$(3.1) \quad Q_{c,t} = \eta_{c,t} \cdot Q_t$$

essendo:

Q_t la portata della fonti dirette che alimentano la zona nel giorno t ;

$\eta_{c,t}$ fattore di colo nel giorno t , fornito dalla relazione:

$$(3.2) \quad \eta_{c,t} = \begin{cases} 0 & \text{se } Q_t \leq Q_{s,t} \\ \eta_c^{MAX} \frac{Q_t - Q_{s,t}}{Q_t^{MAX} - Q_{s,t}} & \text{se } Q_t > Q_{s,t} \end{cases}$$

di cui la Figura 18 fornisce la rappresentazione grafica;

$Q_{s,t}$ valore di soglia della portata delle fonti dirette al di sotto del quale le colature divengono trascurabili;

Q_t^{MAX} portata massima delle fonti dirette;

η_c^{MAX} valore del fattore di colo in corrispondenza di una portata Q_t pari alla portata massima Q_t^{MAX} .

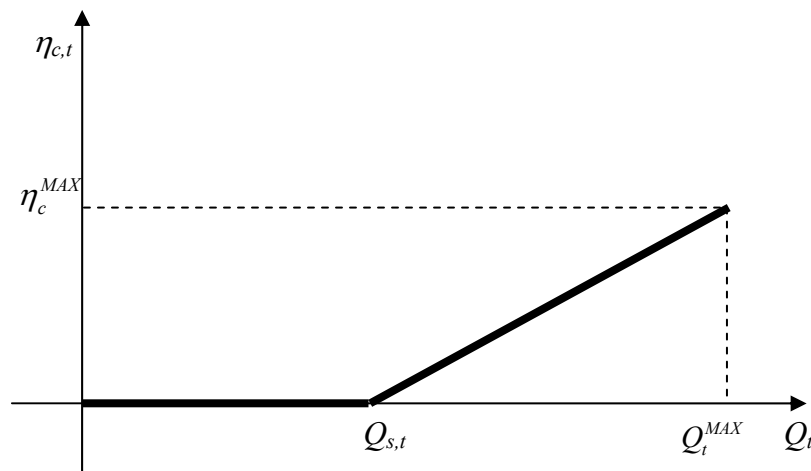


Figura 18. Andamento del fattore η_t al variare della portata Q_t .

Il modello di simulazione consente di scegliere tra l'utilizzo della procedura di stima illustrata e la fornitura diretta delle serie temporali di portate giornaliere delle colature di ogni zona omogenea, per l'intero orizzonte di simulazione di interesse.

Prelievi da acque sotterranee

I pozzi costituiscono fonti di alimentazione del sistema irriguo caratterizzate da portate singolarmente modeste, ma da numerosità generalmente elevata. In questo presentano quindi analogie con i fontanili, con cui condividono anche il serbatoio di alimentazione, costituito dalla falda acquifera superficiale; differiscono però sostanzialmente dai fontanili per la possibilità di controllo della portata emunta.

In linea di principio è possibile associare ad ogni pozzo la relativa serie di portate; tuttavia, dato il loro numero, spesso elevato, e le portate relativamente modeste, è decisamente consigliabile aggregare in un gruppo quei pozzi che alimentano in modo congiunto una stessa porzione di territorio, fornendo in ingresso la portata complessiva del gruppo.

Poiché la conoscenza dell'effettiva entità e localizzazione dei pozzi non sempre è completa e le portate effettivamente prelevate sono spesso ignote, è stato realizzato, all'interno del modello di simulazione, un modulo per la stima delle portate prelevate dai pozzi. Esso effettua una distinzione tra due tipologie di pozzi:

- pozzi (o gruppi di pozzi) di cui sono note localizzazione e caratteristiche di impianto e dei comizi da essi alimentati; è tipicamente il caso dei pozzi destinati al rimpinguamento delle portate addotte dalle reti consortili e gestiti direttamente da consorzi irrigui (e perciò verranno indicati come *pozzi consortili* nel seguito);
- gruppi di pozzi che ricadono in una zona definita (ad esempio in un dato comizio o in uno specifico comune), ma di cui non sono completamente note l'esatta localizzazione e le caratteristiche impiantistiche dei singoli pozzi; si tratta, tipicamente, di pozzi privati destinati all'alimentazione diretta dell'irrigazione aziendale (e perciò verranno indicati come *pozzi aziendali* nel seguito).

Nel primo caso la stima della portata sollevata dal singolo pozzo (o dal gruppo di pozzi) viene effettuata sulla base delle condizioni di umidità dello strato di suolo interessato dagli apparati radicali nell'area alimentata dalle acque di pompaggio, valutate dal modello di bilancio idrologico. In sostanza, in un generico giorno t della stagione irrigua, si valuta il valore medio pesato dell'acqua prontamente disponibile per le colture in tutte le N celle alimentate dal pozzo considerato:

$$(3.3) \quad \bar{U}_t = \frac{\sum_{i=1}^N [V_{i,t} - (TAW_{i,t} - RAW_{i,t})] \frac{T_{i,t}}{N}}{\sum_{i=1}^N T_{i,t}}$$

in cui le grandezze, tutte riferite al generico giorno t , hanno il seguente significato:

\bar{U}_t è il valor medio pesato dell'acqua prontamente disponibile nell'area servita dal pozzo (o gruppo di pozzi);

$V_{i,t}$ è il contenuto idrico nella cella i -esima dell'area, al netto dell'umidità al punto di appassimento;

$TAW_{i,t}$ è il volume di acqua nella cella i -esima quando il contenuto idrico è alla capacità di campo, al netto dell'umidità al punto di appassimento;

$RAW_{i,t}$ è il volume di acqua prontamente disponibile per le colture nella cella i -esima;

$T_{i,t}$ è il tasso di traspirazione nella cella i -esima.

L'attivazione del pozzo (o gruppo pozzi) avviene solo se il valore di \bar{U}_t scende al di sotto di un'aliquota assegnata, α_c , del suo valore massimo:

$$(3.4) \quad \bar{U}_t^{MAX} = \sum_{i=1}^N RAW_{i,t} \cdot \frac{T_{i,t}}{\sum_{i=1}^N T_{i,t}}$$

Inoltre, se tale condizione è soddisfatta, l'attivazione è totale o parziale, a seconda del valore del rapporto tra \bar{U}_t e \bar{U}_t^{MAX} (si veda l'andamento esemplificativo di Figura 19).

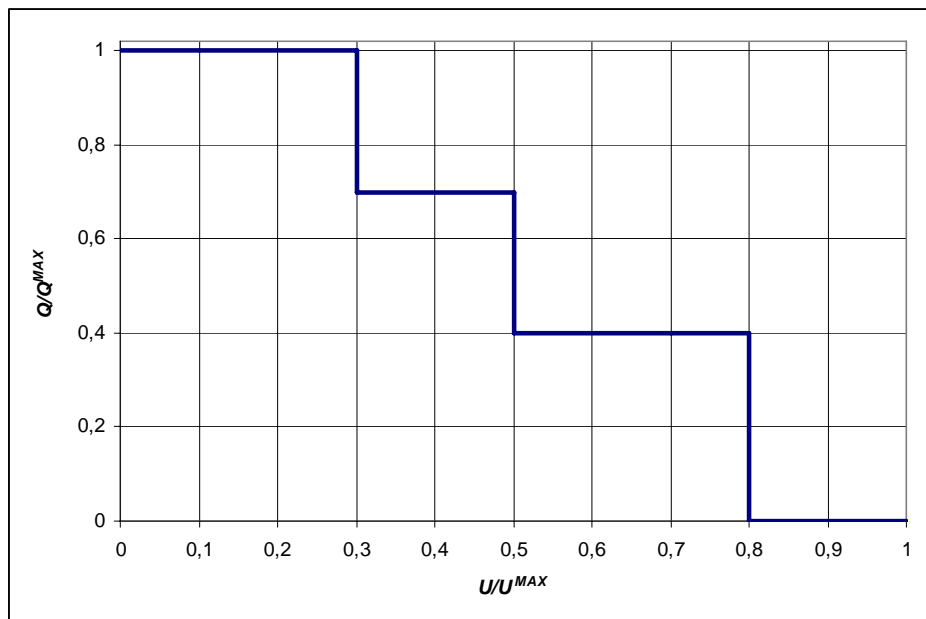


Figura 19. Andamento della portata prelevata da pozzo consortile (o gruppo pozzi consortili) al variare del contenuto idrico dei suoli dell'area servita.

Nel caso dei pozzi aziendali la stima delle portate prelevate viene effettuata sulla base della suddivisione del territorio in zone, comprendenti uno o più comizi irrigui, in cui si ipotizza che siano presenti pozzi aziendali in grado di integrare gli apporti irrigui delle altre fonti - in caso essi siano insufficienti - o di provvedere integralmente all'approvvigionamento irriguo, nel caso in cui gli altri apporti siano assenti.

L'eventuale attivazione del prelievo viene valutato quotidianamente a livello di singola cella per ogni comizio ed ha luogo allorquando sono soddisfatte due condizioni:

- la prima subordina l'effettuazione del prelievo alla verifica che non sia prevista una disponibilità idrica per la cella da altre fonti entro un ridotto arco di tempo, come illustrato nel seguito (sotto-paragrafo *Distribuzione ed adacquamento*).
- la seconda è analoga a quella vista per i pozzi consortili e, trattandosi di un'unica cella, può essere posta nella più semplice forma:

$$(3.5) \quad V_{i,t} - (TAW_{i,t} - RAW_{i,t}) < \alpha_i \cdot RAW_{i,t}$$

ovvero consiste nel verificare se lo scostamento tra il contenuto idrico in condizioni di capacità di campo e quello corrente supera un'aliquota prefissata, α_i , del massimo valore dell'acqua prontamente disponibile per la coltura;

Se entrambe le condizioni sono soddisfatte viene effettuato un prelievo di entità sufficiente all'irrigazione della cella, tenendo conto dell'efficienza del metodo irriguo utilizzato.

Sia nel caso dei pozzi consortili che di quelli aziendali si ipotizza che la fonte sia illimitata, ovvero che il valore del prelievo stimato sia sempre effettivamente realizzabile; gli effetti dei prelievi sull'acquifero vengono poi valutati tramite il corrispondente modello di simulazione (si veda il Capitolo 6) che consente di verificarne l'effettiva sostenibilità.

Vale la pena infine di rimarcare che i metodi di stima utilizzabili per i pozzi possano essere applicati in modo del tutto analogo per altre fonti (ad esempio per le derivazioni da acque superficiali) pur di supporle illimitate, verificando eventualmente a posteriori la compatibilità del prelievo con le portate disponibili.

Adduzione

Il trasporto della risorsa idrica dai punti di prelievo (costituiti dalle diverse fonti disponibili) ai punti di consegna (costituiti dai comizi in cui è suddiviso il territorio) riveste un'importanza fondamentale nelle reti irrigue, siano esse a superficie libera o in pressione. Per una descrizione dettagliata dei processi di trasporto è necessario ricorrere a modelli idraulici che descrivono le condizioni di moto vario delle correnti e che richiedono un'accurata conoscenza delle caratteristiche topologiche, geometriche ed idrauliche delle reti. Questo tipo di modelli è particolarmente utile per la gestione di reti irrigue in pressione, per le quali infatti è disponibile una vasta letteratura. Nel caso delle reti a superficie libera, la maggiore rigidità nella derivazione e nell'erogazione della risorsa fa sì che la regolazione avviene sulla base di leggi prefissate di apertura di organi di controllo delle portate che determinano condizioni di moto approssimativamente stazionarie, o addirittura uniformi. Sia ai fini della gestione, sia a maggior ragione, in modelli a supporto della pianificazione delle risorse idriche, quale quello in questione, il modulo di adduzione per reti a superficie libera può quindi essere notevolmente semplificato.

In sostanza, gli aspetti che è fondamentale includere sono essenzialmente due: una rappresentazione, seppure semplificata, della topologia della rete e la messa in conto, tra i processi che hanno luogo durante il trasporto, perlomeno delle perdite di adduzione. Quest'ultimo aspetto è assai rilevante nel caso di reti di canali non rivestiti, dove le perdite possono costituire un'aliquota significativa delle portate addotte.

Il modulo di adduzione opera nel modo seguente: per ogni comizio devono essere note le fonti che lo alimentano, l'aliquota della portata derivata o prelevata da ogni fonte che viene ad esso allocata (sulla base delle dotazioni nominali e delle derivazioni in concessione) e l'efficienza di adduzione dalla fonte al comizio. Un comizio può quindi essere approvvigionato da diverse fonti e la portata complessivamente disponibile nel giorno t , al lordo delle perdite di adduzione, è data dalla somma delle portate fornite dalle diverse fonti, secondo la semplice relazione:

$$(3.6) \quad q_{j,t} = \sum_{i=1}^{N_f} \varepsilon_{ij} \eta_{ij} Q_{i,t}$$

in cui:

$q_{j,t}$ è la portata netta disponibile per il comizio j nel giorno t ;

ε_{ij} è la frazione della portata derivata dalla fonte i allocata al comizio j ;

- η_{ij} è l'efficienza idraulica di adduzione (rapporto tra la portata - destinata al comizio - prelevata alla fonte e la portata consegnata al comizio) tra la fonte i e il comizio j ;
- $Q_{i,t}$ è la portata derivata dalla fonte i nel giorno t .

È evidente che la relazione costituisce una rappresentazione approssimata del funzionamento di una rete irrigua a gravità. Essa presuppone che:

- la regola di riparto tra i comizi delle portate derivate da ogni fonte sia rigida;
- i tempi di trasferimento dell'acqua dalla fonte al comizio siano inferiori al passo di simulazione (giornaliero nel caso in esame);
- l'efficienza di adduzione sia indipendente dal valore della portata convogliata e costante nell'arco dell'intera stagione irrigua.

La prima ipotesi è spesso sostanzialmente verificata nelle reti irrigue a superficie libera con distribuzione per turno ed orario, poiché il riparto delle portate tra i comizi è effettivamente rigido. La seconda ipotesi può essere restrittiva nel caso di grandi compresori con reti molto estese in cui i tempi di trasferimento possono superare le ventiquattr'ore; in ogni caso gli effetti sono limitati ad una parziale rimodulazione delle portate disponibili ai comizi nell'arco di pochissimi giorni, accettabile nell'ambito di un modello di simulazione a supporto della pianificazione delle risorse a scala compresoriale. Si deve considerare, inoltre, che anche in questi casi l'approssimazione è tanto migliore quanto più è ridotta la variazione intergiornaliera delle portate derivate (essendo del tutto ininfluenza nel caso di portate costanti); la gradualità che generalmente si riscontra nell'andamento delle serie di portate derivate per uso irriguo supporta quindi ulteriormente l'ipotesi.

La terza ipotesi può essere critica per due ordini di motivi: l'entità delle perdite di adduzione è generalmente molto difficile da valutare e la loro variabilità nell'arco della stagione irrigua può essere rilevante, con valori generalmente più elevati nelle fasi iniziali; tuttavia, la scarsissima disponibilità di misure dirette delle perdite di adduzione ha sconsigliato il ricorso ad approcci modellistici più complessi, di calibrazione ancora più problematica.

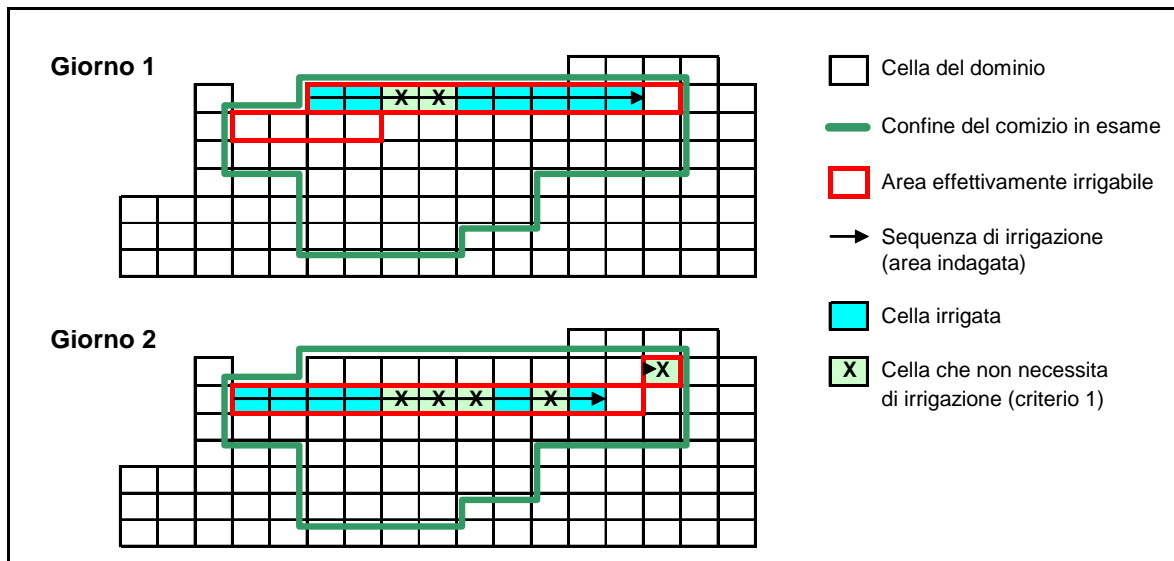
Distribuzione ed adacquamento

La portata $q_{j,t}$ disponibile per il generico comizio j nel giorno t , esclusa la sola aliquota proveniente da prelievi da pozzi aziendali, viene erogata alle celle che lo costituiscono con un criterio che riproduce la distribuzione turnata. Il modulo di distribuzione, infatti, valuta dapprima il numero massimo di celle irrigabili come rapporto tra il volume addotto al comizio nell'arco delle ventiquattro ore ed il volume specifico di adacquamento (variabile a seconda del metodo irriguo utilizzato oltre che delle dimensioni della cella), e successivamente determina quali celle possono effettivamente essere irrigate. Queste ultime sono in numero superiore del numero massimo di celle irrigabili e vengono individuate ogni giorno a partire dall'ultima irrigata il giorno precedente (Figura 20a); le celle comprese nel comizio vengono considerate in sequenza, partendo dalla prima in alto a sinistra e scendendo all'ultima in basso a destra e poi ricominciando nuovamente dall'alto. Il numero di giorni necessario per coprire l'intero comizio riproduce, seppure in maniera approssimata, la rotazione dell'acqua tra le diverse aziende all'interno del comizio. L'erogazione dell'irrigazione in una cella irrigabile non è automatica, ma è legata all'effettiva presenza di condizioni di umidità che richiedono l'intervento (valutate tramite il modulo di bilancio idrologico); il volume di adacquamento non utilizzato da una cella risulta disponibile per le successive celle, tra quelle selezionate come irrigabili nel giorno, fino ad esaurimento di queste ultime (Figura 20a). In particolare l'irrigazione avviene sulla base di una condizione del tutto analoga a quella utilizzata per i pozzi aziendali, consistente nel verificare se lo scostamento tra il contenuto idrico in condizioni di capacità

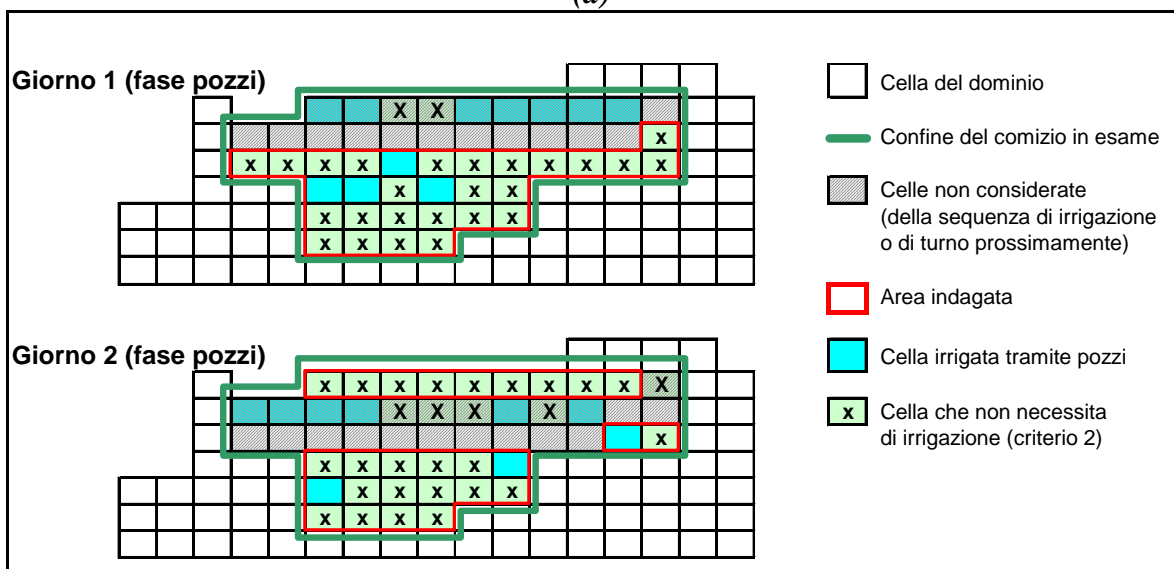
di campo e quello corrente supera un'aliquota prefissata, α_i , dell'acqua prontamente disponibile per la coltura (criterio 1):

$$(3.7) \quad V_{i,t} - (TAW_{i,t} - RAW_{i,t}) < \alpha_i \cdot RAW_{i,t}$$

In genere il valore di α_i è maggiore di quello di α_a utilizzato per i pozzi aziendali; ciò riflette il fatto che, nel caso di disponibilità legate alla distribuzione turnata, il mancato utilizzo comporta una perdita di risorsa già allocata al comizio (salvo un possibile recupero come colatura), mentre nel caso dei pozzi il prelievo non viene semplicemente effettuato. Può accadere comunque che non tutta la portata $q_{j,t}$ venga utilizzata se la condizione di umidità delle celle irrigabili è già elevata (ad esempio a seguito di precipitazioni o nel caso di disponibilità irrigue sovrabbondanti a livello comiziale).



(a)



(b)

Figura 20. Distribuzione ed adacquamento in un comizio in due giorni successivi a), in assenza di pozzi aziendali; b) in presenza di pozzi aziendali.

Nei comizi in cui è disponibile, l'approvvigionamento da pozzi aziendali può integrare la disponibilità dalle altre fonti o costituire la fonte primaria, nel caso queste ultime siano assenti. La verifica dell'opportunità di operare il prelievo in un generico giorno t avviene dopo che è stata erogata la portata proveniente dalle altre fonti ed interessa tutte le celle con l'esclusione di quelle irrigabili nel giorno corrente (Figura 20a) e di quelle che potranno essere irrigate nei giorni immediatamente seguenti (Figura 20b). Queste ultime vengono valutate sulla base del seguente criterio (criterio 2):

- si calcola dapprima il numero di giorni medio in cui il fabbisogno colturale nelle N celle irrigue del comizio è garantito dalla disponibilità idrica dei suoli al tasso di traspirazione corrente:

$$(3.8) \quad \bar{G}_t = \frac{\sum_{i=1}^N V_{i,t} - (TAW_{i,t} - RAW_{i,t})}{\sum_{i=1}^N T_{i,t}}$$

- si determina quindi un numero di celle corrispondente, moltiplicando \bar{G}_t per il numero giornaliero di celle mediamente irrigabili nel comizio nei quarantacinque giorni di punta della stagione irrigua (calcolato per ogni anno di simulazione a partire dalle serie di portate derivate).

Le celle rimanenti sono candidate all'intervento irriguo da pozzi aziendali, che viene effettivamente erogato se, a livello di singola cella, risulta verificata la condizione espressa dall'Equazione (3.5).

3.2 Implementazione del modello di simulazione

Il modello di simulazione, illustrato nel paragrafo precedente, richiede i seguenti dati territoriali:

- carta di uso del suolo e parametri colturali;
- carta pedologica e parametri idraulici dei profili di riferimento;
- descrizione del sistema irriguo (mappatura dei comizi irrigui e, per ogni comizio: dotazioni irrigue relative alle diverse fonti, efficienza di adduzione/distribuzione, efficienza del metodo irriguo adottato);
- serie giornaliere di dati agrometeorologici (pioggia, temperatura minima e massima, umidità relativa minima e massima, radiazione solare globale, velocità media del vento) relativi ad una o più stazioni;
- serie giornaliere di portate derivate dai corsi d'acqua superficiali e di portate rese disponibili da colli e fontanili;
- portate in concessione e portate massime estraibili dalle pompe per i pozzi consortili.

Partendo dai dati raccolti, descritti nel capitolo 2, in questo paragrafo si illustrano le elaborazioni condotte per l'applicazione del modello all'area di studio. Le simulazioni sono state dapprima condotte per gli anni 2001-2003, utilizzando le misure disponibili delle grandezze meteorologiche e delle portate irrigue, ai fini di verificare le prestazioni del modello e fornire le serie dei valori di ricarica netta della falda necessarie per la calibrazione del modello di simulazione di flusso nell'acquifero. Ulteriori simulazioni sono state successivamente condotte per due scenari che contemplano variazioni dell'efficienza del sistema irriguo.

3.2.1 *Uso del suolo di riferimento*

Tra le fonti di dati disponibili (Paragrafo 2.2), la carta SIARL 2004 rappresenta la fonte spazializzata di maggiore dettaglio, i cui dati sono stati elaborati, congiuntamente a quelli derivati dalla fonte ISTAT 2000, per la creazione di una carta di uso del suolo che fosse di riferimento per il periodo di simulazione 2001 - 2003.

La carta SIARL è stata riclassificata in relazione a “classi di riferimento”, ovvero le classi di uso del suolo che risultano maggiormente diffuse nel territorio di pianura lombardo, secondo la fonte ISTAT 2000, già definite in Gandolfi *et al.* (2004) e Relazione finale, I fase (2006): mais da granella, mais da insilato, cereali autunno-vernini, prati avvicendati, prati permanenti, soia, riso, set-aside, pomodoro, barbabietola, pioppi, arboricoltura da frutto e vite. Pertanto, è stato necessario definire la corrispondenza tra le classi della carta SIARL e le classi di riferimento; a questo scopo, sono stati considerati i dati catastali delle dichiarazioni PAC per gli anni 2004 e 2005, che presentano una maggior diversificazione delle classi di uso del suolo rispetto a quella restituita dalla carta SIARL: per esempio, la classe “mais” è distinta in “silomais e mais ceroso”, “mais da granella” e “mais da foraggio”.

Le parcelle catastali con uso del suolo agricolo (ovvero, eccettuati gli usi “bosco misto”, “altra superficie non utilizzata (Terreni abbandonati, Attività ricreative)”, “tare” e “fabbricati”) cui sono riferiti i dati PAC utilizzati per l’elaborazione della carta di uso del suolo di riferimento, coprono una superficie di 138.870 ha nella Provincia di Cremona e di 16.663 ha nella parte della Provincia di Mantova ricadente nell’area di studio, pari, rispettivamente, al 90% e al 70% della superficie ad uso agricolo (SAU) visualizzata nella carta SIARL (ovvero eccettuati gli usi “aree idriche”, “aree sterili”, “aree urbanizzate”, “boschi”, “tare e incolti” e “vegetazione naturale”). Pertanto, complessivamente, la carta SIARL relativa all’area di studio è stata elaborata a partire da dati catastali riferiti ad una superficie pari all’87% della SAU visualizzata, quindi sufficientemente estesa per ritenere significativo il confronto tra i dati della carta SIARL ed i dati ISTAT.

Nella Tabella 8 e nella Tabella 9 è descritta la corrispondenza tra le classi di riferimento e le classi della carta SIARL. Tale corrispondenza è stata assegnata secondo un criterio di analogia agronomica, quindi è stata verificata attraverso l’analisi delle superfici corrispondenti, relative alle diverse fonti, in alcuni casi evidente (per esempio, la classe SIARL “mais” corrisponde alla somma delle classi di riferimento “mais da granella” e “mais da insilato”).

Per tutte le classi di riferimento, la corrispondenza è stata verificata determinandone la relazione con le classi delle dichiarazioni PAC; le superfici delle classi PAC, opportunamente aggregate, sono state confrontate con le superfici delle classi SIARL corrispondenti. Come si osserva dalle tabelle, le classi PAC aggregate e le classi SIARL mantengono circa la medesima percentuale rispetto alla SAU complessiva (l’accordo è migliore per il territorio della Provincia di Cremona); pertanto si è ritenuta corretta la corrispondenza assegnata tra classe di riferimento e classe SIARL.

La classe di riferimento ‘Cereali AV – Mais da insilato’ non ha trovato alcuna corrispondenza né con i dati PAC, né con le classi SIARL; infatti, il database PAC non riporta gli usi del suolo con colture avvicendate.

Attraverso il confronto con i dati PAC, è stato possibile definire l’uso del suolo prevalente (le classi sottolineate in tabella) tra quelli corrispondenti alle classi SIARL. Questo fatto è importante, nel caso di classi tra loro molto diverse relativamente alla parametrizzazione delle colture, al fine di assegnare correttamente la corrispondenza tra le classi SIARL e le classi di riferimento (per esempio, la classe SIARL ‘Boschi e colture arboree’ corrisponde alla classe di riferimento ‘Pioppi’).

Questa analisi per l'assegnazione e la verifica della corrispondenza tra classi di riferimento e classi SIARL è stata preliminare al confronto tra i dati ISTAT 2000 ed i dati derivati dalla carta SIARL 2004. In particolare, consente di valutare la significatività stessa del confronto.

Tabella 8. *Corrispondenza tra: Classi PAC – Classi carta SIARL – Classi di riferimento. I dati percentuali sono riferiti alla Provincia di Cremona.*

CLASSI di RIFERIMENTO	RAGGRUPPAMENTO CLASSI PAC (% SAU)	CLASSI carta SIARL (livello prov.) (% SAU)
MAIS da GRANELLA	MAIS da GRANELLA (49.5%) MAIS DOLCE (0.1%)	MAIS (60.4%)
MAIS da INSILATO	SILOMAIS e MAIS CEROSO (11.0%) MAIS da FORAGGIO (0.1%)	
	TOT. 60.7%	
CEREALI AV – MAIS da INSILATO	-	-
CEREALI AV	GRANO (FRUMENTO) TENERO (5.5%) GRANO (FRUMENTO) DURO (0.4%) FRUMENTO SEGALATO (0.0%) ORZO (2.3%) AVENA (0.1%) SEGALE (0.0%) ALTRI CEREALI (0.0%)	ALTRI CEREALI (8.6%)
	TOT. 8.4%	
PRATI AVVICENDATI	PRATO (9.1%) ERBA MEDICA (4.8%)	FORAGGERE (14.2%)
PRATI PERMANENTI	PRATO POLIFITA da VICENDA (0.1%) PRATO-PASCOLO (0.0%) ERBAIO di GRAMINACEE (0.2%) ERBAIO di LEGUMINOSE (0.0%) ERBAIO MISTO (0.1%) ALTRE FORAGGERE (0.2%)	
	TOT. 14.6%	
SOIA	SOIA da GRANELLA (2.7%)	PIANTE INDUSTRIALI e LEGUMI SECCHI (3.3%)
SET-A-SIDE	RIPOSO (5.2%)	TERRENI a RIPOSO (6.2%)
POMODORO	POMODORO (1.9%)	COLTIV. ORTICOLE (2.5%)
BARBABIETOLA	BARBABIETOLA da ZUCCHERO (1.1%) BARBABIETOLA da SEME (0.0%) BARBABIET. da COSTE da SEME (0.0%) BARBABIET. da FORAGGIO da SEME (0.0%)	BARBABIETOLA (1.0%)
	TOT. 1.1%	
PIOPPI	PIOPPETO (0.9%) PIANTE ARBOREE da LEGNO (0.7%) ALTRE COLTIVAZIONI LEGN. AGRARIE (0.2%) ALTRI ARBORETI da LEGNO (0.2%)	BOSCHI e COLTURE ARBOREE (2.8%)
VITE	VITE (0.1%)	
	TOT. 2.1%	

Tabella 9. Corrispondenza tra: Classi PAC – Classi carta SIARL – Classi di riferimento. I dati percentuali sono riferiti alla Provincia di Mantova (inclusa nell'area di studio).

CLASSI di RIFERIMENTO	RAGGRUPPAMENTO CLASSI PAC (% SAU)	CLASSI carta SIARL (livello prov.) (% SAU)
MAIS da GRANELLA	MAIS da GRANELLA (41.3%) MAIS DOLCE (0%)	MAIS (37.6%)
MAIS da INSILATO	SILOMAIS e MAIS CEROSO (1.5%) MAIS da FORAGGIO (0.0%)	
	TOT. 42.9%	
CEREALI AV – MAIS da INSILATO	-	-
CEREALI AV	GRANO (FRUMENTO) TENERO (14.6%) GRANO (FRUMENTO) DURO (0.1%) FRUMENTO SEGALATO (0%) ORZO (2.3%) AVENA (0.0%) SEGALE (0%) ALTRI CEREALI (0%)	ALTRI CEREALI (15.2%)
	TOT. 17.0%	
PRATI AVVICENDATI	PRATO (1.3%) ERBA MEDICA (9.6%)	FORAGGERE (10.7%)
PRATI PERMANENTI	PRATO POLIFITA da VICENDA (0%) PRATO-PASCOLO (0%) ERBAIO di GRAMINACEE (0.2%) ERBAIO di LEGUMINOSE (0%) ERBAIO MISTO (0.0%) ALTRE FORAGGERE (0.0%)	
	TOT. 11.2%	
SOIA	SOIA da GRANELLA (5.8%)	PIANTE INDUSTRIALI e LEGUMI SECCHI (5.7%)
SET-A-SIDE	RIPOSO (2.8%)	TERRENI a RIPOSO (2.8%)
POMODORO	POMODORO (5.0%)	COLTIV. ORTICOLE (8.0%)
BARBABIETOLA	BARBABIETOLA da ZUCCHERO (6.9%) BARBABIETOLA da SEME (0%) BARBABIET. da COSTE da SEME (0%) BARBABIET. da FORAGGIO da SEME (0%)	BARBABIETOLA (5.8%)
	TOT. 6.9%	
PIOPPI	PIOPPETO (0.1%) PIANTE ARBOREE da LEGNO (1.4%) ALTRE COLTIVAZIONI LEGN. AGRARIE (0.0%) ALTRI ARBORETI da LEGNO (0.1%)	BOSCHI e COLTURE ARBOREE (11.3%)
VITE	VITE (0.9%)	
	TOT. 2.5%	

Per le due diverse fonti (ISTAT 2000 e SIARL 2004), sono state confrontate le superfici relative agli usi del suolo corrispondenti. I risultati sono riportati nella Tabella 10 e nella Tabella 11. Date le differenze nel periodo di osservazione e le diverse caratteristiche delle due fonti, le superfici per la provincia di Cremona appaiono coerenti, con valori che sono pressoché invariati per le classi più diffuse, fatta eccezione per il dato della classe ‘Altri cereali’, che è circa il triplo in SIARL rispetto al corrispondente dato ISTAT (riferito peraltro ai cereali autunno-vernini non avvicendati); in questo caso, la differenza può essere imputata alla mancanza di dati SIARL relativi alle colture in avvicendamento. Le superfici della provincia di Mantova (incluse nell'area di studio) sono invece molto diverse secondo le due fonti; questo fatto può essere dovuto anche alla minore copertura data dalle

parcelle catastali, quindi alla minore affidabilità della carta SIARL. Comunque, l'accordo tra i dati ISTAT e quelli della carta SIARL risulta buono su gran parte dell'estensione dell'area di studio ed in particolare nel territorio cremonese.

Tabella 10. Confronto tra dati ISTAT2000 e carta SIARL2004 per le classi di riferimento. Superfici e percentuali sono riferiti alla Provincia di Cremona.

CLASSI ISTAT 2000 (%SAU)		CLASSI carta SIARL 2004 (% SAU)	
SAU TOT. 139771 ha		SAU TOT. 154887 ha	
MAIS da GRANELLA	80219ha (57.4%)	MAIS	93490 ha (60.4%)
MAIS da INSILATO			
CEREALI AV – MAIS da INSILATO	-		-
CEREALI AV	4668 ha (3.3%)	ALTRI CEREALI	13252 ha (8.6%)
PRATI AVVICENDATI	21585 ha (15.4%)	FORAGGERE	22071 ha (14.2%)
PRATI PERMANENTI			
SOIA	5780 ha (4.1%)	PIANTE INDUSTRIALI e LEGUMI SECCHI	5167 ha (3.3%)
SET-A-SIDE	8939 ha (6.4%)	TERRENI a RIPOSO	9560 ha (6.2%)
POMODORO	1818 ha (1.3%)	COLTIV. ORTICOLE	3866 ha (2.5%)
BARBABIETOLA	3491 ha (2.5%)	BARBABIETOLA	1600 ha (1.0%)
PIOPPI	4845 ha (3.5%)	BOSCHI e COLTURE ARBOREE	4268 ha (2.8%)
VITE			

Tabella 11. Confronto tra dati ISTAT2000 e carta SIARL2004 per le classi di riferimento. Superfici e percentuali sono riferiti alla Provincia di Mantova (inclusa nell'area di studio).

CLASSI ISTAT 2000 (%SAU)		CLASSI carta SIARL 2004 (% SAU)	
SAU TOT. 34288 ha		SAU TOT. 23610 ha	
MAIS da GRANELLA	10152 ha (29.6%)	MAIS	8874 ha (37.6%)
MAIS da INSILATO			
CEREALI AV – MAIS da INSILATO	-		-
CEREALI AV	3544 ha (10.3%)	ALTRI CEREALI	3590 ha (15.2%)
PRATI AVVICENDATI	4646 ha (13.6%)	FORAGGERE	2517 ha (10.7%)
PRATI PERMANENTI			
SOIA	3424 ha (10.0%)	PIANTE INDUSTRIALI e LEGUMI SECCHI	1349 ha (5.7%)
SET-A-SIDE	1129 ha (3.3%)	TERRENI a RIPOSO	669 ha (2.8%)
POMODORO	990 ha (2.9%)	COLTIV. ORTICOLE	1894 ha (8.0%)
BARBABIETOLA	2165 ha (6.3%)	BARBABIETOLA	1368 ha (5.8%)
PIOPPI	4817 ha (14.1%)	BOSCHI e COLTURE ARBOREE	2676 ha (11.3%)

A seguito del confronto con i dati ISTAT (peraltro effettuato sulle classi maggiormente diffuse sul territorio in esame), la carta SIARL è stata ritenuta rappresentativa della distribuzione degli usi del suolo per il quinquennio 2000-2004. La carta di uso del suolo di riferimento è stata determinata considerando la corrispondenza tra le classi SIARL e quelle di riferimento definita nella Tabella 8 e nella Tabella 9. La classe ‘Altre coltivazioni’ include le classi SIARL ‘Altre coltivazioni agrarie’, ‘Coltivazioni florovivaistiche’ e ‘Frutticole’ (trascurabili in termini di percentuale della SAU sull’intera area di studio, pari all’ 1.1%).

Dato che la carta SIARL prevede una sola classe "mais" che contiene sia “mais da granella” che “mais da insilato” (o “mais 300”), si è ritenuto opportuno integrare l’informazione spaziale fornita dalla carta SIARL scorporando le due classi (per una descrizione della procedura adottata si veda Gandolfi *et al.*, 2007).

In media la classe “mais da insilato” risulta coprire il 17.8% del mais totale, il quale copre il 47.5% del dominio di simulazione. In Figura 21 è presentata la carta risultante da tutte le elaborazioni, in seguito utilizzata dal modello di simulazione.

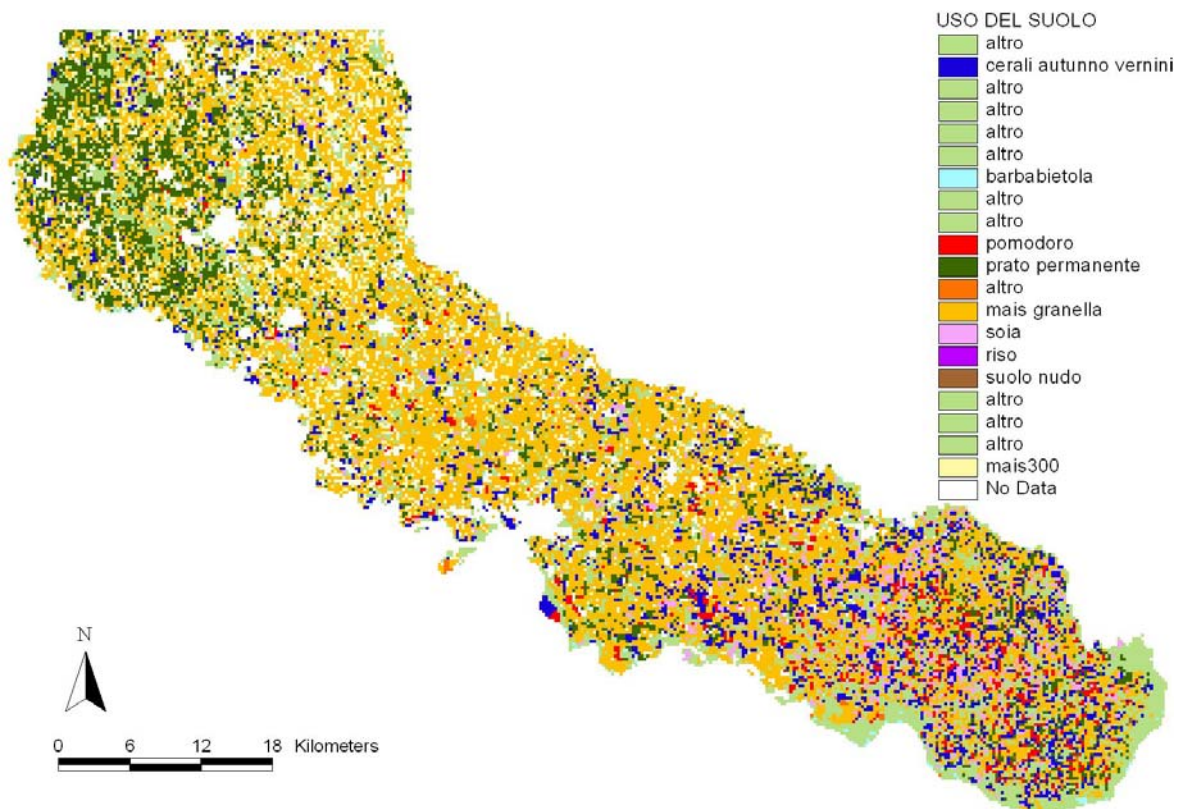


Figura 21. Carta di uso del suolo di riferimento, dopo la rasterizzazione.

3.2.2 Parametri colturali

Per ogni classe individuata nella carta di uso del suolo di riferimento è stata implementata, a partire dai dati di letteratura e da quelli raccolti in passate indagini di campo, la banca dati dei parametri colturali. Per ogni classe di uso del suolo i parametri in essa specificati sono:

- parametri colturali per l’implementazione della metodologia FAO-56 (FAO – Paper 56, 1998): coefficiente colturale basale (K_{cb}); altezza della coltura (h_c); profondità

dello strato radicato (S_r); frazione p del volume totale contenibile nel suolo che è immediatamente disponibile per la pianta.

- indice di area fogliare LAI , utilizzato nella stima dell'intercettazione secondo il metodo di Von Hoyningen-Hune (1983) e Braden (1985).
- classe di uso del suolo per l'implementazione del metodo CN (USDA-SCS, 1972; 1986).

I parametri del primo gruppo e del secondo gruppo hanno valori variabili nel tempo, che sono stati definiti a partire da dati di letteratura alcuni dei quali sito-specifici. In particolare: Autorità di Bacino del Fiume Po – Att. 4.16 (1998); Baldoni e Giardini (1982); Borgarello *et al.* (1993); Huygen *et al.* (1997); FAO –Paper 56 (1998); USDA-SCS (1972; 1986). Gli andamenti dei parametri in ogni anno di simulazione sono stati determinati tenendo conto della durata delle diverse fasi fenologiche, calcolata con il corrispondente modulo (descritto in dettaglio in Appendice 9.2). In Figura 22, a titolo di esempio, vengono riportati gli andamenti temporali di K_{cb} , h_c , S_r e LAI per le colture dominanti nell'area di studio per un anno medio dal punto di vista climatico. Maggiori dettagli sulla costruzione delle curve possono essere trovati in Gandolfi *et al.* (2006a).

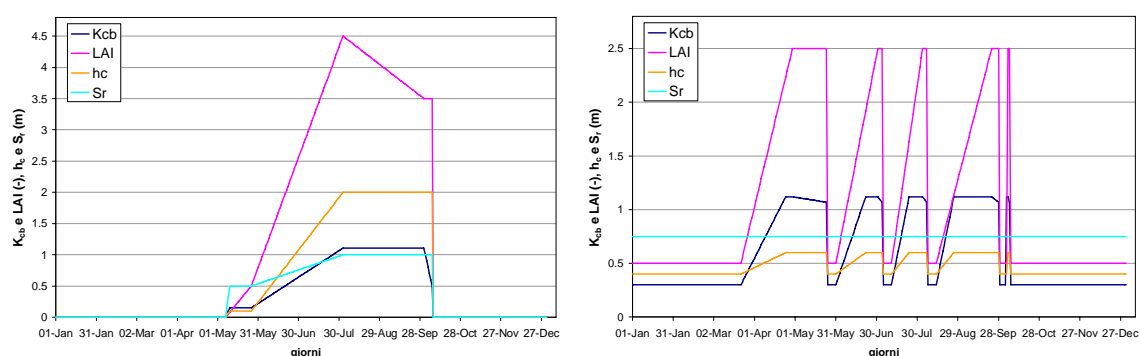


Figura 22. Parametri culturali di mais e prato permanente nell'anno medio.

La curva di variazione temporale di p viene ricavata a partire dai valori tabulati in FAO – Paper 56 (1998), corrispondenti a $ET_c \approx 5$ mm, in funzione del tasso di evapotraspirazione effettivo. I valori tabulati per le principali colture in Lombardia sono riportati in Tabella 12.

Tabella 12. Frazione p , per le principali classi irrigue di uso del suolo (Fonte: FAO –Paper 56, 1998).

Classe irrigua	P
Mais da granella	0.55
Riso	0.20
Cereali AV - Mais da insilato	0.55
Mais da insilato	0.50
Soia	0.5
Prati avvicendati	0.55
Prati permanenti	0.55
Pomodoro	0.40
Vite	0.45

I valori di riferimento del parametro CN, a partire dai quali è possibile implementare il metodo, sono tabulati in USDA-SCS (1986); in Tabella 13, sono riportate le classi di uso del suolo considerate in USDA-SCS (1986) che si ritengono significative per l'area di studio.

Per implementare il metodo CN, è necessario classificare gli usi del suolo individuati nell'area di indagine, in base alla suddivisione riportata in Tabella 13. In Tabella 14 è descritta la corrispondenza tra le classi di uso del suolo riportate nel Paragrafo 2.2, e quelle di Tabella 13, definita considerando le specifiche riportate in Fassò (1992), per le applicazioni del metodo CN in ambito italiano. In particolare, l'associazione "Cereali AV - Mais da insilato"- "Sarchiate" è stata fatta in riferimento alla coltura irrigua in avvicendamento ai cereali autunno-vernini (coltura non irrigua).

Tabella 13. Parametro CN, per condizioni di umidità medie (Fonte: USDA-SCS, 1986).

Classe CN	Uso del suolo	Lavorazione	Cond.Idrologica	A	B	C	D
1	Maggese	Suolo nudo	-	77	86	91	94
2	Sarchiate	Rettilinea	Cattiva	72	81	88	91
			Buona	67	78	85	89
3	Cereale minori	Rettilinea	Cattiva	65	76	84	88
			Buona	63	75	83	87
4	Leguminose foraggere prati avvicendati	Rettilinea	Cattiva	66	77	85	89
			Buona	58	72	81	85
5	Prati permanenti	-	-	30	58	71	78
6	Frutteti	-	Cattiva	57	73	82	86
			Discreta	43	65	76	82
			Buona	32	58	72	79
7	Riso	-	Buona	99	99	99	99

Tabella 14. Corrispondenza tra le principali classi irrigue nell'area di studio, e le classi di uso del suolo in USDA-SCS (1986).

Classe irrigua	Classe CN
Mais da granella	Sarchiate
Riso	Riso
Cereali AV - Mais da insilato	Sarchiate
Mais da insilato	Sarchiate
Soia	Sarchiate
Prati avvicendati	Leguminose foraggere - Prati avvicendati
Prati permanenti	Prati permanenti
Pomodoro	Sarchiate
Vite	Frutteti

3.2.3 Spessori e parametri idraulici degli strati della zona di radicazione

Per l'applicazione del modello, per ogni cella in cui è suddiviso il dominio e per ognuno dei due strati in cui è suddivisa la zona di radicazione (i.e. evaporativo e traspirativo), sono necessari valori di:

- contenuto di umidità a saturazione, θ_{SAT} ;
- contenuto di umidità alla capacità di campo, θ_{fc} ;
- contenuto di umidità al punto di appassimento, θ_{wp} ;
- contenuto di umidità residuo, θ_r ;
- conducibilità a saturazione, K_s ;
- fattore n dell'equazione di Brooks e Corey (1964);
- per il solo strato evaporativo, frazione di acqua facilmente evaporabile, REW .

Per la stima di questi parametri si sono utilizzati metodi indiretti (basati su funzioni dette di Pedo-Trasferimento o *PTF*), che permettono di ricavarne il valore a partire dalle caratteristiche fisico-chimiche (essenzialmente contenuto di carbonio organico e percentuale di sabbia, limo, argilla) fornite, per i profili di riferimento delle varie Unità Tassonomiche (UT), dai data-base associati alle Carte Pedologiche redatte dal Servizio Suolo dell'ERSAF.

Per gli orizzonti di ogni profilo contenuto nella banca dati (ovvero per ogni strato di prefissata profondità) le *PTFs* sono state applicate per la stima della densità apparente (BD), della porosità (ϕ), del contenuto d'acqua alla capacità di campo (θ_{FC}) e al punto di appassimento (θ_{WP}), dell'umidità residua (θ_r), della conducibilità a saturazione (K_s), del fattore di forma dell'equazione di Brooks e Corey (n) e della frazione di acqua facilmente evaporabile (REW). In particolare:

- BD densità apparente (g/cm^3), da Jeffrey (1970), stimata come segue:

$$(3.9) \quad BD = 1.482 - 0.6786 \log_{10}(OM)$$

dove $OM = 1.7 OC$, con OM sostanza organica e OC carbonio organico;

- ϕ porosità ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), da Rawls and Brakensiek (1989), stimata come segue:

$$(3.10) \quad \phi = \frac{(2.65 - BD)}{2.65}$$

- θ_{FC} e θ_{WP} , contenuto d'acqua rispettivamente alla capacità di campo e al punto di appassimento ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), stimati tramite l'equazione di van Genuchten (1980), partendo dai valori del potenziale nel suolo h in tali punti critici. In particolare si sono utilizzati per la capacità di campo di suoli grossolani, medi e fini i seguenti valori di potenziale: -200, -100 e -100 cm; per il punto di appassimento: -15000, -10000, -5000.

$$(3.11) \quad \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$$

dove θ_r , α , n e m sono stimati attraverso le equazioni proposte da Rawls and Brakensiek (1989) e riportate in Tabella 15. In particolare $\alpha = h_b^{-1}$; $n = \lambda + 1$ e $m = \lambda / (\lambda + 1)$.

Tabella 15. PTFs di Rawls e Brakensiek (1989) per la stima dei parametri della curva di ritenzione di van Genuchten.

h_b — Brooks-Corey bubbling pressure, cm	$h_b = \exp[5.3396738 + 0.1845038(C) - 2.48394546(\phi) - 0.00213853(C)^2 - 0.04356349(S)(\phi) - 0.61745089(C)(\phi) + 0.00143598(S)^2(\phi^2) - 0.00855375(C^2)(\phi^2) - 0.00001282(S^2)(C) + 0.00895359(C^2)(\phi) - 0.00072472(S^2)(\phi) + 0.0000054(C^2)(S) + 0.50028060(\phi^2)(C)]$
λ — Brooks-Corey pore-size distribution index	$\lambda = \exp[-0.7842831 + 0.0177544(S) - 1.062498(\phi) - 0.00005304(S^2) - 0.00273493(C^2) + 1.11134946(\phi^2) - 0.03088295(S)(\phi) + 0.00026587(S^2)(\phi^2) - 0.00610522(C^2)(\phi^2) - 0.00000235(S^2)(C) + 0.00798746(C^2)(\phi) - 0.00674491(\phi^2)(C)]$
θ_r — Brooks-Corey residual water content (volume fraction)	$\theta_r = -0.0182482 + 0.00087269(S) + 0.00513488(C) + 0.02939286(\phi) - 0.00015395(C^2) - 0.0010827(S)(\phi) - 0.00018233(C^2)(\phi^2) + 0.00030703(C^2)(\phi) - 0.0023584(\phi^2)(C)$

C = percent clay ($5 < \% < 60$)
 S = percent sand ($5 < \% < 70$)
 ϕ = porosity (volume fraction)
Source: Reproduced from Ref. 80 by permission of ASCE.

- K_s , conducibilità a saturazione (cm/h), da Rawls and Brakensiek (1989):

$$(3.12) \quad K_s = \exp[-8.9684700 + 19.5234800(\phi) - 0.02821200(C) + 0.00018107(S^2) - 0.00941250(C^2) - 8.39521500(\phi^2) + 0.07771800(S)(\phi) - 0.00298000(S^2)(\phi^2) + 0.01949200(C^2)(\phi^2) + 0.00001730(S^2)(C) + 0.02733000(C^2)(\phi) + 0.00143400(S^2)(\phi) - 0.00000350(C^2)(S)]$$

dove C , S , e ϕ sono riferiti alle grandezze riportate in Tabella 15.

- n , fattore di forma dell'equazione di conducibilità insatura di Brooks e Corey (1964), ricavato da λ riportato in Tabella 15 tramite la relazione $n = 3 + 2/\lambda$.
- REW , frazione di acqua immediatamente evaporabile (mm), assunto pari al valore indicato da FAO – Paper 56 (1998) – Tabella 19 e di seguito riportato in Tabella 16. I valori mostrati, riferiti ad uno spessore traspirativo di 10 cm, vengono adattati proporzionalmente allo spessore di 15 cm utilizzato nella simulazione per lo strato evaporativo.

Tabella 16. Valori di REW (mm) secondo la tipologia di suolo (da FAO - Paper 56 (1998) - Tabella 19).

Tipo di terreno	Valore di REW
S	4.5
SF	6
FS	8
F	9
FSA	9
L	9.5
FL	9.5
AS	9.5
FA	9.5
FLA	9.5
A	10
AL	10

I valori ottenuti per i diversi parametri sono stati infine corretti considerando la percentuale di scheletro presente, utilizzando la procedura proposta da Rawls e Brakensiek (1985).

Le *PTFs* adottate sono state selezionate confrontando le stesse con quelle proposte e verificate nel corso del Progetto SINA (Sistema Informativo Nazionale Ambientale)- Carta Pedologica in Aree a Rischio Ambientale – sui suoli della banca dati della Pianura Padano-Veneta (si vedano, ad esempio, Ungaro e Calzolari, 2000; Calzolari *et al.*, 2000). Le grandezze ottenute per i vari orizzonti sono state poi verificate con i valori riportati in letteratura (ad esempio: FAO – Paper 33, 1979; Rawls e Brakensiek, 1982; Rawls *et al.*, 1983; Carsel e Parrish, 1988) per le varie tipologie di suolo.

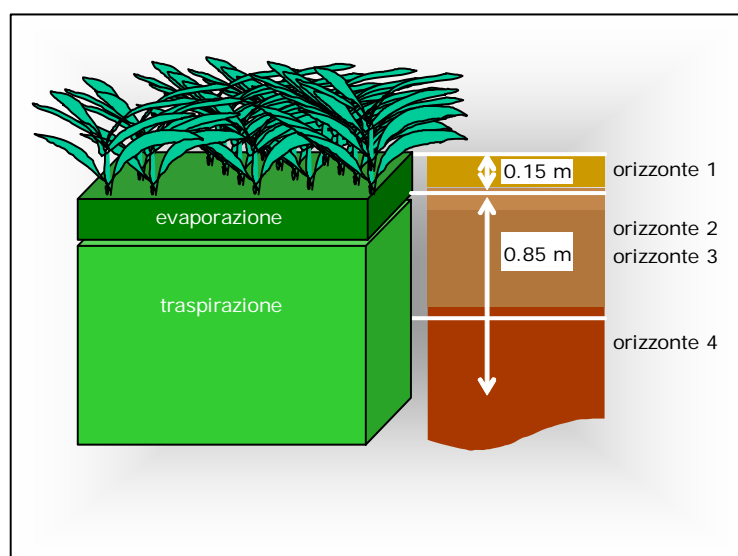


Figura 23. Corrispondenza tra gli strati evaporativo e traspirativo del modello di bilancio e gli orizzonti di un profilo pedologico.

A partire dai valori dei parametri stimati per i singoli orizzonti (o strati a profondità fissata) dei profili di riferimento, si è poi passati, per ogni profilo, ai valori per i due strati in cui la zona insatura viene suddivisa. Come illustrato in Figura 23, più orizzonti (o strati) possono

ricadere nello spessore degli strati evaporativo e traspirativo; quindi, i parametri idraulici di cui il modello necessita sono calcolati come medie aritmetiche o armoniche (nel solo caso di K_s) dei valori dei parametri calcolati per i diversi orizzonti (o strati a profondità fissata) ricadenti rispettivamente negli strati evaporativo e traspirativo.

Per quanto riguarda lo spessore dei due strati in cui è suddivisa la zona di radicazione, lo spessore Z_e dello strato evaporativo è fissato di norma a 0.15 cm, come indicato da FAO – Paper 56 (1998); lo spessore Z_t dello strato di traspirazione viene invece ricalcolato in ogni unità di volume, per ogni passo temporale, sulla base del valore assunto dal parametro S_r .

Tutti i parametri idraulici relativi allo strato evaporativo e traspirativo vengono inseriti nella tabella degli attributi relativa ai poligoni delle Unità Cartografiche (U.C.) della carta pedologica, accanto al “drenaggio” e al “gruppo idrologico”, necessari per l’applicazione del metodo CN. Tramite rasterizzazione della carta pedologica per ogni attributo sulla base della cella di discretizzazione adottata dal modello per le simulazioni si ottengono le matrici dei parametri necessarie per la simulazione (una per ogni attributo e per ogni strato).

3.2.4 Comizi irrigui

Il territorio dell’area di studio è stato suddiviso in comizi, coerentemente con la Carta Tecnica Regionale della Lombardia in scala 1:10.000 (CTR), e sono stati acquisiti una serie di dati relativi alle dotazioni ed alle pratiche irrigue per ciascun comizio. Va sottolineato come l’elevato dettaglio raggiunto nell’acquisizione dei dati è stato possibile grazie alla collaborazione degli enti irrigui operanti nella Provincia di Cremona. Fondamentale è risultata inoltre la sinergia con il progetto “*TwoLe-B*, un sistema per la pianificazione delle risorse idriche – Applicazione pilota al bacino dell’Adda”, finanziato dalla Fondazione CARIPO, di cui l’istituto di Idraulica Agraria è coordinatore.

Il territorio dell’area di studio risulta suddiviso in oltre 700 comizi irrigui, di superficie variabile tra circa 1 ha e 17.000 ha.

Ad ogni comizio, sono stati associati i seguenti attributi:

- *superficie del comizio* in ettari (ha);
- *comprensorio* in cui ricade il comizio;
- *dotazione nominale*, in l/s, ossia la portata teorica derivata in continuo dalla fonte al lordo delle perdite di adduzione e distribuzione;
- *fonti di alimentazione* del comizio, con relativa ripartizione della dotazione nominale:
 - derivazioni da corsi d’acqua superficiali (Adda, Serio, Oglio);
 - sollevamenti tramite impianto da corsi d’acqua (Adda, Po, Oglio);
 - fontanili;
 - pozzi irrigui consortili;
 - coli.
- *nome/i del/i canale/i alimentante/i*, nel caso in cui la fonte di alimentazione sia un corso d’acqua superficiale; quando questo non sia applicabile o nel caso di fonti differenti è sostituito da un nome descrittivo;
- *metodo irriguo prevalente*;
- *turno irriguo*;
- *perdite di adduzione/distribuzione*.

Gli attributi sono stati organizzati in una tabella associata allo strato informativo poligonale dei comizi irrigui. Non sempre è stato possibile completare la tabella con tutti gli attributi

per ogni comizio, in particolare in relazione alle perdite di adduzione/distribuzione ed all'entità delle fonti indirette e dei pozzi.

Per la definizione dei confini dei comizi irrigui e del riparto tra essi delle portate derivate dalle diverse fonti si sono prese le mosse dallo studio del "Catasto delle Acque Irrigue della Provincia di Cremona" (CAI) (Paragrafo 2.10.2).

Di seguito, è descritto brevemente il quadro delle informazioni raccolte presso i diversi Enti e delle elaborazioni svolte.

Comprensorio di Bonifica Cremasco

Il CIC ha effettuato una suddivisione digitale del comprensorio Cremasco in comizi irrigui coerente con la base CTR, per il "Progetto di fattibilità del Piano di riordino irriguo" del Comprensorio Cremasco, basandosi sul CAI. I risultati di questo lavoro e le informazioni esistenti sulle somministrazioni irrigue nel territorio hanno permesso, in collaborazione con il CIC, di completare la tabella degli attributi dei comizi irrigui per l'intero comprensorio di bonifica Cremasco ad eccezione di alcune aree prive di informazione (tra cui 15 km² circa tra i comuni di Castelleone, Madignano, Ripalta Arpina).

Comprensorio di Bonifica Naviglio Vacchelli

È disponibile una suddivisione del territorio del Comprensorio di Bonifica Naviglio Vacchelli in comizi irrigui, coerente con la base CTR, realizzata dal Consorzio omonimo sulla base del CAI. In collaborazione con il Consorzio di Bonifica Naviglio Vacchelli (CNV), il CNC ed il CIC, e sulla base delle informazioni esistenti circa le somministrazioni irrigue nel territorio, si è proceduto al completamento della tabella degli attributi dei comizi irrigui per l'intero comprensorio di bonifica Naviglio Vacchelli, ad eccezione di alcune aree prive di informazione (tra cui 20 km² circa tra i comuni di Pumenengo, Torre Pallavicina, Soncino, Casaletto di Sopra).

Comprensorio di Bonifica Dugali

È disponibile una suddivisione del territorio del Comprensorio di Bonifica Dugali in comizi irrigui, coerente con la base CTR, realizzata dal Consorzio omonimo in collaborazione con il CIC, sulla base del CAI. Con il supporto di CIC e sulla base delle informazioni esistenti circa le somministrazioni irrigue nel territorio, si è proceduto al completamento della tabella degli attributi dei comizi irrigui per l'intero territorio del comprensorio di bonifica Dugali.

Comprensorio di Bonifica Navarolo

È disponibile una suddivisione del territorio del Comprensorio di Bonifica Navarolo in comizi irrigui, coerente con la base CTR, realizzata dal Consorzio omonimo nell'ambito del progetto SIGRIA: in virtù delle diverse caratteristiche del sistema irriguo del comprensorio, i comizi irrigui individuati sono di estensione decisamente superiore a quella dei comizi presenti negli altri comprensori della Provincia di Cremona. In collaborazione con il progetto SIGRIA e sulla base delle informazioni esistenti circa le somministrazioni irrigue nel territorio, si è proceduto al completamento della tabella degli attributi dei comizi irrigui per l'intero territorio del comprensorio di bonifica Navarolo.

Nelle aree residuali, dove non è stato possibile raccogliere informazioni complete, si è provveduto a creare dei poligoni che andassero a completare lo stato informativo, nonché ad assegnare ai relativi attributi dei valori stimati, sulla base delle informazioni disponibili, sebbene spesso carenti. Dallo strato del dominio di simulazione e dallo strato completo dei comizi si sono individuate, per differenza, tutte le aree prive di informazioni. Da tale primo elaborato si è provveduto ad eliminare, utilizzando le informazioni contenute nella mappa

di uso del suolo, le aree urbanizzate di significative dimensioni (coerentemente alla dimensione della cella di discretizzazione) e tutte quelle classi che escludono un uso del suolo agricolo (urbanizzato, tare e incolti, aree sterili, ecc.)

A questo punto si è ottenuto uno strato che rappresenta le aree su cui sussiste una produzione agricola, ma non servite da alcun tipo di fonte; si è dunque ipotizzato che tali aree fossero irrigate attraverso pozzi aziendali, e/o, dove ragionevole, da acque di colto o provenienti da altre aree. La suddivisione di queste aree in comizi è stata effettuata secondo i seguenti criteri:

1. informazioni, anche parziali, comunque disponibili sui singoli territori;
2. presenza di confini naturali (corsi d'acqua o canali);
3. presenza di confini comprensoriali;
4. peculiarità del territorio (vicinanza ad un corso d'acqua, aree di golena, ecc.).

In questo modo sono stati individuati gli 11 comizi residuali.

Per quanto concerne l'attribuzione delle portate nominali ai comizi alimentati da colature (necessarie per la ripartizione della portata giornaliera delle macroaree a colto tra i comizi caratterizzati da tale fonte, si veda il Paragrafo 3.1.3), si è proceduto partendo dall'ipotesi che se sono presenti usi del suolo irrigui, si può dedurre che l'apporto irriguo disponibile sia di norma sufficiente a soddisfarne i fabbisogni. Si è quindi definita la portata nominale da attribuire al comizio sulla base della stima dei valori medi dei fabbisogni irrigui delle colture presenti.

Al fine di illustrare la complessità delle elaborazioni svolte, si riporta una breve descrizione di alcune analisi effettuate. Le verifiche effettuate hanno comportato le seguenti elaborazioni:

- definizione del bilancio idrico relativo alla gestione dei canali e delle rogge irrigue del CNV e del CNC. I risultati sono stati validati grazie ad alcune misure di portata effettuate dai Consorzi medesimi;
- determinazione del bilancio idrico relativo alla gestione dei canali e delle rogge irrigue del CIC. I risultati sono stati validati grazie ad alcune misure di portata effettuate dallo stesso Consorzio;
- definizione del volume idrico disponibile, in quote percentuali rispetto alle diverse fonti principali di alimentazione per ogni nodo del reticolo irriguo primario e secondario gestito dal CIC, dal CNV e dal CNC. Un esempio: al km 31.970 del Naviglio Grande Pallavicino, in corrispondenza del diramatore di Casalbuttano, se si deriva la massima portata in concessione tanto dall'Adda quanto dall'Oglio, al lordo delle perdite di adduzione risultano essere presenti 22.5 m³/s, di cui il 23.25 % proviene dalla presa sull'Oglio dello stesso Naviglio Grande, il 4.03 % dalla presa sull'Oglio del Cavo Calciana, il 13.47 % dalla presa sull'Oglio del Naviglio Nuovo, il 53.59 % dalla presa sull'Adda del Canale Vacchelli, il 5.66 % dai fontanili Isolabella, Vecchia Postale, delle Fontane, Fornace, Facina, Grumella e Bobbio;
- determinazione delle quote percentuali in ingresso a ciascun comizio irriguo individuato sul territorio rispetto alla portata nominale di ciascuna bocca delle rete irrigua del CIC, del CNV e del CNC. Un esempio: al km 31.970 del Naviglio Grande Pallavicino, in corrispondenza del diramatore di Casalbuttano, vi sono le bocche della roggia Cavetto, di portata nominale pari a 0.236 m³/s, e della roggia Cauzza Gabbanina, di portata nominale pari a 0.209 m³/s. Con le acque di tali rogge vengono bagnati 10 comizi irrigui (Cavetto, Cauzza Gabbanina, Cavetto + Utenza Morbasco, Cauzza Gabbanina + Morbasco, Polenga, Polenga + Utenza Morbasco, Utenza Morbasco, Zappa, Castelnuovo del Zappa + Zappa + Utenza Morbasco, Castelnuovo del Zappa + Utenza Morbasco), di cui si conoscono la dotazione nominale specifica, il metodo irriguo prevalente, il turno irriguo e le efficienze di adduzione ed

adacquamento. Rispetto al volume irriguo totale in ingresso ai 10 comizi, le acque delle rogge Cavetto e Cauzza Gabbanina incidono per il 40.2 %;

- determinazione delle quote percentuali in ingresso a ciascun comizio irriguo individuato sul territorio rispetto alle fonti principali di alimentazione. In Figura 24 è riassunta la ripartizione percentuale riferita ai 10 comizi sopraccitati;
- definizione della dotazione nominale specifica riferita all'intera superficie dei comprensori che interessano l'area di studio. Il contributo fontanilizio alimentante il reticolo irriguo cremonese, considerato per il calcolo di tale dotazione, è di circa 36 m³/s, valore risultato dalle elaborazioni effettuate a partire dal CAI. La dotazione nominale specifica dei territori dei comprensori di bonifica Cremasco, Naviglio Vacchelli e Dugali, riferita alla SAU complessiva (dato ricavato dalla carta SIARL 2004) è risultata essere circa 0.98 l/s ha, al netto delle colature.

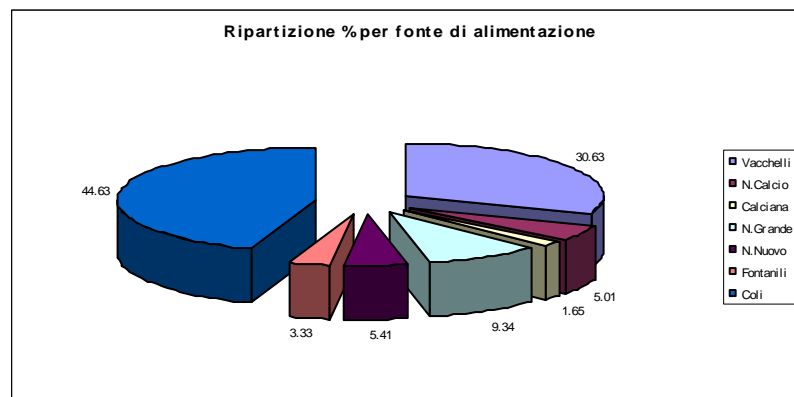


Figura 24. Ripartizione percentuale per fonte di alimentazione delle dotazioni nominali specifiche dei comizi irrigui in provincia di Cremona: Cavetto, Cauzza Gabbanina, Cavetto + Utenza Morbasco, Cauzza Gabbanina + Morbasco, Polenga, Polenga + Utenza Morbasco, Utenza Morbasco, Zappa, Castelnuovo del Zappa + Zappa + Utenza Morbasco, Castelnuovo del Zappa + Utenza Morbasco.

In Figura 25 è rappresentato un esempio di attribuzione della dotazione nominale specifica alla scala di dettaglio del comizio irriguo.

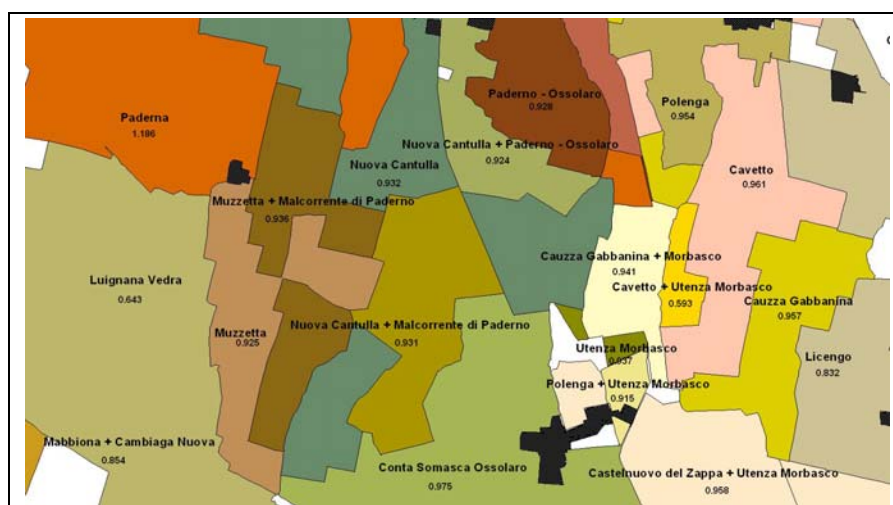


Figura 25. Dotazioni nominali specifiche di alcuni comizi irrigui in Provincia di Cremona.

Le piccole dimensioni di una significativa frazione di comizi hanno reso necessario procedere ad un loro accorpamento in sede di implementazione del modello ai fini di ottenere unità territoriali compatibili con la discretizzazione spaziale utilizzata (250x250 m²) e con portate di competenza continue coerenti con quelle necessarie per effettuare l'intervento irriguo in almeno una cella in ogni passo temporale. I criteri con i quali si è condotto l'accorpamento dei comizi sono i seguenti:

- i comizi accorpati devono avere dotazione minima non inferiore a 250 l/s;
- tra di essi ci devono essere similitudini nella ripartizione della dotazione rispetto alle fonti (i.e. alimentati dalle medesime fonti, secondo rapporti simili);
- devono appartenere al medesimo comprensorio;
- devono avere contiguità territoriale (preferenza per i comizi adiacenti).

I criteri che hanno guidato l'accorpamento sono stati osservati con puntualità quando possibile. In diversi casi sono state effettuate scelte che vanno in deroga ad uno o più di essi, a seconda del caso specifico e della quantità e completezza dell'informazione disponibile. In definitiva si è ridotto il numero di comizi, utilizzati nelle simulazioni, a 226.

Nella Figura 26, è rappresentata la distribuzione delle dotazioni nominali complessive (i.e. da derivazioni da corsi d'acqua superficiali, fontanili, pozzi consortili, colature e sollevamenti da corsi d'acqua) nel complesso dell'area di studio. Nei Paragrafi seguenti vengono invece dettagliati i contributi alle dotazioni complessive di ogni tipologia di fonte irrigua.

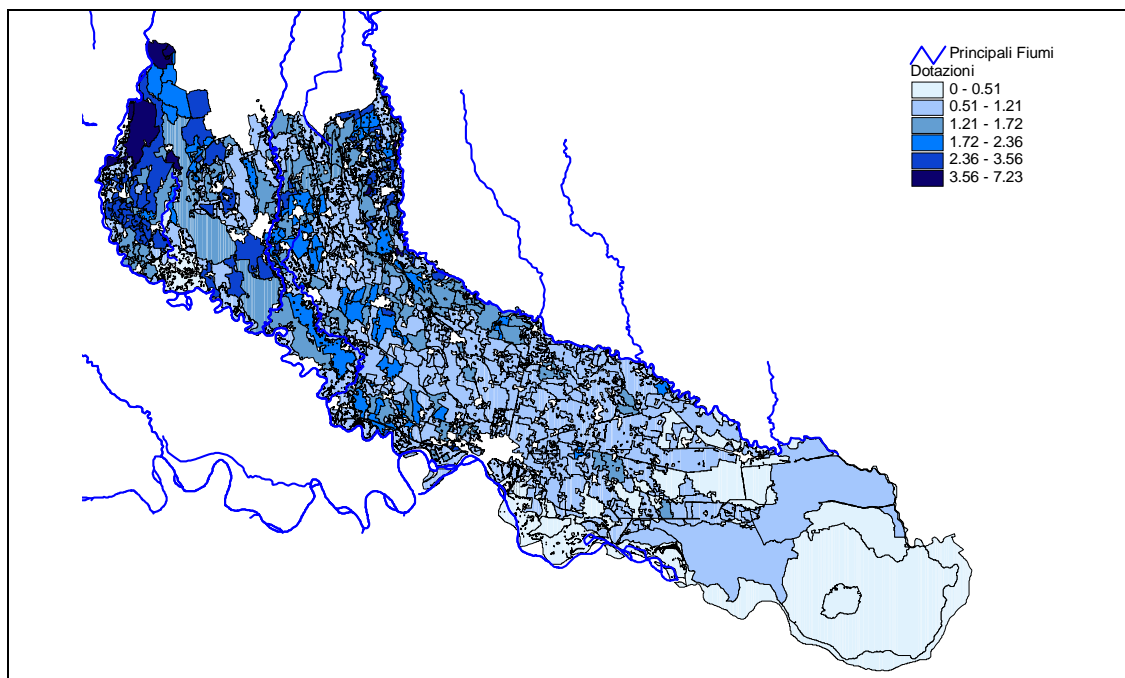


Figura 26. Dotazione nominale(l/s ha) dei comizi irrigui.

Derivazioni da corsi d'acqua

I dati raccolti, con opportune verifiche ed integrazioni, hanno consentito di ripartire tra i comizi in modo dettagliato le portate fornite dalle diverse derivazioni. In Figura 27, Figura 28 e Figura 29 sono riportati i comizi il cui approvvigionamento irriguo è interessato, con varia entità, da acque derivate per gravità rispettivamente da Adda, Oglio e Serio.

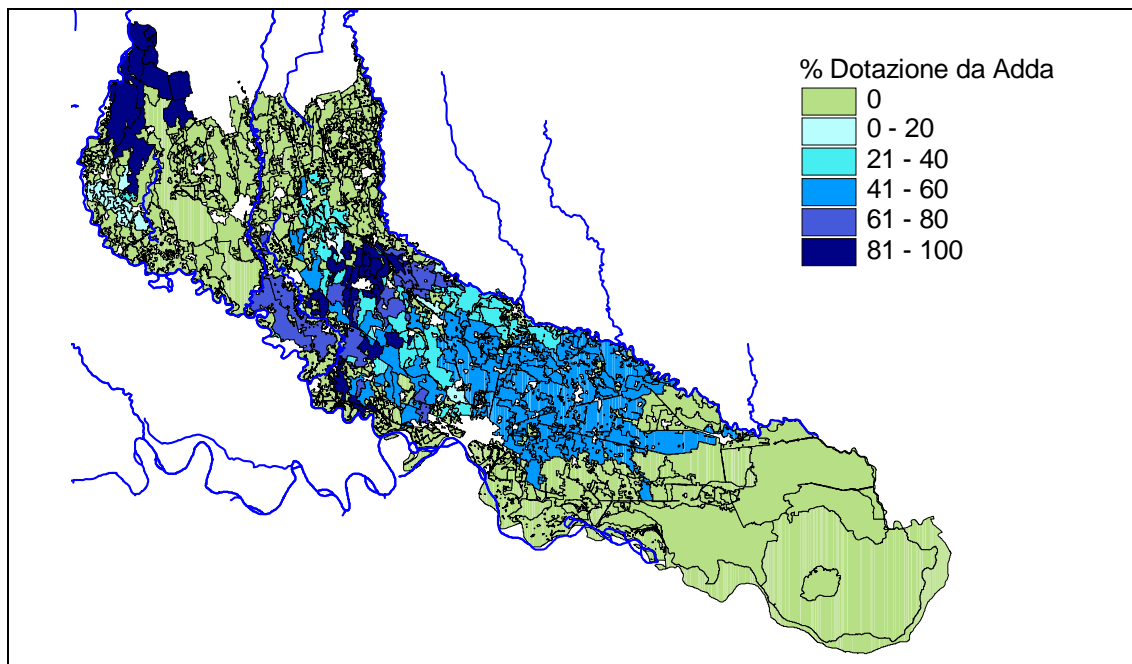


Figura 27. Percentuale della dotazione irrigua dei comizi proveniente da derivazioni dal f. Adda.

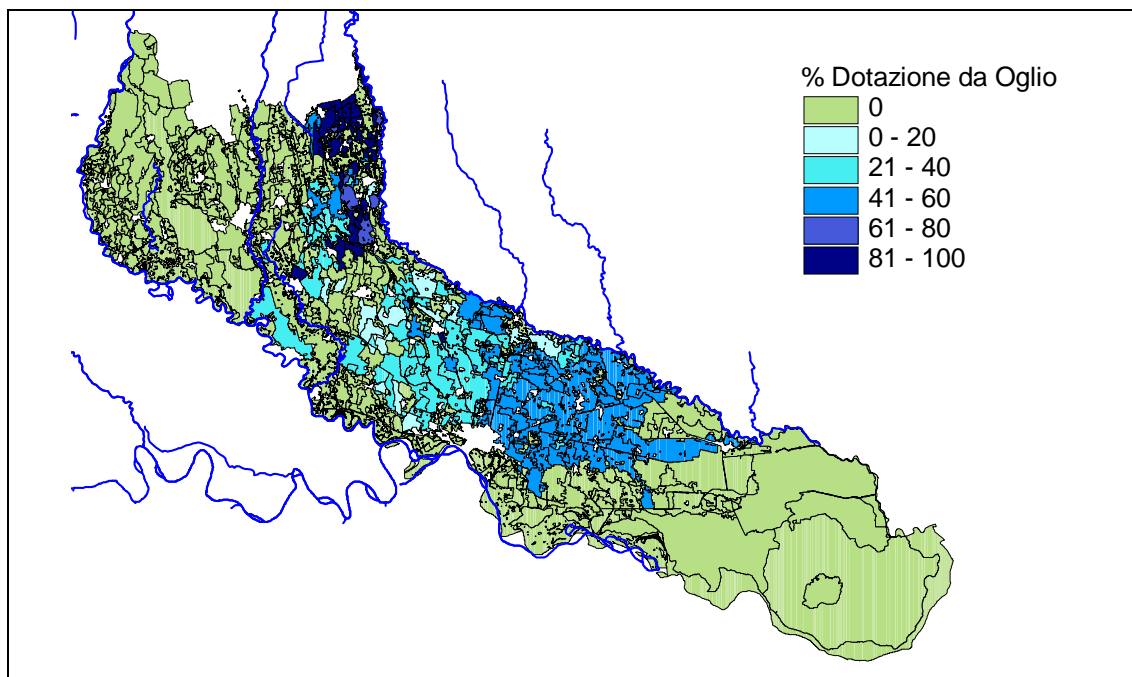


Figura 28. Percentuale della dotazione irrigua dei comizi proveniente da derivazioni per gravità dal f. Oglio.

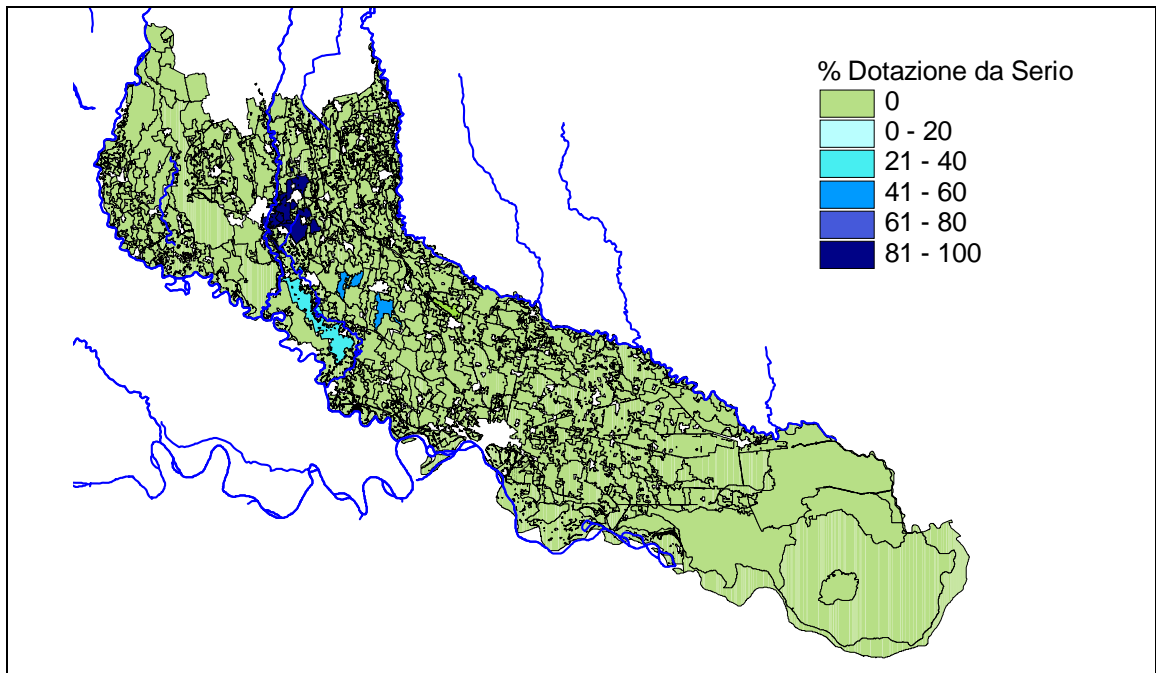


Figura 29. Percentuale della dotazione irrigua dei comizi proveniente da derivazioni dal f. Serio.

Nella zona meridionale dell'area di studio l'approvvigionamento irriguo avviene prevalentemente per sollevamento da Oglio e da Po; la Figura 30 mostra le aree servite dagli impianti principali oltre a due zone, in fregio ai fiumi Adda e Oglio, dove sono presumibilmente attivi ulteriori prelievi per sollevamento.

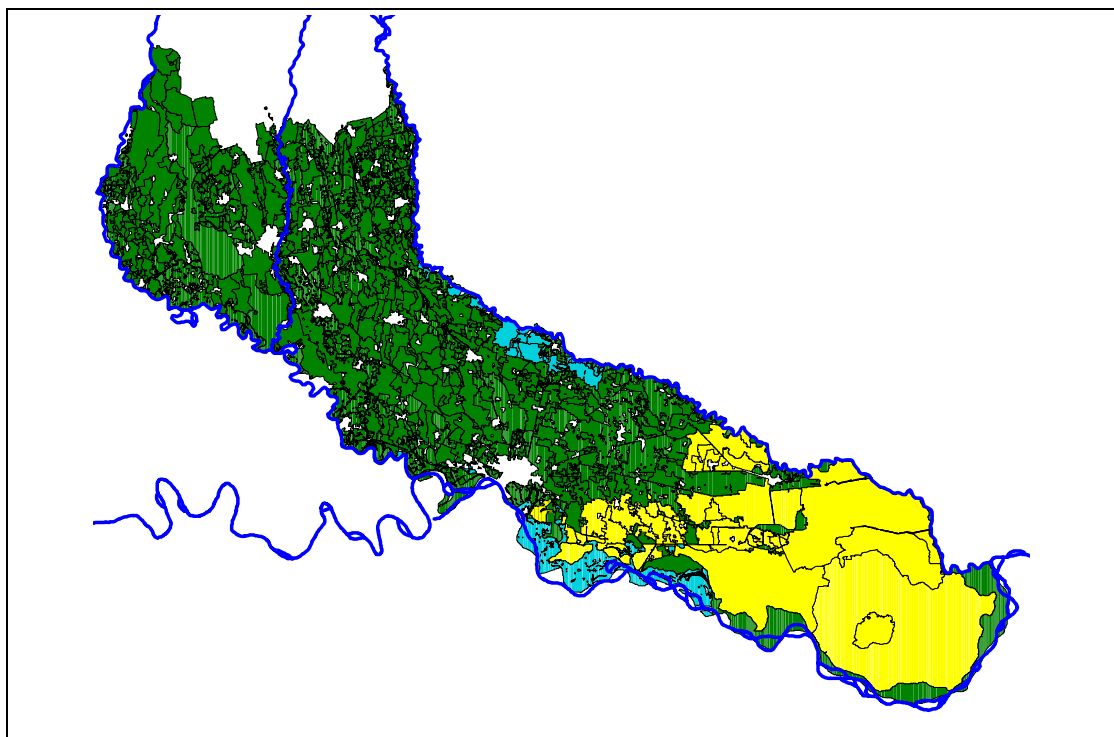


Figura 30. Comizi irrigati, completamente o parzialmente, con acqua proveniente da impianti di sollevamento da corsi d'acqua; in giallo le aree alimentate dagli impianti dei Consorzi Dugali e Navarolo, in azzurro le aree residue.

Fontanili

Piuttosto articolate sono state le indagini e le elaborazioni necessarie per la valutazione dell'apporto fontanilizio e per la sua ripartizione tra i diversi comizi. Si sono utilizzati i risultati dello studio di Gandolfi *et al.* (2006b), che si è basato tra l'altro sulle misure di portata di rogge fontanilizie rilevati dal CMPB dal dicembre 1988 al dicembre 1996 in provincia di Cremona, relativi al monitoraggio condotto in 79 sezioni di altrettante rogge. È emerso come si possa suddividere l'area di ricarica fontanilizia in sei sottobacini: tre sottobacini appartengono all'area tra l'Adda ed il Serio (AS1, AS2, AS3), due all'area tra il Serio e l'Oglio (OS1, OS2); il sesto sottobacino individuato (S) comprende i fontanili che si trovano in destra e sinistra Serio, dalla zona centrale della Provincia di Bergamo fino all'alta pianura cremasca.

Il contributo fontanilizio nominale alimentante il reticolo irriguo cremonese è risultato essere di circa 36 m³/s, valore stabilito sulla base dei dati in concessione e delle dotazioni nominali relative a ciascun comizio irriguo estrapolate dal CAI.

Le portate fontanilizie sono state ripartite in base alla suddivisione in sottobacini sopra descritta, attribuendo ad ognuno il relativo valore di portata nominale. Vale la pena di sottolineare come questi valori siano prossimi a quelli ottenuti elaborando le serie di misure di portata effettuate dal CMPB, citate in precedenza. Il valore di portata fontanilizia ottenuto dalle due diverse elaborazioni è risultato infatti sostanzialmente coerente tanto nel suo totale quanto nei singoli sottobacini ed è schematizzato nella Tabella 17.

Nella Figura 31 è riportata la distribuzione del contributo fontanilizio, suddiviso in funzione dei sottobacini individuati, nel territorio della Provincia di Cremona e in alcune aree di confine tra le Province di Bergamo e Cremona.

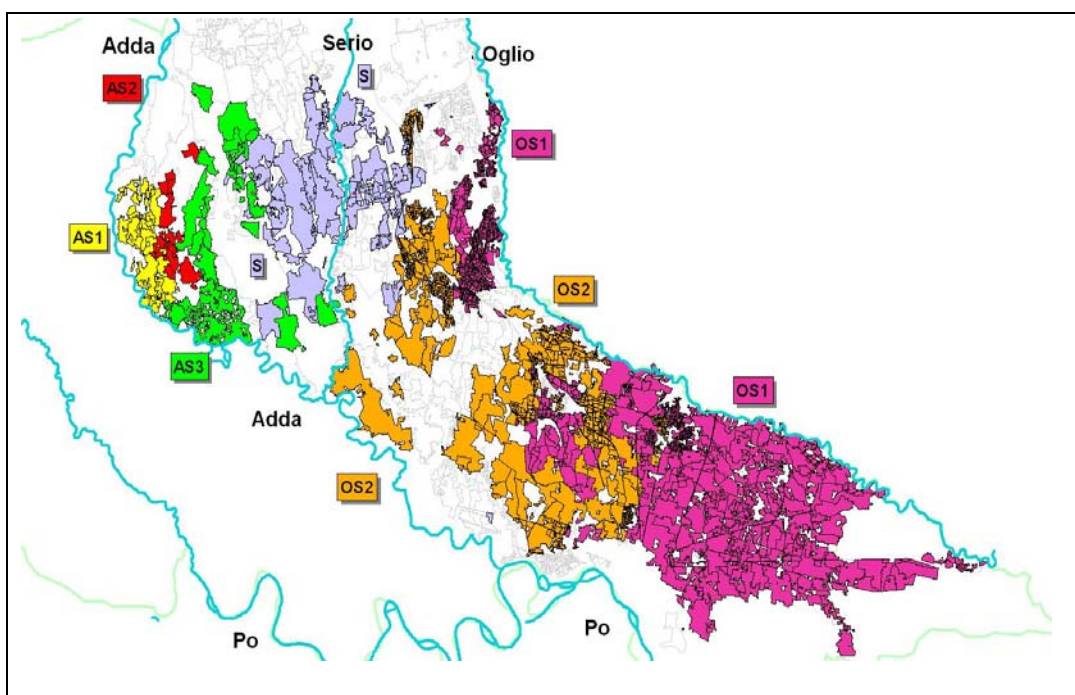


Figura 31. Distribuzione del contributo fontanilizio, suddiviso in base ai sei sottobacini individuati sulla base delle misure di CMPB.

Tabella 17. Valori di portata fontanilizia desunti da CAI e dalle misure effettuate da CMPB.

Bacino	Portata nominale CAI (m ³ /s)	Portata Media CMPB (m ³ /s)	Portata Max CMPB (m ³ /s)
AS1	4,2	2,7	4,7 (giugno 1990)
AS2	2,6	2,8	5,1 (settembre 1992)
AS3	7,5	7,7	11,3 (luglio 1989)
S	14,7	7,8	14,7 (luglio 1996)
OS1	4,4	3,0	4,3 (giugno 1992)
OS2	2,8	2,7	4,5 (luglio 1996)

Pozzi consortili

Per quanto riguarda i pozzi consortili per l'integrazione delle disponibilità irrigue, la Figura 32 e la Figura 33 illustrano la disposizione dei principali campi pozzi nell'area di studio, gestiti, rispettivamente da CNV e CMPB.

Il CNV dall'anno 2004, grazie ai suoi 7 pozzi consortili di soccorso, ha la possibilità di integrare la portata irrigua in ingresso in circa 30 comizi irrigui originari (9 comizi accorpati), rappresentati in Figura 32. La portata massima pompabile da falda è di 0,70 m³/s; a causa della natura di soccorso dei pozzi consortili del CNV, per le elaborazioni effettuate in questo studio, si è però considerato un valore medio di portata irrigua dagli stessi di 0,29 m³/s.

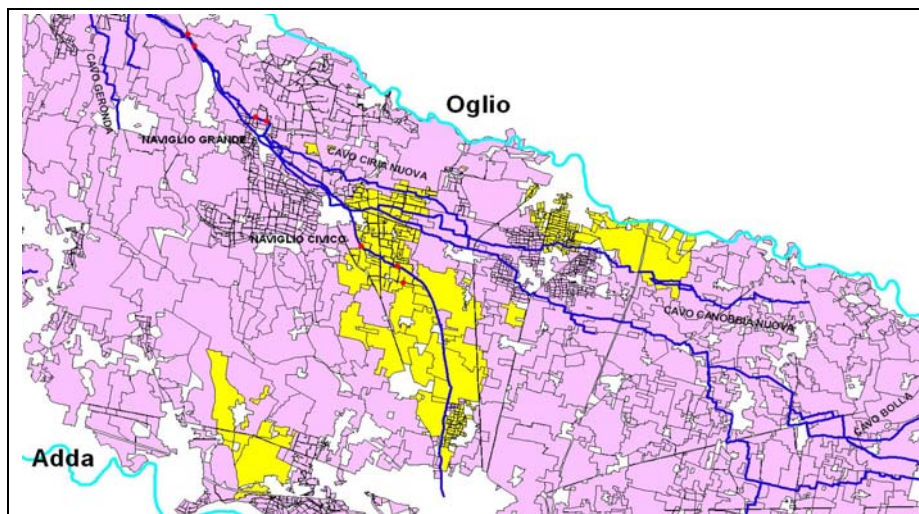


Figura 32. Comizi irrigui irrigati dai pozzi consortili del CNV (poligoni gialli) e posizione dei pozzi consortili (punti rossi).

Il CMPB, grazie ai suoi 44 pozzi consortili, distribuisce sul territorio di sua competenza circa 2,2 m³/s di portata in concessione. Di questi 20 ricadono nel territorio oggetto d'indagine, in particolare alimentano in parte l'area ricadente nel territorio del CMPB incluso nel dominio di simulazione. In Figura 33 sono visualizzate, in giallo, le aree che beneficiano del contributo idrico dai pozzi consortili del CMPB.

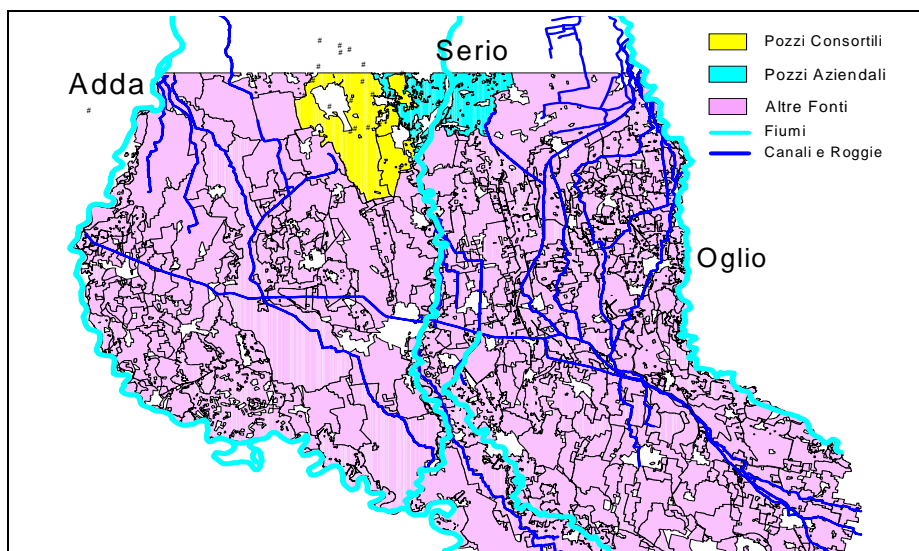


Figura 33. Comizi irrigui irrigati dai pozzi consortili del CMPB (poligoni gialli) e posizione dei pozzi consortili (punti neri).

Colature

Numerosi comizi sono alimentati, in misura più o meno cospicua, in modo indiretto: ricevono cioè da una portata irrigua proveniente da colature. Le colature sono determinate da recuperi di volumi non utilizzati a monte e da processi di drenaggio dei volumi distribuiti ad opera della fitta rete di canali irrigui. La quantificazione del volume irriguo proveniente da coli è disponibile in alcuni comizi, incognito in molti altri. Nella Figura 34 sono rappresentati, in colore azzurro, i comizi irrigui in cui, anche in piccola percentuale, nella portata irrigua siano presenti acque di colo.

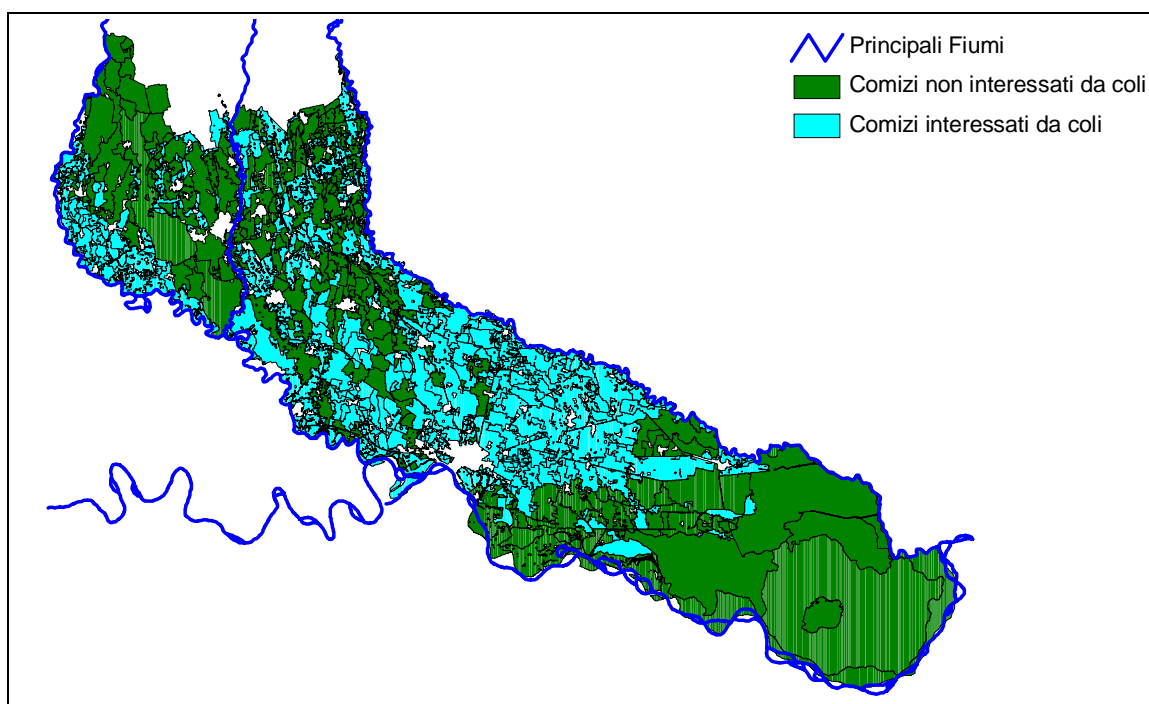


Figura 34. Comizi irrigati parzialmente con acqua di colo.

Nella Figura 35 sono invece rappresentati, tra i comizi per cui la portata irrigua da coli è nota, i valori della percentuale della portata irrigua di competenza costituita da colature.

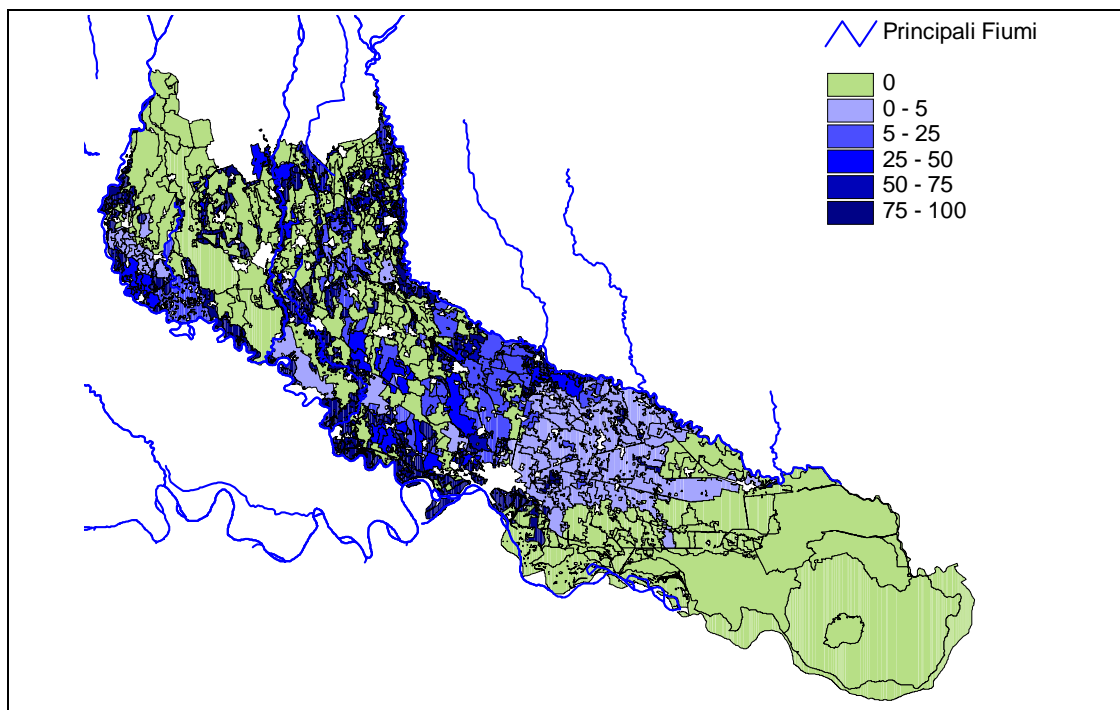


Figura 35. Percentuale delle colature sulla portata complessiva per i comizi irrigati con acqua di коло.

Efficienze di adduzione-distribuzione ed adacquamento

Le perdite di adduzione costituiscono una voce tutt'altro che trascurabile nel bilancio idrico dei sistemi irrigui cremonesi. Tuttavia la loro valutazione è assai problematica, come confermato dalla difficoltà nel reperire informazioni in merito nell'ambito della ricerca. Il fenomeno infatti risulta difficile da monitorare a scala comprensoriale, essendo regolato, oltre che dalla estensione delle canalizzazioni, da una molteplicità di fattori quali la forma e le dimensioni della sezione, le caratteristiche del fondo e delle sponde, il battente d'acqua, la profondità della falda, eccetera.

La stima delle perdite, mediante rilievi di campo, viene generalmente condotta isolando un tratto di canale sufficientemente lungo e possibilmente privo di derivazioni, in modo che l'entità delle perdite sia di un ordine di grandezza superiore agli errori nella misura delle portate entrante ed uscente, da cui per differenza si calcola la perdita. Questo tipo di rilievi non è sempre agevole e la disponibilità di stime di sicura affidabilità è modesta. Inoltre, esiste una forte variabilità delle perdite a parità di condizioni di deflusso iniziale nel canale, dovute soprattutto alla fluttuazione dei livelli di falda, ma anche, per i canali non rivestiti, al variare delle condizioni nel tempo legate, ad esempio, allo sviluppo della vegetazione. Per tale ragione le poche esperienze di campo sono da riferirsi a condizioni ambientali particolari e sono difficilmente generalizzabili. In Tabella 18 si riportano alcuni valori derivati da recenti esperienze in ambienti lombardi.

Tabella 18. Dati osservativi relativi alle perdite di condotta.

Canale	Lunghezza tratto (km)	Autore	Data rilievo	Portata l/s	Perdite l/(s km)	Perdite %/km
Canale Povera (Muzza Bassa Lodigiana - LO)	6	Barbini F.	Nd	861	15,90	1,85
Canale Pandina (Muzza Bassa Lodigiana - LO)	3,4	Barbini F.	Nd	700	16,18	2,31
Canale Adduttore Principale Villorresi (MI)	nd	CBI Est Ticino Villorresi	Dato medio	Nd	120	nd
Ramo secondario Villorresi (MI)	nd	CBI Est Ticino Villorresi	Dato medio	Nd	25	nd
Roggia Abbada (CR)	2,4	CBI Naviglio Vacchelli	19-7-00	328	35	11
Roggia Abbada (CR)	2,4	CBI Naviglio Vacchelli	11-9-00	303	21	7
Canale P. Vacchelli (CR)	13,518	Bassi, Zoni	13-6-03	33690	60,7	nd
Canale P. Vacchelli (CR)	13,518	Bassi, Zoni	9-7-03	32140	30,8	nd
Canale P. Vacchelli (CR)	12,090	Bassi, Zoni	5-9-03	19584	18,35	nd
Canale Calciana (CR)	4,1 di cui 3,405 non rivestito	Bassi, Zoni	17-4-03	1106	70,2	nd
Canale Calciana (CR)	7,810 di cui 3,405 non rivestito	Bassi, Zoni	29-7-03	2040	95,5	nd
Canale Calciana (CR)	7,810 di cui 3,405 non rivestito	Bassi, Zoni	15-9-03	1500	25,8	nd

A scala regionale sono disponibili alcune stime, sostanzialmente empiriche, sull'efficienza di adduzione delle reti irrigue: Autorità di Bacino del Fiume Po (1998), riporta i valori di efficienza stimati dai consorzi per le reti di adduzione (Tabella 19). Sebbene i criteri seguiti dai diversi Consorzi nella stima non appaiano sempre coerenti tra loro, si nota come l'efficienza assume valori compresi tra il 55 e l'85 % della portata immessa.

Approfondimenti condotti più di recente, condotti dal Consorzio della Muzza Bassa-Lodigiana e dal Consorzio del Medio-Chiese, convergono su valori medi dell'efficienza del 65%, nonostante le diverse caratteristiche dei territori consortili e dei relativi sistemi irrigui. Alla luce del complesso delle informazioni disponibili e considerandone i limiti, è apparso ragionevole adottare nelle simulazioni proprio questo valore dell'efficienza, ipotizzato uniforme nell'intera area di studio.

Per valutare l'efficienza di adattamento ci si è basati invece sui dati ISTAT (2003) relativi alla distribuzione territoriale dei diversi metodi irrigui. Tale fonte fornisce, in particolare, per ogni comune, le percentuali di superficie irrigua irrigate tramite l'utilizzo dei diversi metodi. Si è quindi derivata una carta dell'efficienza di adattamento attribuendo ad ogni comune il metodo irriguo prevalente e applicando valori di efficienza dei diversi metodi irrigui desunti da indagini bibliografiche (si veda, ad esempio, la Tabella 20). In particolare, per l'irrigazione a scorrimento e ad aspersione si sono adottati valori di efficienza pari, rispettivamente al 40% ed al 65%, ottenendo la distribuzione dei valori rappresentata in Figura 36.

Tabella 19. Efficienza della rete di adduzione (fonte Autorità di Bacino Fiume Po, 1998).

Nome del consorzio	Lunghezza complessiva canali adduttori (km)	di cui in terra (%)	Efficienza della rete di trasporto %
Agro Mantovano Reggiano	74	59	80
Alta e Media Pianura Mantovana	128	75	75
Associazione irrigazione Est Sesia	1710	65	80
Bonifica Burana Leo Scoltenna Panaro	2000	80	85
Bonifica Fossa di Pozzolo	149	81	65
Colli Morenici del Garda	4	100	70
Cons. Irr. Roggia Fontana o Rino ed Unite (CR)	10	100	70
Cons. Irr. Roggia Morgola (CR)	8	100	60
Cons. Irr. Sale, Donna e Antegnate	105	79	83
Cons. Irr. Sorzia (CR)	70	96	85
Cons. Irrigazione Roggia Babbiona	12	100	85
Consorzio dei Cavi Litta ed Uniti (Est Ticino Villoresi)	100	95	Nd
Consorzio della Roggia Arcimbolda	40	100	70
Consorzio di B. Biscia-Chiodo-Prandona	12	100	70
Consorzio di Irrigazione Ostianese	20	50	80
Consorzio di Roggia Grande di Olona	10	100	70
Consorzio Generale Federativo Utenze del Mella (BS)	11	100	70
Consorzio Irriguo del Cavone	40	98	70
Consorzio Irriguo della Roggia Grossa	16	100	70
Consorzio Irriguo Roggia Batteredra	9	100	70
Consorzio Miglioramento Fondiario Regina Codogna	20	100	70
Consorzio Naviglio Inferiore Isorella	12	100	70
Consorzio Naviglio Olona	350	86	70
Consorzio Roggia Acquarossa Asta Maestra	20	100	65
Consorzio Roggia Bolognini	18	100	70
Consorzio Roggia Carona Magistrale (Est Ticino Villoresi)	26	100	Nd
Consorzio Roggia Castellara (Est Ticino Villoresi)	14	100	Nd
Consorzio Roggione Olevano	5	100	70
Consorzio Volonghese Sup. e Inf.	20	40	80
Dugali	128	78	55
Est Ticino Villoresi	230	13	80
Fra Mella e Chiese	30	53	70
Media Pianura Bergamasca	188	56	60
Muzza – Bassa Lodigiana	40	88	80
Navarolo – Agro Cremonese Mantovano	54	0	Nd
Naviglio-Vacchelli	350	90	85
Revere	55	35	Nd
Roggia Alchina	13	100	65
Roggia Comuna	40	100	80
Roggia Misana –Cremasca	75	100	80
Roggia Pandina	10	100	80
Roggia Rivoltana	13	100	50
Roggia Vailata	14	100	70
Sinistra Oglio (Consorzio Oglio)	355	92	60
Sud Ovest di Mantova	56	80	60
Utenza Canale Diramatore Cavallera Crivella	20	100	70
Utenza Roggia Sartirana (Est Ticino Villoresi)	25	100	Nd
TOTALI	6709	75	

Tabella 20. Valori di efficienza stimati per i diversi metodi irrigui (Fonte: CIGR, 1999).

<i>Efficienza</i>	<i>Irrigazione di superficie</i>	<i>Irrigazione a pioggia</i>	<i>Microirrigazione</i>
Potenziale (%)	60-80	75-90	90-95
Effettiva (%)	30-60	50-80	65-90

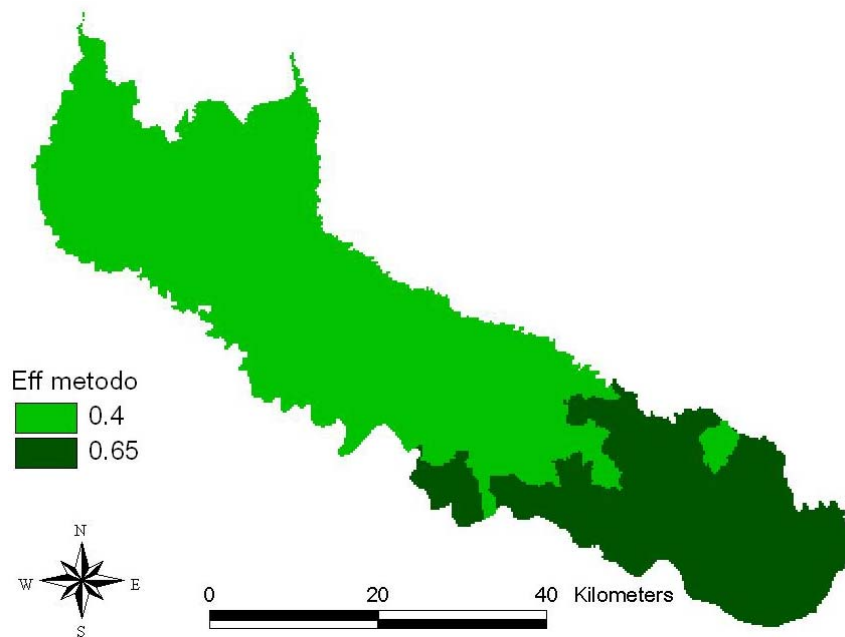


Figura 36. Efficienza di adacquamento nell'area di studio.

3.2.5 Serie giornaliere di dati agrometeorologici e loro spazializzazione

Al fine di comprendere quale fosse la reale disponibilità di informazioni, si è effettuata un'analisi qualitativa delle serie di grandezze agrometeorologiche relative alle stazioni selezionate (elencate nel Paragrafo 2.1).

Per ogni stazione meteo e per ogni sensore, partendo dai dati orari, sono stati eliminati i valori corrispondenti al fondo scala superiore ed inferiore, in quanto indicatori di un cattivo funzionamento dello strumento. Inoltre, sono stati eliminati i valori non coerenti con l'andamento stagionale (ad esempio, temperature inferiori a 0 °C nei mesi estivi). Infine, le serie di dati per le diverse stazioni sono state ricondotte ad un formato omogeneo. L'analisi dei dati mancanti è stata condotta sulle serie temporali di dati così ottenute.

In molte stazioni la percentuale di dati grezzi mancanti rispetto al totale teorico è elevata (Figura 37): i dati assenti vanno da un minimo del 12% (pioggia presso S. Angelo) ad un massimo dell'85% (radiazione globale di Landriano). La percentuale media di dati grezzi presenti nelle diverse stazioni è maggiore per la temperatura (74%), la pioggia (73%) e l'umidità (63%), mentre è più scarsa per la velocità del vento (56%) e la radiazione globale (35%).

Dalla Figura 38 si può constatare un marcato aumento del numero di dati validi nel periodo dal 1993 al 2002, questo è imputabile sia all'entrata in funzione di ulteriori strumenti presso le stazioni già in funzione, che al miglioramento della qualità dei dati raccolti. Dopo il 2002 si nota una riduzione della percentuale dei dati validi, presumibilmente imputabile a carenze nella manutenzione della rete.

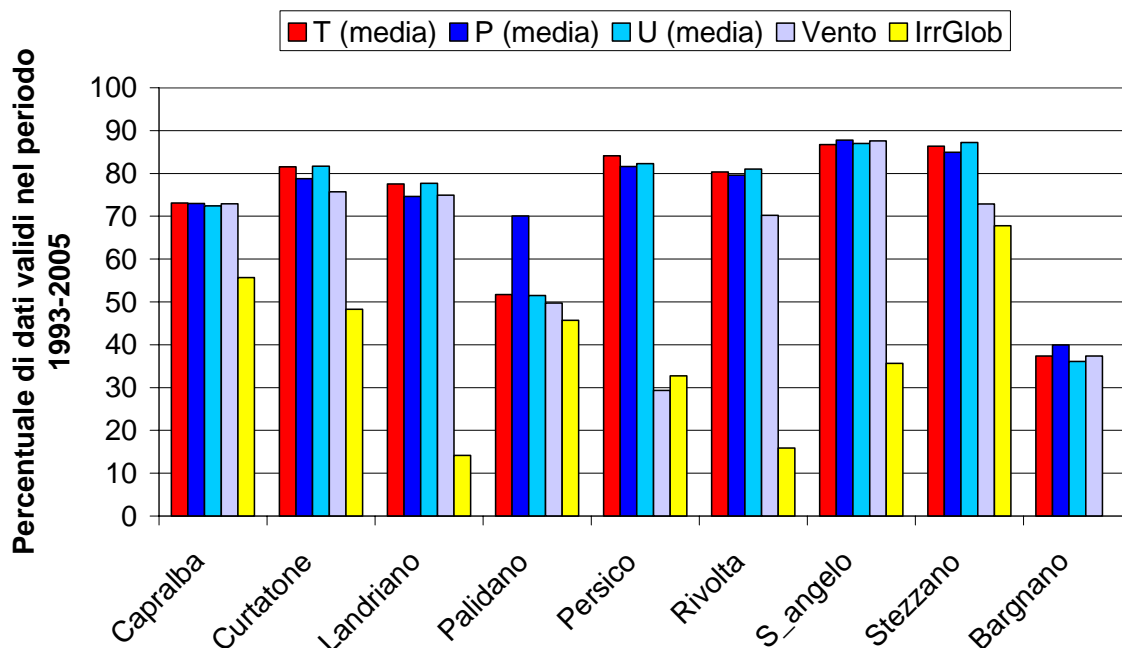


Figura 37. Percentuale di dati validi per stazione e per grandezza meteorologica nel periodo 1993-2005.

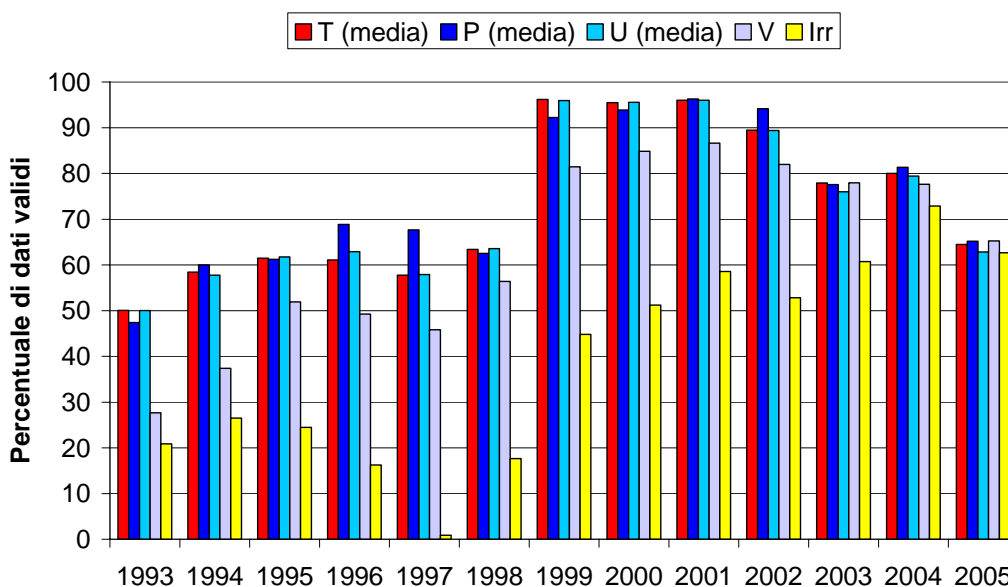


Figura 38. Percentuale di dati validi per grandezza meteorologica, rispetto al totale delle 9 stazioni considerate.

Nel caso dell'umidità dell'aria molte serie presentano un'elevata percentuale di dati validi, di contro si riscontra (in particolare nell'intervallo 1993-1999) una scarsa qualità del dato dovuta probabilmente ad una forte deriva strumentale, evidentemente non corretta con ricalibrazione periodica. A titolo di esempio si riportata in Figura 39 la serie di umidità massima rilevata presso la stazione di Persico: la serie presenta l'82% di dati validi (i periodi con dati mancanti rappresentano quindi "solo" il 18% del totale) ma si osservano andamenti spiccatamente anomali dei dati giornalieri nella prima metà della serie (fino a

metà maggio 1999), la natura e l'intensità della deriva è tale da impedire l'utilizzo di questi dati. La stazione presa ad esempio è rappresentativa della situazione generale: eliminando i dati inattendibili dalle serie di umidità si ottengono percentuali di dati mancanti oscillanti tra il 50 e l'86%.

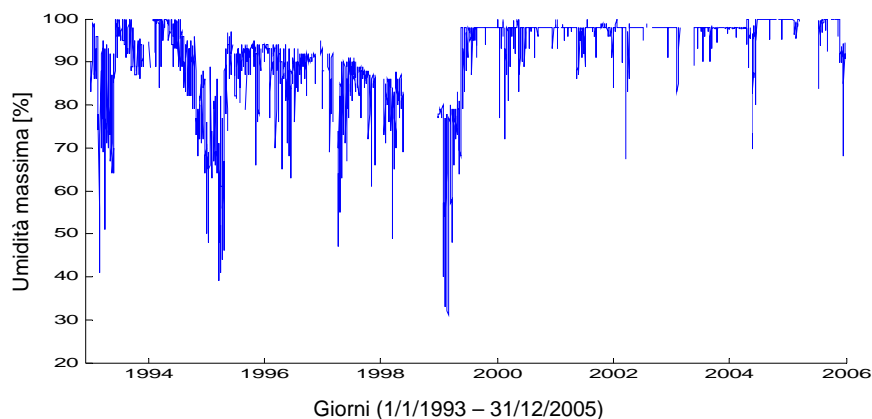


Figura 39. Serie di umidità massima della serie di umidità massima della stazione di Persico, periodo 1993 – 2005.

Per alcune stazioni, che pure sono necessarie al fine di raggiungere una copertura omogenea del territorio oggetto d'indagine, manca una quota considerevole di dati relativi ad alcune grandezze; si è dovuto quindi trovare una metodologia attendibile per la ricostruzione di parti preponderanti di alcune serie (in alcuni casi i periodi mancanti coprono anche diversi anni). Il riempimento dei periodi mancanti delle diverse grandezze, escluse le serie di irraggiamento, è stato compiuto attraverso metodi di ricostruzione adattativa basata su tutti i dati disponibili (i.e. tutte le serie disponibili di 14 stazioni meteo presentate in Figura 37 e in Figura 38; tali metodi si sono basati, a seconda dei casi, su una o più delle seguenti tecniche: trasformazione non lineare, destagionalizzazione spettrale, regressione lineare multipla, rimodulazione *fuzzy*. La scelta del metodo migliore è stata condotta di volta in volta attraverso test Montecarlo. Per la descrizione approfondita delle operazioni effettuate per il completamento delle serie agro-meteorologiche si rimanda al Capitolo 3 della relazione Gandolfi *et al.* (2007).

La radiazione globale è stata esclusa dalla procedura di ricostruzione adottata per le altre grandezze, principalmente per due motivi: il primo riguarda il fatto che risulta essere la grandezza che ha presentato la minor disponibilità di dati e, in secondo luogo è possibile stimare i dati mancanti sulla base delle altre grandezze meteorologiche disponibili impiegando un modello fisicamente basato quale quello di Campbell-Donatelli (1998). Le operazioni svolte sulle serie di radiazione sono descritte nella relazione Gandolfi *et al.* (2007).

Per l'esecuzione del modello di bilancio idrologico, occorre che per ogni cella in cui il territorio viene suddiviso siano assegnati i valori giornalieri delle variabili meteorologiche. Occorre dunque procedere ad una "spazializzazione" delle serie meteorologiche relative alle 9 stazioni descritte nella sezione precedente.

La prima versione del modello (descritta in Relazione finale, I fase, 2006) includeva un algoritmo per la spazializzazione dei dati puntuali delle stazioni meteo attraverso il metodo "dei topoieta", detti anche "poligoni di Thiessen" (Figura 40). Secondo questo metodo l'andamento meteorologico di una cella è assunto uguale a quello della stazione più vicina, il poligono che racchiude l'area di influenza di una stazione viene chiamato "topoieta" (le

forme e le dimensioni dei topoieti dipendono solo dalla dislocazione delle stazioni meteo). Il metodo ha il pregio di essere semplice, intuitivo e ragionevole, di contro produce delle discontinuità nelle celle di passaggio da un topoieta all'altro, infatti, valicando la linea di confine tra due topoieti cambia la stazione di riferimento e questa differenza si ripercuote ovviamente sui valori in uscita delle due celle contigue. Nel caso di una rete di dati meteo molto fitti ed omogeneamente distribuiti sul territorio, la differenza è in genere piccola e questo metodo può essere considerato accettabile. In condizioni diverse (rete meteo non particolarmente fitta e/o con distanze tra le stazioni variabili) il metodo produce salti bruschi negli andamenti meteorologici che possono essere amplificati dal modello e dominare le uscite, coprendo quindi gli effetti dovuti ai restanti fattori, quali pedologia e uso del suolo.

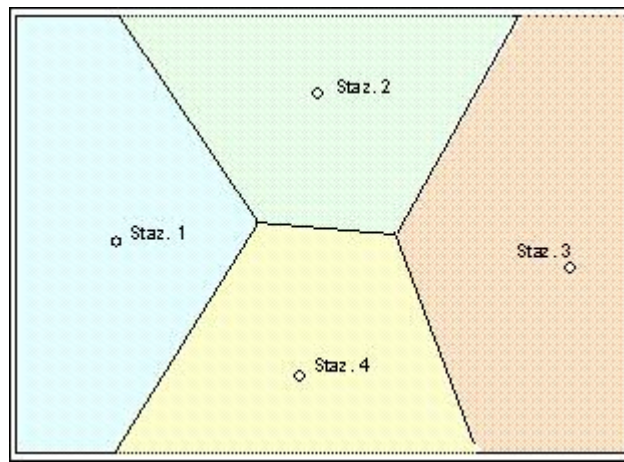


Figura 40. Esempio di topoieti, la zona attorno ad ogni stazione assume, senza modifiche, gli andamenti meteo registrati presso la stazione.

Per quanto detto si è preferito adottare un diverso metodo di spazializzazione, diffusamente utilizzato in letteratura (Ramesh e Chandramouli, 2005 e Wei *et al.*, 1973): la media pesata sull'inverso del quadrato della distanza. Secondo questo metodo si assume che gli andamenti meteo di una cella siano la media degli andamenti meteorologici registrati nelle varie stazioni; maggiore importanza viene data alle stazioni più prossime alla cella in questione, minore a quelle più distanti, assegnando ad ognuna un peso proporzionale all'inverso del quadrato della distanza tra la stazione e la cella:

$$(3.13) \quad VAL_{i,j} = \sum_{k=1}^n P_{i,j,k} Val_k ;$$

$$(3.14) \quad P_{i,j,k} = \frac{1/D_{i,j,k}^2}{\sum_{q=1}^n 1/D_{i,j,q}^2} ;$$

$$(3.15) \quad D_{i,j,k}^2 = (X_{i,j} - X_k)^2 + (Y_{i,j} - Y_k)^2 .$$

dove:

$VAL_{i,j}$ valore della grandezza meteo nella cella considerata, i e j sono gli indici, rispettivamente di riga e colonna, della griglia di celle che compone il dominio;

- $P_{i,j,k}$ peso normalizzato che ha la stazione k sulla cella i,j ; la somma dei pesi delle stazioni rispetto ad una cella è pari a uno;
- Val_k valore della grandezza meteo nella serie meteo della k -esima stazione;
- $D_{i,j,k}^2$ quadrato della distanza euclidea tra la k -esima stazione e la cella i,j ;
- X_k, Y_k coordinate Gauss-Boaga della k -esima stazione meteo;
- $X_{i,j}, Y_{i,j}$ coordinate Gauss-Boaga del centro della cella i,j del dominio di calcolo;
- n è il numero di stazioni di riferimento per il calcolo.

Nell'applicazione del metodo il valore da attribuire ad ogni cella viene calcolato di volta in volta utilizzando le tre stazioni più vicine ($n=3$).

In Figura 41 sono riportate, a titolo di esempio, due grandezze meteo nella loro rappresentazione 3D in una piccola porzione dell'area di studio: a sinistra la temperatura minima (escursione in mappa da -8 a -4.5°C), a destra la temperatura massima (escursione spaziale da 1.5 a 5°C) relative 1° gennaio 1993.

Le superfici si presentano omogenee e morbidamente curvate nelle zone che hanno le medesime stazioni di riferimento. Quando tra una zona omogenea e le zone limitrofe cambia la terza stazione più vicina, questo determina un piccolo dislivello tra le superfici.

Il metodo dei topoieti può essere visto come un caso particolare del metodo del quadrato della distanza eseguito sulla sola stazione più vicina, in quel caso le superfici sono piatte e i salti risultano estremizzati. Il metodo adottato consente invece di minimizzare le discontinuità e di ottenere variazioni spaziali graduali delle grandezze meteorologiche.

In Figura 42 viene mostrato un esempio di rappresentazione 3D delle matrici dei pesi meteo (sull'asse verticale il valore del peso) per una piccola porzione di territorio.

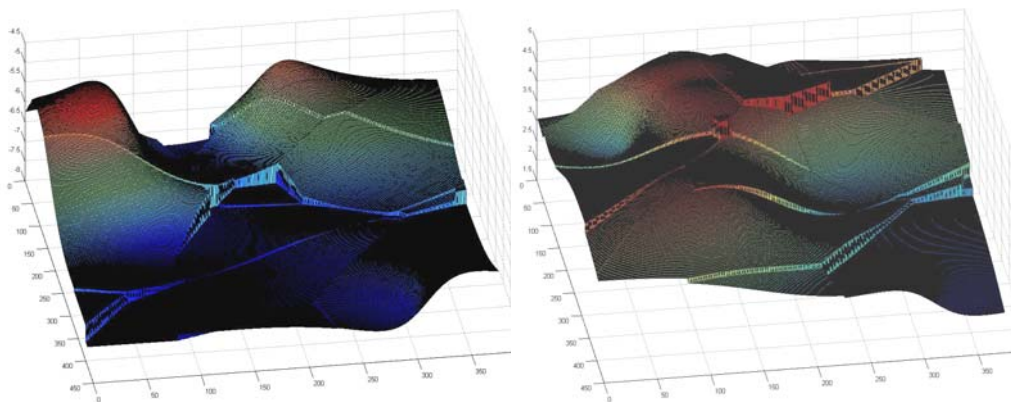


Figura 41. Raffigurazione 3D di Tmin e Tmax spazializzate per il 1° gennaio 1993 in una piccola porzione dell'area di studio.

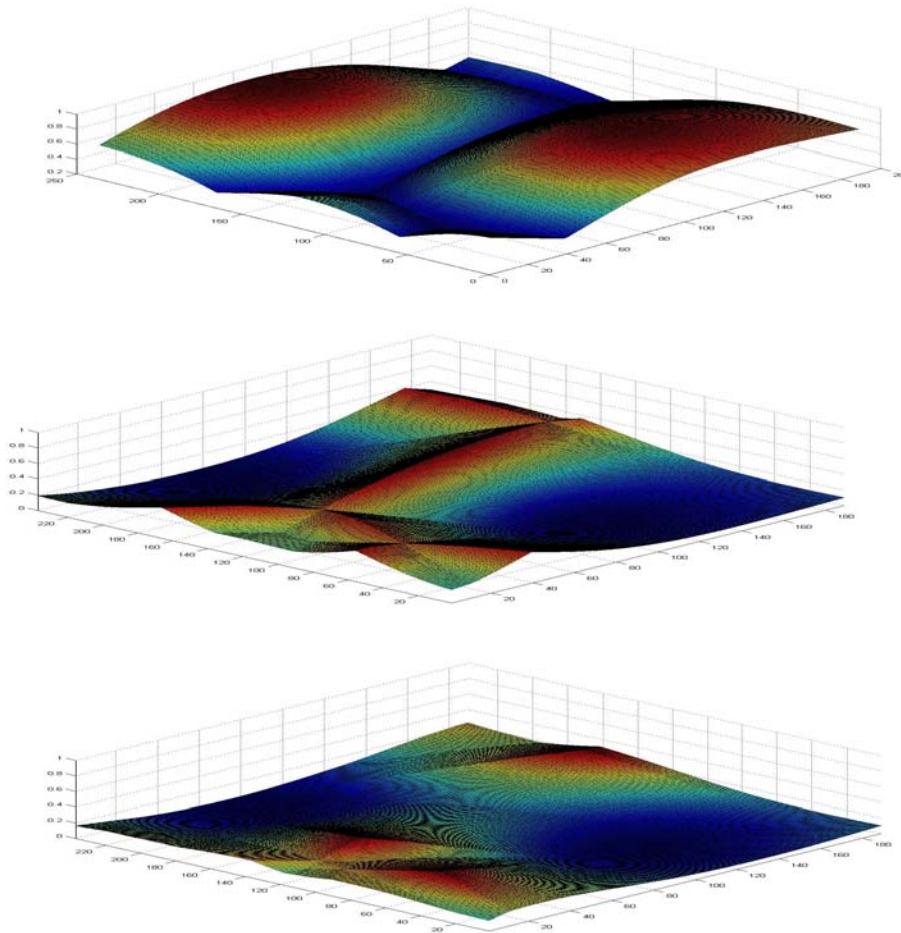


Figura 42. Rappresentazione 3D delle 3 matrici dei pesi meteo per una piccola porzione dell'area di studio.

3.2.6 Serie giornaliere di portate derivate da corsi d'acqua superficiali

La disponibilità e la consistenza delle serie delle portate medie giornaliere derivate dai corsi d'acqua superficiali ed entranti nel reticolo irriguo dell'area di studio sono descritte nel Paragrafo 2.5.2. Come anticipato in quest'ultimo, nonostante siano 13 le derivazioni primarie, si è in possesso di una serie consistente di dati giornalieri di portata solo per 9 di essi: tutti i canali di derivazione da Adda e da Oglio (dal 1984 ad oggi). Le serie acquisite presentano alcune discontinuità d'informazione, per intervalli temporali variabili; si è dunque proceduto, dove si aveva la certezza che dati mancanti o nulli fossero causati da rilevazioni assenti, con l'interpolazione dei dati mancanti per il periodo interessato.

Per le derivazioni da Serio si conoscono solamente i valori delle portate in concessione, le serie giornaliere necessarie al modello sono state generate a partire da opportune medie pesate di serie note di derivazioni limitrofe (per ottenere la modulazione delle portate) e scalate rispetto alla portata nominale specifica di ogni derivazione (per ottenere la corretta ampiezza).

Per quanto riguarda, infine, le derivazioni per sollevamento da Oglio e Po che alimentano la porzione meridionale dell'area di studio, non si dispone di serie complete delle portate giornaliere derivate per tutti gli impianti; in considerazione di ciò e della tipologia di fonte, si è deciso di trattarle come fonti incognite, lasciando al modello di effettuare la stima delle

portate sollevate sulla base dell'andamento dei fabbisogni colturali (si veda Paragrafo 3.1.3, alla voce *Derivazioni da corsi d'acqua*).

3.2.7 Serie giornaliere di portate da fontanili

La disponibilità di dati relativi alle portate delle rogge alimentate da fontanili è limitata le 46 misure a cadenza mediamente bimestrale in corrispondenza di 79 sezioni di misura, effettuate da CMPB tra il dicembre 1988 al dicembre 1996. Per ricavare le serie delle portate giornaliere sono stati utilizzati i risultati dell'indagine condotta da Gandolfi *et al.* (2006b). Essa si basa sullo studio della correlazione tra le portate fontanilizie misurate ed i dati di portata media giornaliera derivata dai canali che alimentano l'irrigazione nelle aree a monte dei fontanili.

I canali coinvolti in questa analisi sono i seguenti:

- le rogge Rivoltana, Pandina, Cremasca e Vailata per le derivazioni da Adda;
- le rogge Sale, Donna e Antegnate, il Naviglio Civico, il Cavo Calciana ed il Naviglio Grande Pallavicino per le derivazioni da Oglio.

Il legame tra le misure e le portate dei canali ha richiesto numerosi tentativi interpretativi (vedi Gandolfi *et al.*, 2006b); i risultati migliori sono stati ottenuti raggruppando le serie di portate misurate e ricercando la correlazione tra le portate aggregate di ogni gruppo e le portate dei canali, secondo lo schema di Figura 43, in cui la somma delle portate misurate nelle sezioni A, B e C è ben correlata con la portata del canale che alimenta l'area irrigua a monte.

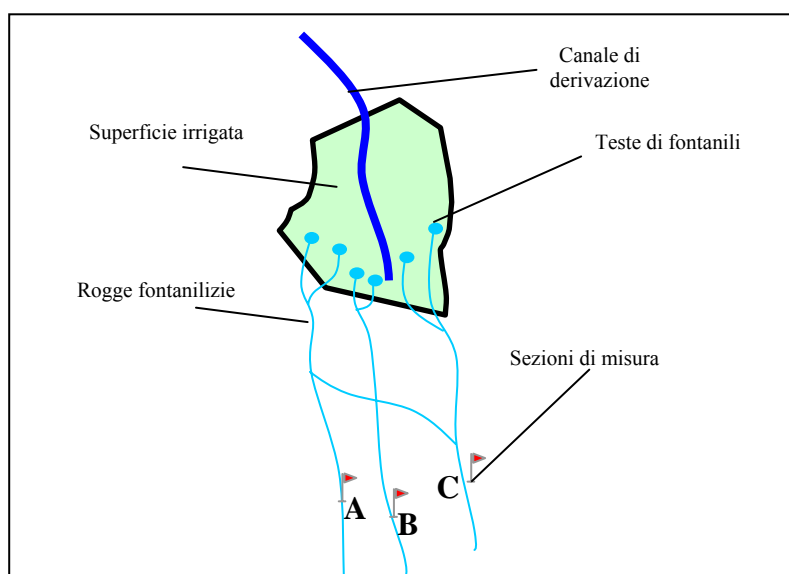


Figura 43. Schema interpretativo del fenomeno di correlazione tra portata derivata dal canale primario e portata in gruppi di rogge fontanilizie (A, B e C in figura).

La correlazione tra portate derivate dal canale primario e relativi gruppi di rogge presenta valori compresi tra 0.62 e 0.92. La disposizione spaziale dei gruppi di rogge maggiormente correlate con i canali è coerente con le aree irrigate dai canali stessi.

La Figura 44 riporta una porzione dell'area di studio con i sottobacini irrigati dai diversi canali (Rivoltana, Pandina, Cremasca e Vailata), 23 rogge fontanilizie con numerose teste e 3 aree separate da barre verticali denominate AS1 AS2 e AS3 (per le quali sono stati costruiti i corrispettivi modelli).

Si osservi, ad esempio, come le rogge numerate da 1 a 8 raccolte dal modello AS1 provengano dall'area irrigata dalla Rivoltana.

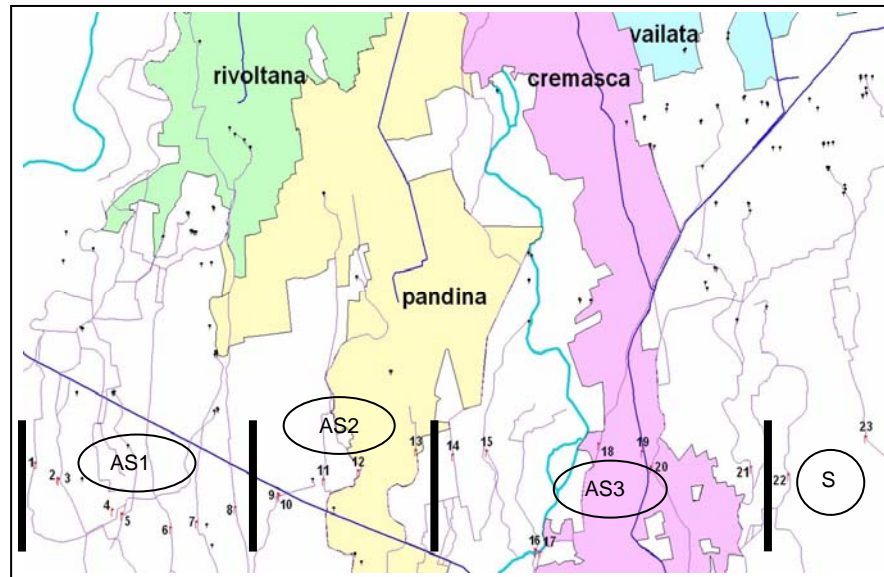


Figura 44. Suddivisione in sottobacini di una parte del territorio di studio (modelli: AS1, AS2 e AS3).

Dopo diversi tentativi, il modello scelto per legare le portate fontanilizie a quelle dei canali principali è del tipo ARX(1,1,n) (dove n è il ritardo in passi dell'ingresso esogeno):

$$(3.16) Y_t = \alpha Y_{t-1} + \beta X_{t-n} + \varepsilon_t$$

dove:

Y_t è la variabile da spiegare (in questo caso le portate dei gruppi di rogge) nel giorno 't' (in generale i valori delle grandezze con pedice temporale si assumono come variabili nel tempo).

t è l'indice dell'istante considerato, in questo caso il t-esimo giorno di simulazione (così 't-1' è il giorno precedente e 't-n' è da leggere "n giorni prima del giorno t").

α parametro di "persistenza del sistema", cioè quanto Y_t del giorno t dipende da Y_{t-1} del giorno prima t-1 (è un numero compreso tra -1 e 1 ma nel caso in esame ci si attende che sia tra 0 e 1).

X_{t-n} è la variabile esogena (i.e. "che viene da fuori", "che non è determinata all'interno del modello in esame"), in questo caso sono le portate derivate nel giorno 't-n'.

n parametro di ritardo dell'ingresso, numero di giorni di ritardo dell'ingresso (lag).

β parametro d'influenza della variabile esogena, vale a dire quanta parte di ogni X_{t-n} determina ogni Y_t (è un numero compreso tra 0 e 1.)

ε_t è l'errore del modello, cioè la differenza tra il valore Y_t misurato e il valore \hat{Y}_t stimato dal modello.

In alcuni casi X non rappresenta la portata di un singolo canale ma la somma dei contributi di diversi canali eventualmente pesati (ad esempio il sottobacino AS3 dipende da Pandina, Cremasca e Vailata).

La taratura dei modelli è stata fatta ai minimi quadrati per la riduzione dello scarto ε_t in corrispondenza dei dati validi. In Figura 45 si possono osservare la somma delle portate

delle prime 8 rogge misurate nelle diverse campagne (pallini blu) e il valore di portata stimato dal modello ASI in blu. In rosso, invece, vengono riportati i valori dati dal modello per i seguenti anni ricostruiti dal modello a partire dalle portate della Rivoltana. Si noti dalla figura la buona capacità del modello di catturare periodo e ampiezza del segnale (si notano 3 *outliers* probabilmente dovuti a intense piogge estive nei dintorni).

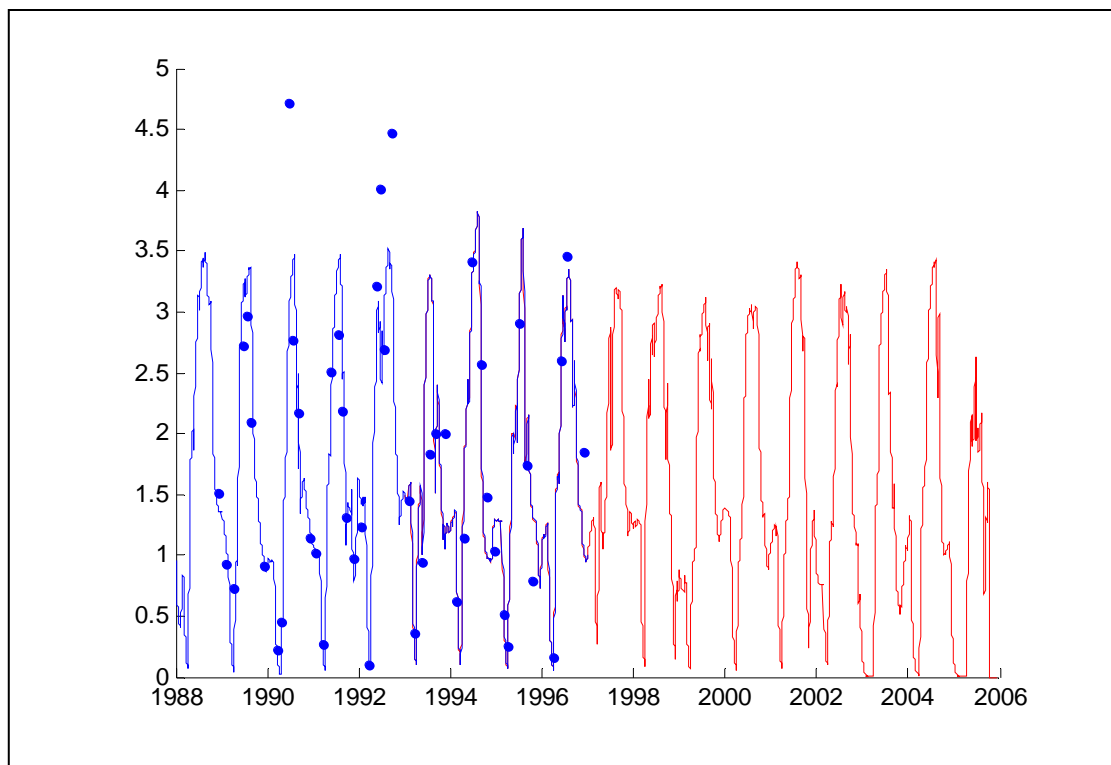


Figura 45. Modello del sottobacino ASI alimentato dalla roggia Rivoltana, in blu la fase di taratura (i pallini blu sono i dati misurati).

I valori di varianza spiegata dai modelli tarati vanno da 0.4 a 0.75 (media 0.6). I due modelli complessivi della zona Adda-Serio e Serio-Oglio presentano una varianza spiegata di 0.73 e 0.64 rispettivamente.

I gruppi di fontanili a ridosso del Serio (sottobacino S) si sono dimostrati non correlati con i dati di portata a nostra disposizione; si è optato quindi per la generazione di una serie sintetica che riproduca l'andamento dei dati osservati.

3.2.8 Serie giornaliere di portate da coli

La portata di colò è modellizzata come descritto nel Paragrafo 3.1.3; la selezione di questo tipo di approccio proviene dall'analisi dei pochi dati disponibili e delle testimonianze raccolte.

Un recente lavoro (Bruni e Medigliani, 2006) ha valutato il rapporto tra portate medie derivate dai canali principali Rivoltana, Vailata, Cremasca e Pandina nella stagione irrigua e le portate di due canali (Tormo e Merlò) alimentati principalmente da fonti secondarie (colature e fontanili). Il raffronto è stato condotto tra le portate della stagione irrigua del 2005 (anno "critico") e quelle mediamente presenti in tale stagione in anni non critici (portata vicina a quella nominale durante tutto il periodo di erogazione).

Mentre l'informazione delle portate derivate è disponibile con un buon grado di attendibilità, per le portate dei canali secondari si è fatto quanto segue:

- per il 2005 sono state misurate le portate istantanee in luglio, tali misure si sono considerate indicative delle portate nella stagione irrigua;
- per l'”anno non critico” le portate si sono stimate con metodi indiretti a partire dai livelli medi nei canali. Questi sono stati misurati in corrispondenza del limitare inferiore della striscia di muschio secco, in più punti distanti tra loro. La corrispondenza tra l'altezza di “anno non critico” è stata confermato da più testimonianze di osservatori.

I valori delle portate medie nella stagione irrigua (8/6-15/8) della somma dei canali primari sono riportati nella Tabella 21 per l'”anno non critico” e per il 2005. Nella medesima tabella si trovano le portate delle rogge Tormo e Merlò misurate e stimate come si è detto.

Tabella 21. Portate medie stagionali della somma dei canali principali e delle rogge citate nel testo [m^3/s].

	Primari (totale)	Tormo	Merlò
”anno non critico”	25.37	2.71	0.73
anno 2005	19.96	1.26	0.37

Il grafico in Figura 46 riporta i valori delle portate di roggia (normalizzate rispetto alle portate di riferimento) contro le portate dei canali principali; i punti risultano molto correlati.

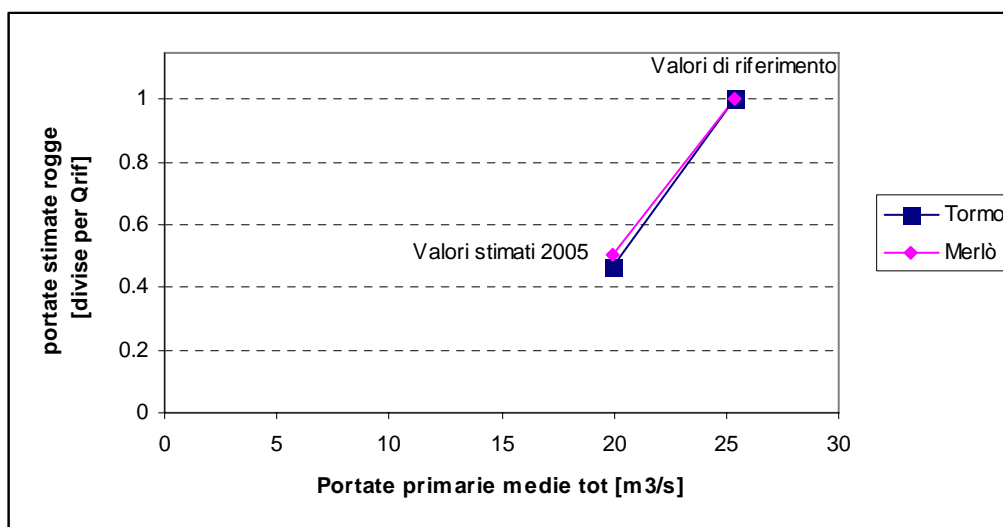


Figura 46. Correlazione delle portate medie stagionali della somma dei canali principali e delle rogge citate nel testo.

In conclusione si è stimato che per una riduzione dei volumi complessivi dei canali principali attorno al 21% (da 25 a 20 m^3/s) si è osservata una diminuzione delle portate delle rogge indicativamente attorno al 50% (49 e 54% rispettivamente).

Ammesso che in corrispondenza della portata nominale dei canali si abbia la "portata nominale dei colli", occorre scegliere una legge che formalizzi questa relazione e che garantisca risultati che collimano con i dati indicati dal CIC.

Dovendo lavorare con dati giornalieri occorre inoltre che la relazione possa produrre serie giornaliere e occorre pertanto assumere che quanto è stato valutato per un'intera stagione irrigua possa essere adottato su scale temporali giornaliere (cosa senz'altro vera in media) e

quindi legare le portate giornaliere derivate e di colò.

Si è scelto di adottare una relazione tra portate derivate e portate di colò del tipo:

$$(3.17) Q_{c,t} = \eta_{c,t} \cdot Q_t$$

dove $Q_{c,t}$ è la portata del colò al giorno t , e risulta proporzionale alla portata dei canali Q_t (eventualmente questa può essere una loro frazione costante), tramite una funzione $\eta_{c,t}$. Per la funzione $\eta_{c,t}$ è stata scelta una legge lineare già introdotta nel Paragrafo 3.1.3 e sotto riportata per completezza.

$$(3.18) \eta_{c,t} = \begin{cases} 0 & \text{se } Q_t \leq Q_{s,t} \\ \eta_c^{MAX} \frac{Q_t - Q_{s,t}}{Q_t^{MAX} - Q_{s,t}} & \text{se } Q_t > Q_{s,t} \end{cases}$$

Per l'area di Cremona la relazione è stata parametrizzata adottando:

$$Q_t^{MAX} = \text{portata nominale};$$

$$Q_{s,t} = \frac{1}{2} Q_t^{MAX};$$

$$\eta_c^{MAX} = 0.15.$$

Il valore di $Q_{s,t}$ segna il punto in cui la portata dei coli si azzera. Con questi valori dei parametri si ottiene che per una portata dei canali pari al 79% del nominale (-21%) la portata di colò sia pari al 46% circa della portata massima di colò (-54%), in accordo con i dati sperimentali. Il valore del parametro η^{max} (la frazione massima della portata derivata che si trasforma in colò) è stato scelto in base a raffronti tra le diverse grandezze in gioco. In Figura 47 si osserva il valore di $Q_{c,t}$ al variare di Q_t secondo la curva adottata (per un canale ideale che abbia portata nominale pari a 100), in rosso sono riportati i corrispettivi dei punti di taratura forniti dal lavoro del CIC.

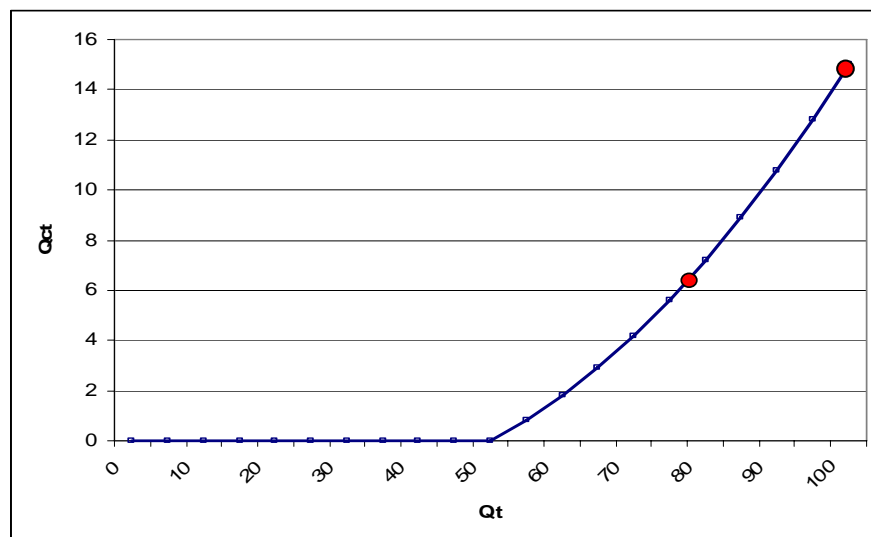


Figura 47. Rapporto tra portate di colò (Q_c) e portate derivate (Q_t) per un canale ideale di portata 100; in rosso i corrispettivi dei punti di taratura fornito dal CIC.

3.3 Risultati delle simulazioni

3.3.1 Simulazione dello stato di fatto

La simulazione dello stato di fatto è stata condotta utilizzando l'uso del suolo di riferimento, relativo all'anno 2004 (si veda il Paragrafo 3.2.1), e gli ingressi costituiti dalle serie giornaliere delle grandezze meteorologiche e delle portate derivate per gli anni dal 1993 al 2005. Nel seguito verranno illustrati in dettaglio i risultati relativi agli anni 2001-2003, utilizzati per la calibrazione del modello dell'acquifero.

Per quanto riguarda i prelievi da pozzi aziendali si è deciso di operare seguendo due ipotesi:

- la prima è che i pozzi aziendali siano diffusi nel territorio, soprattutto nelle zone con ridotta dotazione irrigua da derivazioni da corsi d'acqua, e siano in grado di integrare le eventuali carenze di fornitura irrigua da parte del complesso delle altre fonti (scenario S0a);
- la seconda è che i pozzi aziendali siano totalmente assenti (scenario S0b).

La prima ipotesi non è del tutto realistica: sebbene il numero di pozzi sia rilevante è ragionevole ritenere che, in alcune zone, la possibilità di approvvigionamento da falda sia ancora limitata. Tuttavia, i parametri che regolano l'attivazione dei pozzi (si vedano le Equazioni 3.5 e 3.8) sono stati fissati in maniera cautelativa, in modo che siano prelevate le portate strettamente necessarie ad evitare condizioni di carenza idrica gravi per le colture; si ritiene quindi, anche sulla base di alcune verifiche che verranno illustrate nel seguito, che i risultati ottenuti secondo questa ipotesi non si discostino molto dalla realtà, perlomeno a scala comprensoriale.

La seconda ipotesi è chiaramente estrema ed irrealistica, essendo nota la presenza di un elevato numero di pozzi irrigui; essa è stata investigata, tuttavia, per fornire un valore limite inferiore delle disponibilità irrigue e quindi di tutte le grandezze legate al bilancio idrologico del suolo (evapotraspirazione e percolazione verso la falda in particolare).

È opportuno sottolineare, inoltre, che lo scenario S0b è stato implementato per la sola porzione centro-settentrionale dell'area di studio (zona N nel seguito); il controllo dell'attivazione dei pozzi irrigui richiede infatti la conoscenza delle serie temporali delle portate giornaliere di tutte le altre fonti (derivazioni da acque superficiali, fontanili e colature), che non è disponibile per la restante porzione del territorio (come illustrato nel Paragrafo 2.5.3). Di conseguenza i due scenari coincidono in quest'area (zona S nel seguito).

3.3.1.1 Scenario S0a

La Figura 48 e la Figura 49 mostrano la distribuzione degli apporti irrigui erogati su campo (al lordo quindi dell'efficienza di adacquamento) per lo scenario S0a, rispettivamente nel caso degli apporti provenienti da derivazioni dai corsi d'acqua, da fontanili e da colature e nel caso degli apporti provenienti da prelievi da pozzi. Risulta evidente che, nel complesso, le derivazioni da acque superficiali, con il contributo di fontanili e colature, costituiscono la fonte principale di approvvigionamento. Tuttavia, il prelievo integrativo attribuibile ai pozzi risulta assai diffuso e piuttosto rilevante in due vaste zone del cremasco, così come nel basso cremonese.

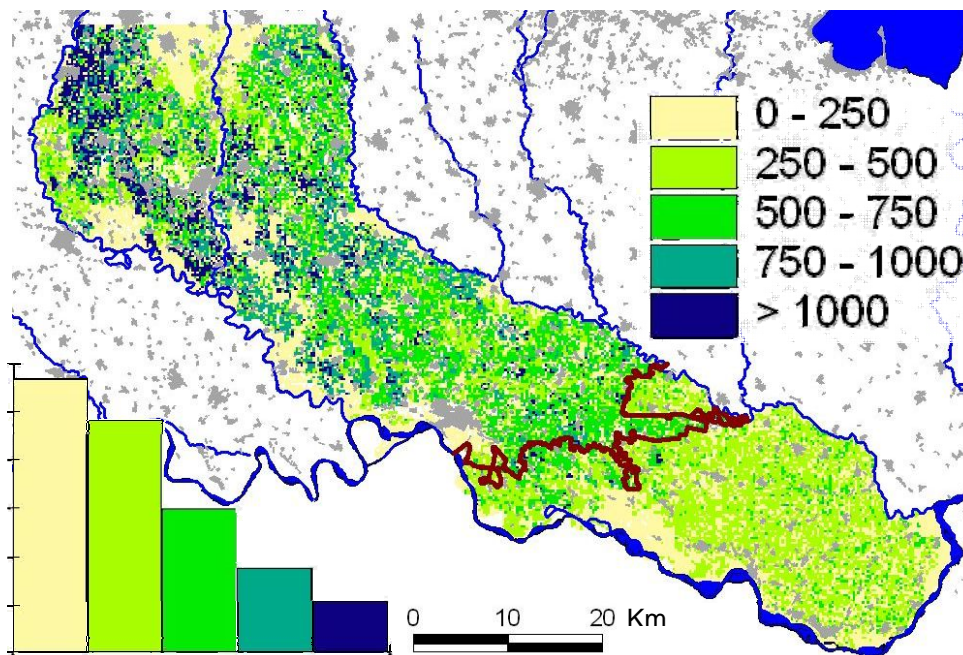


Figura 48. Scenario S0a: apporto irriguo medio annuo (mm/anno) erogato su campo; è escluso l'apporto dei pozzi (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

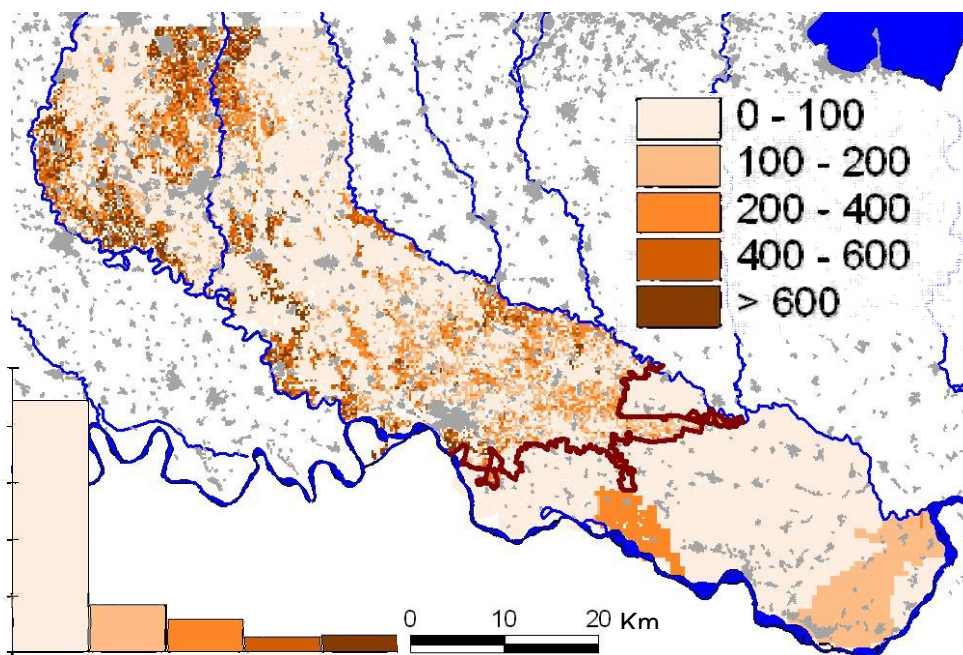


Figura 49. Scenario S0a: apporto irriguo medio annuo (mm/anno) erogato su campo dovuto a prelievi da pozzi (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

Considerando in particolare il territorio del comprensorio Cremasco, si può osservare che la distribuzione dei prelievi di Figura 49 dà luogo ad un prelievo complessivo da pozzi nell'intera area che si attesta su un valore medio nel semestre irriguo di circa $5 \text{ m}^3/\text{s}$, assai prossimo ai $6 \text{ m}^3/\text{s}$ del totale delle concessioni censite, rilevati dall'accurata indagine condotta da Consorzio Adda-Serio (2005). La Figura 50 mostra anche l'andamento stimato dei valori medi mensili, che sfiorano $8 \text{ m}^3/\text{s}$ nei mesi di punta della stagione irrigua.

Un'ulteriore verifica della verosimiglianza dei prelievi da falda stimati dal modello è fornita dai valori ottenuti per il gruppo di pozzi del Consorzio della Media Pianura Bergamasca, posti all'estremità settentrionale dell'area di studio: gli andamenti delle portate emunte (Figura 51) risultano infatti coerenti con le caratteristiche degli impianti (portata di concessione di 2,2 m³/s e portata massima prelevabile di circa 7 m³/s) e con le informazioni sulle ore di funzionamento fornite dal Consorzio stesso.

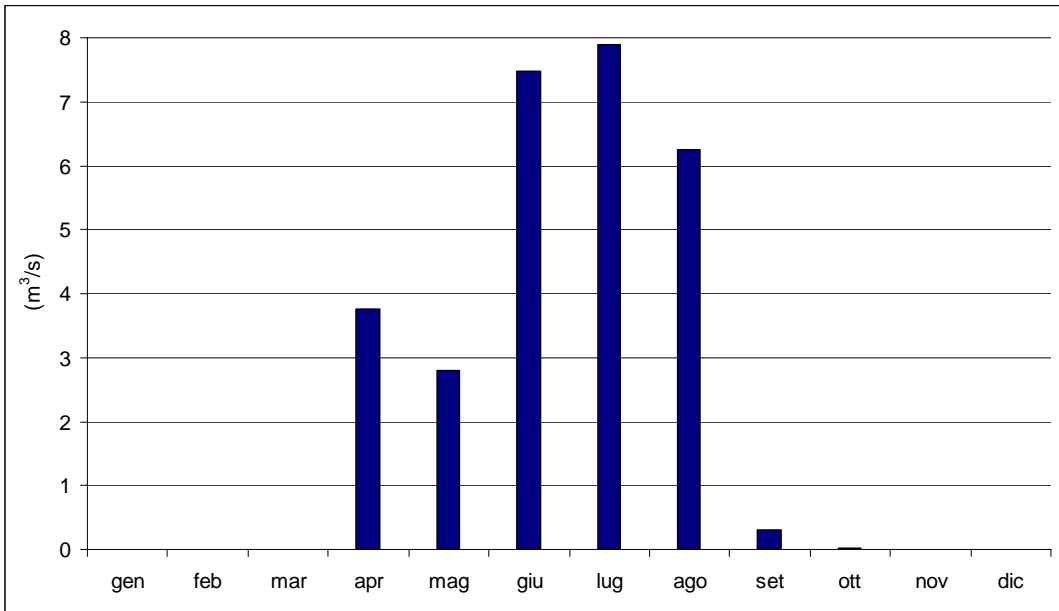


Figura 50. Scenario S0a: valori medi mensili (m³/s) dei prelievi da pozzi aziendali nel comprensorio Cremasco (anni 2001-2003).

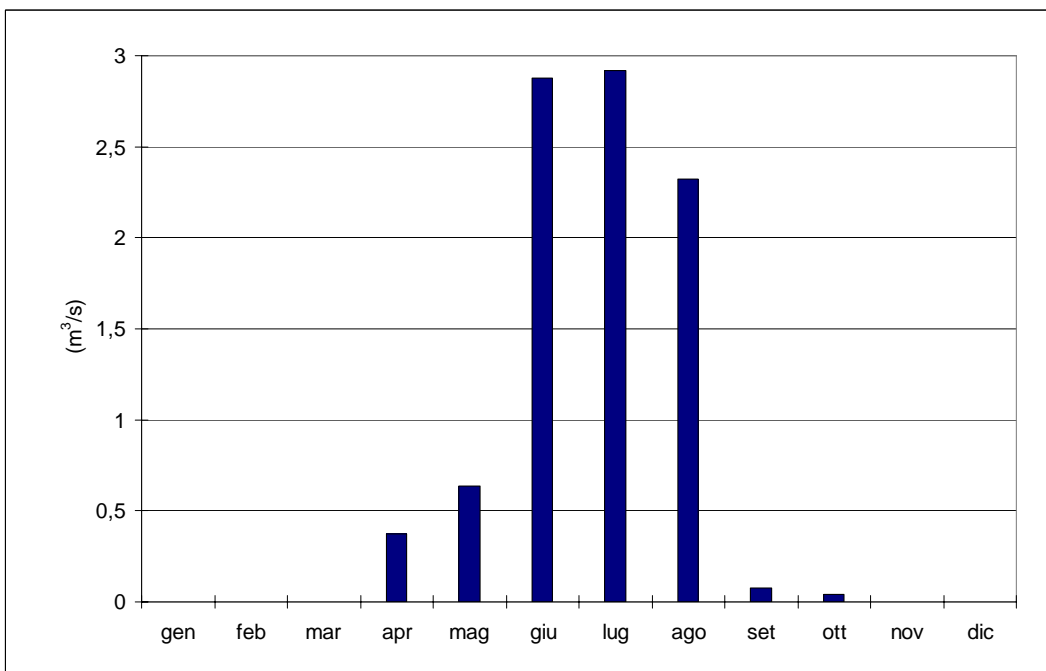


Figura 51. Scenario S0a: valori medi mensili (m³/s) dei prelievi dei pozzi del Consorzio della Media Pianura Bergamasca (anni 2001-2003).

L'apporto combinato dell'irrigazione e delle precipitazioni garantisce il mantenimento di condizioni di umidità del suolo idonee per la crescita delle colture che, infatti, presentano scostamenti del tasso di evapotraspirazione effettivo da quello potenziale molto ridotti su tutto il territorio.

Per il comportamento delle altre grandezze è evidente invece una differenziazione tra la zona meridionale (zona S, nel seguito) e la restante parte dell'area di studio (zona N), a causa alle diverse caratteristiche dei sistemi irrigui: a Sud prevalgono infatti le derivazioni per sollevamento dai corsi d'acqua e forme di irrigazione cosiddette "di soccorso" con somministrazione degli interventi per aspersione, mentre nel centro-Nord le derivazioni sono prevalentemente a gravità e l'irrigazione viene effettuata per scorrimento.

Il diverso comportamento emerge chiaramente osservando, ad esempio, la distribuzione dei flussi di percolazione verso la falda prodotti dagli apporti irrigui su campo e dalle precipitazioni (Figura 52). I maggiori flussi di percolazione si localizzano nelle zone dove un insieme di fattori concomitanti concorrono a renderli particolarmente elevati: presenza di suoli a tessitura grossolana, irrigazione per scorrimento ed elevate disponibilità idriche.

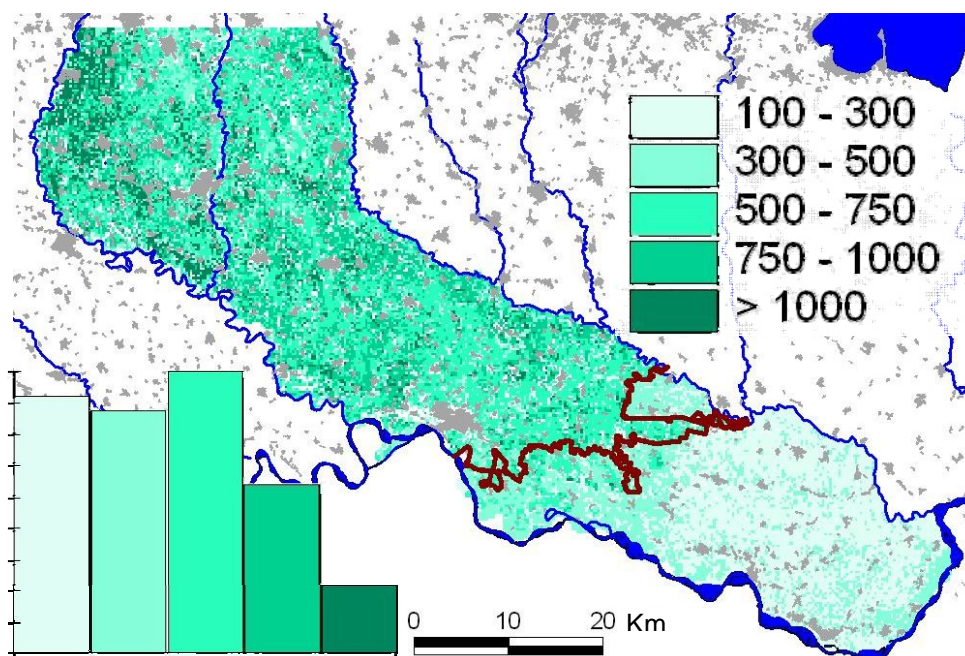


Figura 52. Scenario S0a: flusso di percolazione medio (mm/anno) verso la falda acquifera superficiale (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

Interessante è anche l'analisi dell'andamento temporale dei flussi, aggregati spazialmente. La Figura 53 mostra gli andamenti delle medie mensili dell'apporto irriguo totale su campo (tutte le fonti, compresi i pozzi), dell'evapotraspirazione delle colture e della precipitazione, relativamente all'intera zona N. Sono evidenti gli andamenti in controfase delle precipitazioni rispetto sia all'evapotraspirazione che all'irrigazione. Evidentemente l'apporto di quest'ultima è fondamentale per consentire gli intensi flussi evapotraspirativi primaverili ed estivi delle colture.

Andamenti del tutto analoghi si riscontrano anche nella zona Sud (Figura 54), ma con un maggiore peso relativo degli apporti di pioggia rispetto a quelli irrigui, a causa dei già citati differenti caratteri dei sistemi irrigui. Questi ultimi influenzano anche l'entità dei flussi di percolazione totale (incluse le perdite dei canali), decisamente più intensi nella zona N nei mesi primaverili ed estivi (Figura 55e Figura 56).

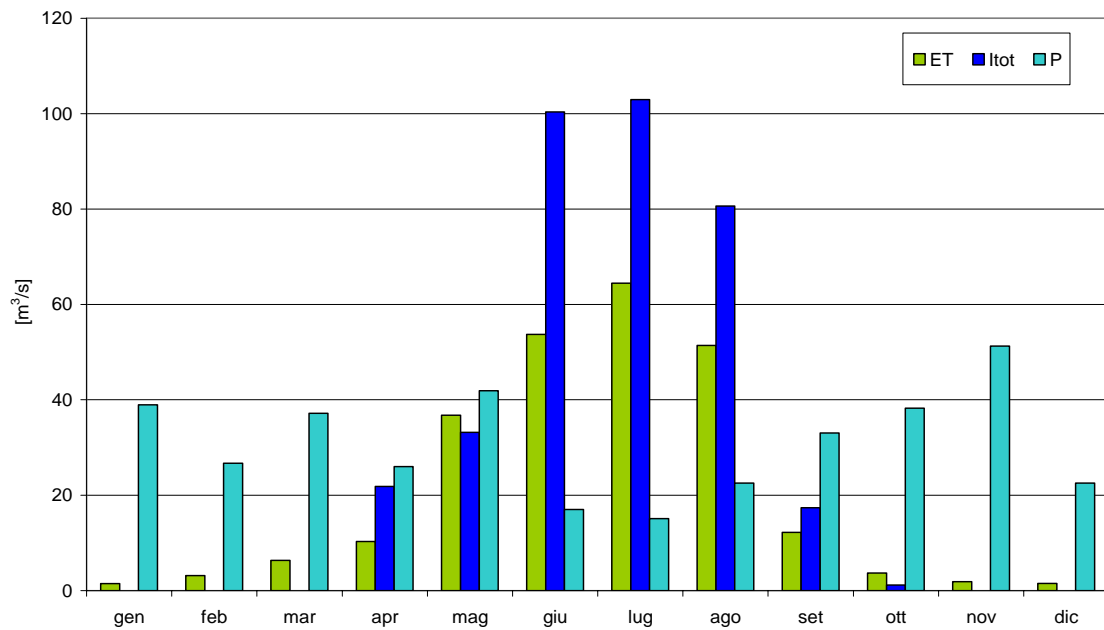


Figura 53. Scenario S0a– zona N: valori medi mensili (m^3/s) di evapotraspirazione (ET), irrigazione totale (Itot) e precipitazione (P) (anni 2001-2003).

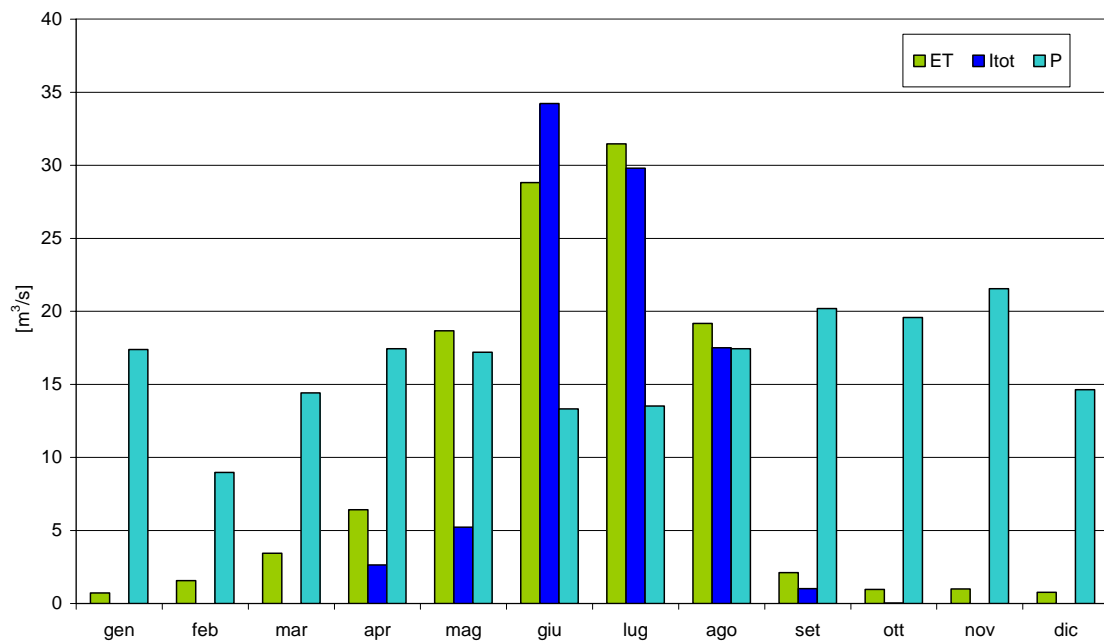


Figura 54. Scenario S0a– zona S: valori medi mensili (m^3/s) di evapotraspirazione (ET), irrigazione totale (Itot) e precipitazione (P) (anni 2001-2003).

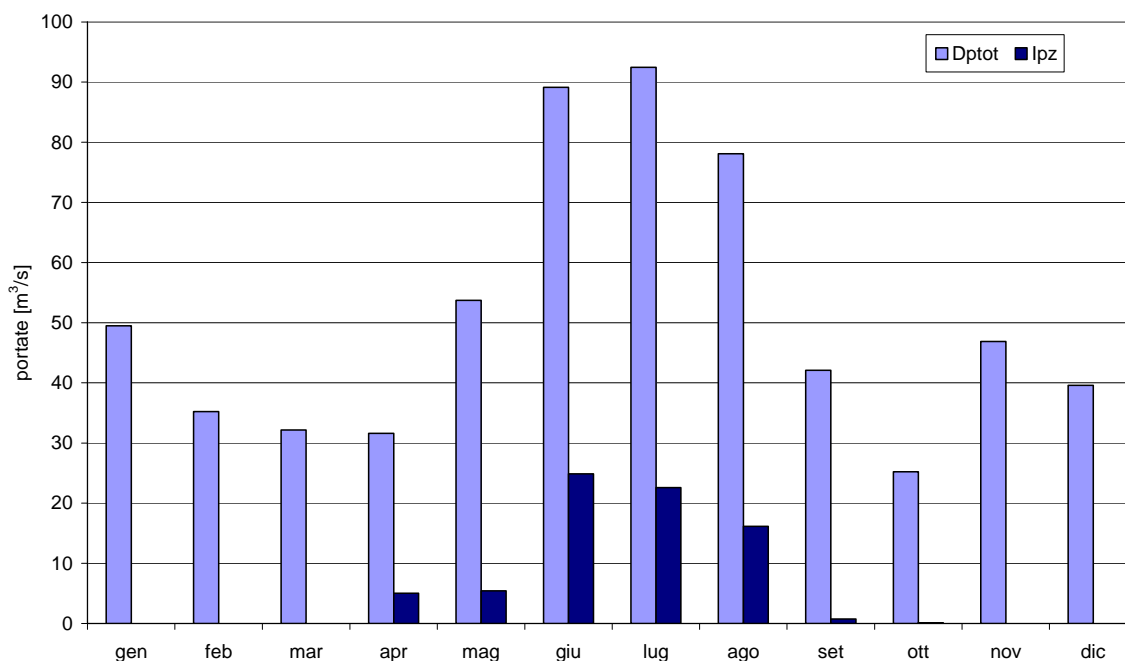


Figura 55. Scenario S0a– zona N: valori medi mensili (m^3/s) della percolazione totale (Dptot) e dei prelievi da falda (Ipz) (anni 2001-2003).

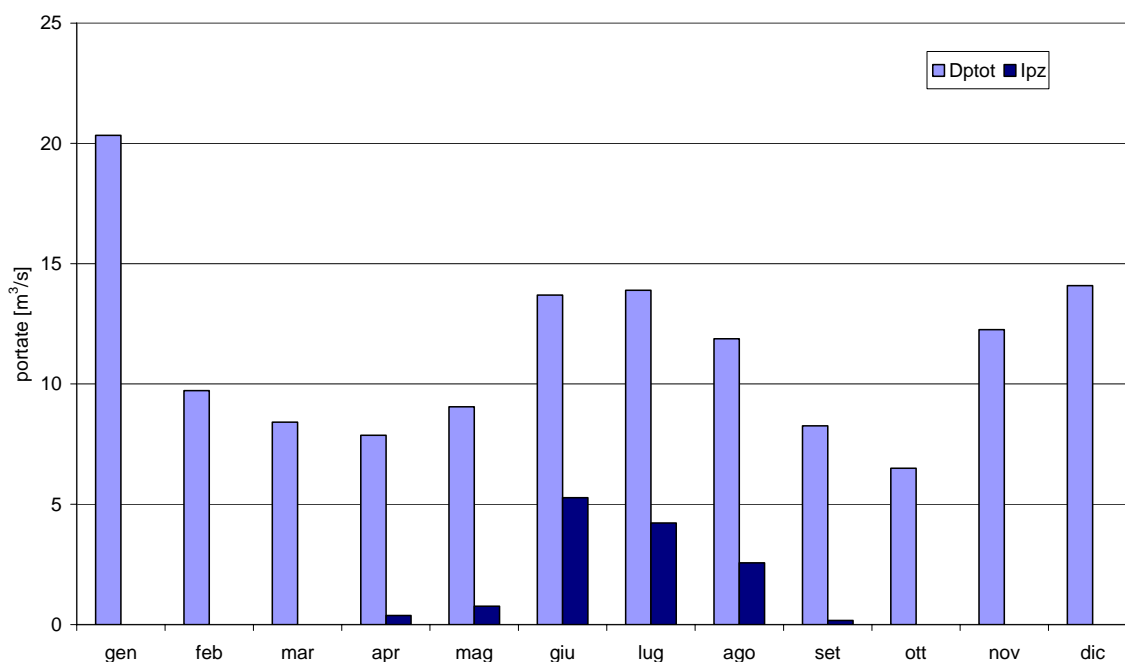


Figura 56. Scenario S0a – zona S: valori medi mensili (m^3/s) della percolazione totale (Dptot) e dei prelievi da falda (Ipz) (anni 2001-2003).

Nelle Figure 52 e 53 sono riportati anche gli andamenti, stimati dal modello, dei prelievi dei pozzi ad uso irriguo (la cui distribuzione spaziale è già stata mostrata in Figura 47). Essi integrano le disponibilità irrigue fornite da derivazioni da corsi d'acqua, fontanili e colature, concorrendo alla soddisfazione dei fabbisogni irrigui. L'entità delle diverse fonti

è rappresentata in Figura 57 con riferimento alla zona N, che beneficia in modo più significativo di fontanili e colature. È evidente che l'apporto di queste fonti, che rappresentano sostanzialmente un riuso delle acque prelevate dalle fonti dirette, è piuttosto significativo: valutando un'efficienza di uso delle acque a scala dell'intera zona N come rapporto tra i fabbisogni colturali (ET in Figura 53) e le portate prelevate dalle sole fonti dirette (derivazioni da corsi d'acqua e pozzi) si ottiene un valore superiore a 0,4 nei mesi di punta della stagione irrigua (giugno-agosto). Tale valore è sicuramente stimato per eccesso, poiché la valutazione dovrebbe comprendere anche i territori della bergamasca e le relative portate irrigue che contribuiscono ad innescare e mantenere i flussi di risorgiva. Tuttavia, esso indica chiaramente che l'efficienza globale dei sistemi irrigui attuali, su scala sufficientemente vasta da ricomprendere i benefici dei riusi interni, risulta nettamente superiore al valore "teorico" (0,26 nel caso in esame), che si ottiene semplicemente come prodotto delle efficienze di adduzione-distribuzione (0,65) e di adacquamento (0,4).

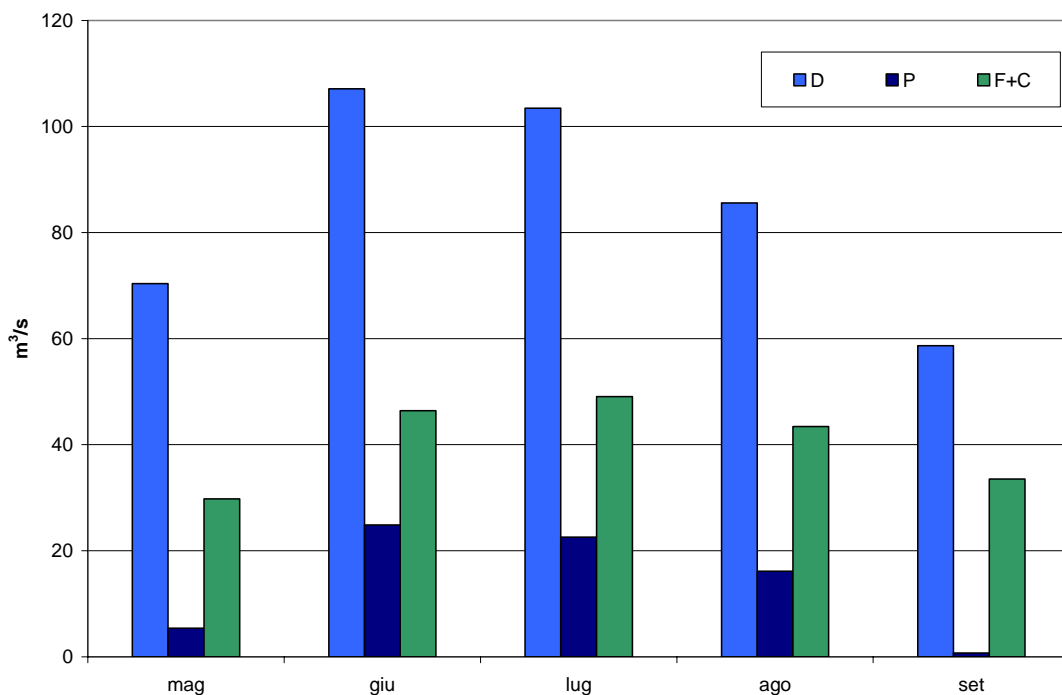


Figura 57. Scenario S0a – zona N: valori medi mensili (m^3/s) delle diverse fonti irrigue: derivazioni da corsi d'acqua (D), pozzi (P), fontanili e colature (F+C); anni 2001-2003.

È utile, infine, operare un confronto tra i valori stimati dal modello dei prelievi dei cinque impianti di sollevamento dai fiumi Oglio e Po che alimentano la zona S e le portate caratteristiche degli impianti stessi. I valori stimati della portata totale mensile raggiungono $25 m^3/s$ (Figura 58), mentre il volume sollevato annualmente risulta di quasi $200 \cdot 10^6 m^3$; entrambi i valori sono del tutto coerenti con la portata delle pompe ($39 m^3/s$) e con il volume annuo sollevato ($192 \cdot 10^6 m^3$) riportati in Regione Lombardia (2004).

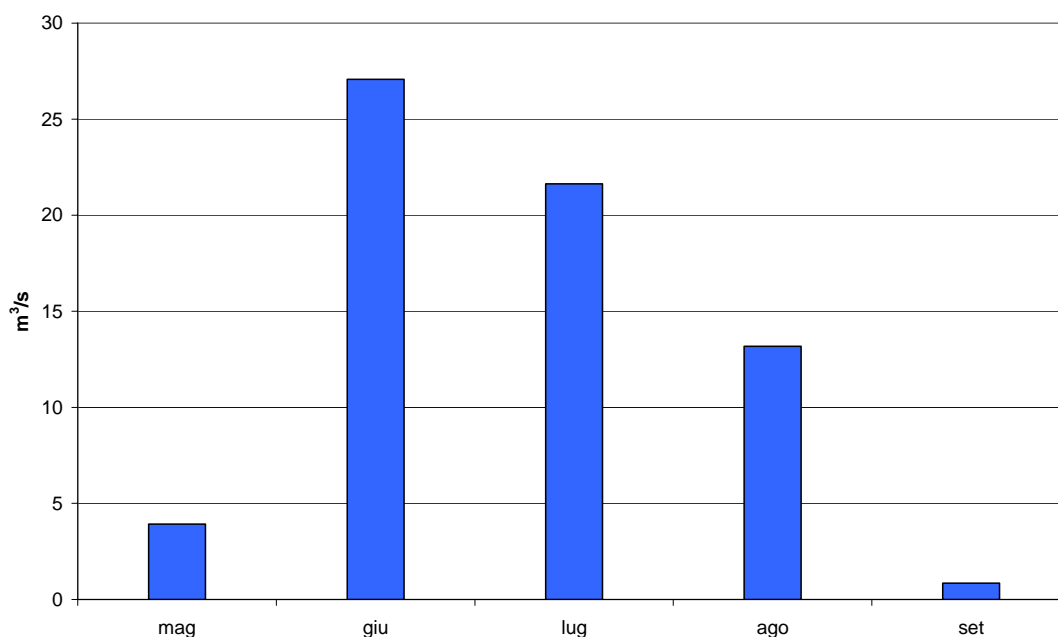


Figura 58. Scenario S0a – zona S: valori medi mensili (m^3/s) delle portate totali dei principali impianti di sollevamento; anni 2001-2003.

3.3.1.2 Scenario S0b

L'ipotesi di assenza di prelievi da falda ad uso irriguo nella zona N non modifica, se non marginalmente, la distribuzione dell'irrigazione alimentata dalle fonti disponibili (derivazioni da acque superficiali, fontanili e colature), ottenuta per lo scenario precedente (si confrontino la Figura 48e la Figura 59).

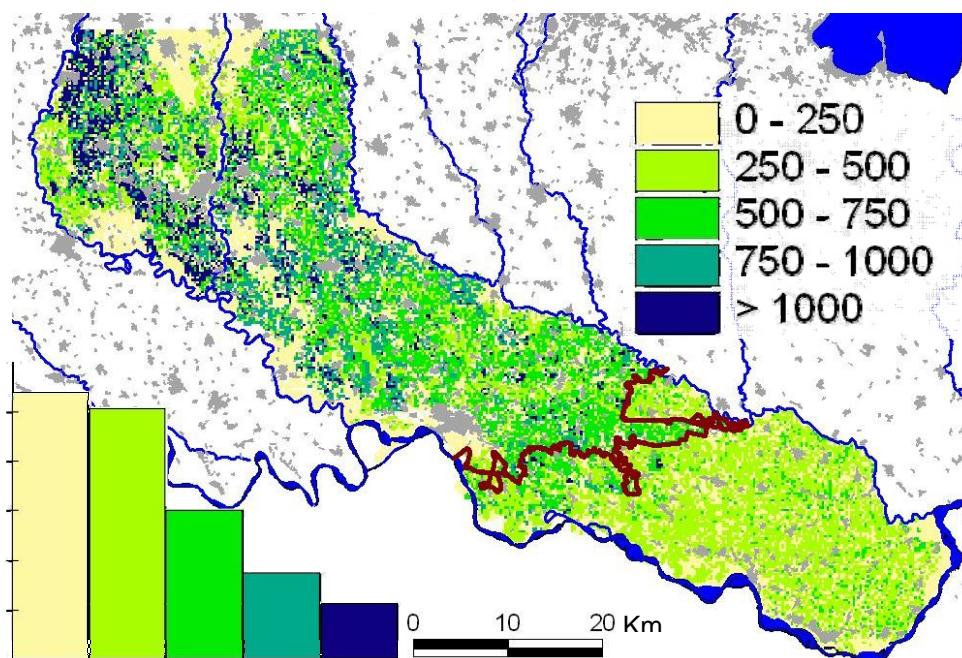


Figura 59. Scenario S0b: apporto irriguo medio annuo (mm/anno) erogato su campo; è escluso l'apporto dei pozzi aziendali (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

Evidentemente, però, nelle zone private dell'integrazione da pozzi si manifestano carenze nella soddisfazione dei fabbisogni idrici delle colture, come è ben evidenziato sia dalla Figura 60 - che mostra gli scostamenti dell'evapotraspirazione effettiva da quella potenziale (maggiori sono i valori più marcato è lo stress idrico a cui sono sottoposte le colture) - sia dalla Figura 61, che riporta gli andamenti mensili di irrigazione, precipitazione ed evapotraspirazione.

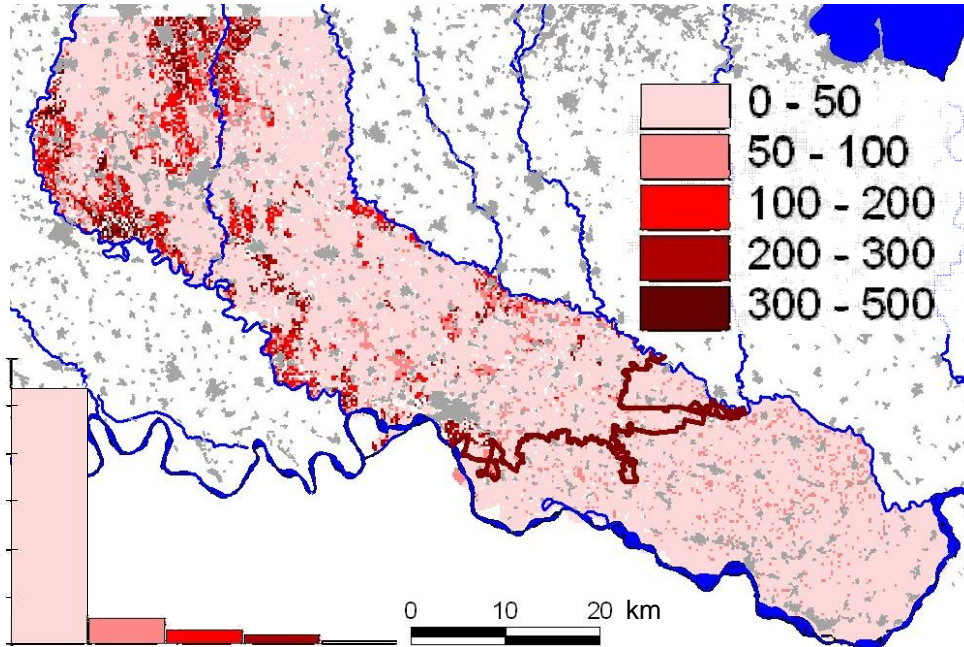


Figura 60. Scenario S0b: differenza tra il valore medio annuo dell'evapotraspirazione potenziale e di quella effettiva (mm/anno) (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

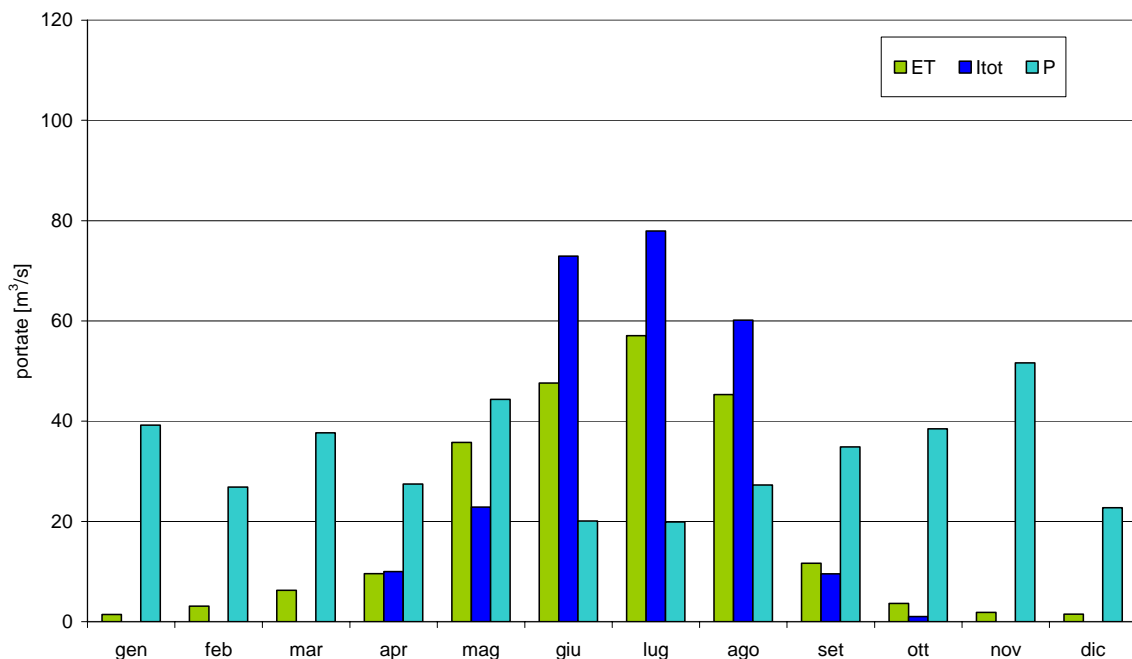


Figura 61. Scenario S0b – zona N: valori medi mensili (m³/s) di evapotraspirazione (ET), irrigazione totale (Itot) e precipitazione (P) (anni 2001-2003).

La riduzione degli apporti irrigui in alcune zone si riflette in una diminuzione dei flussi di percolazione verso la falda, evidenti sia a livello dei valori distribuiti (Figura 62) sia aggregando i flussi sull'intera area. (Figura 63).

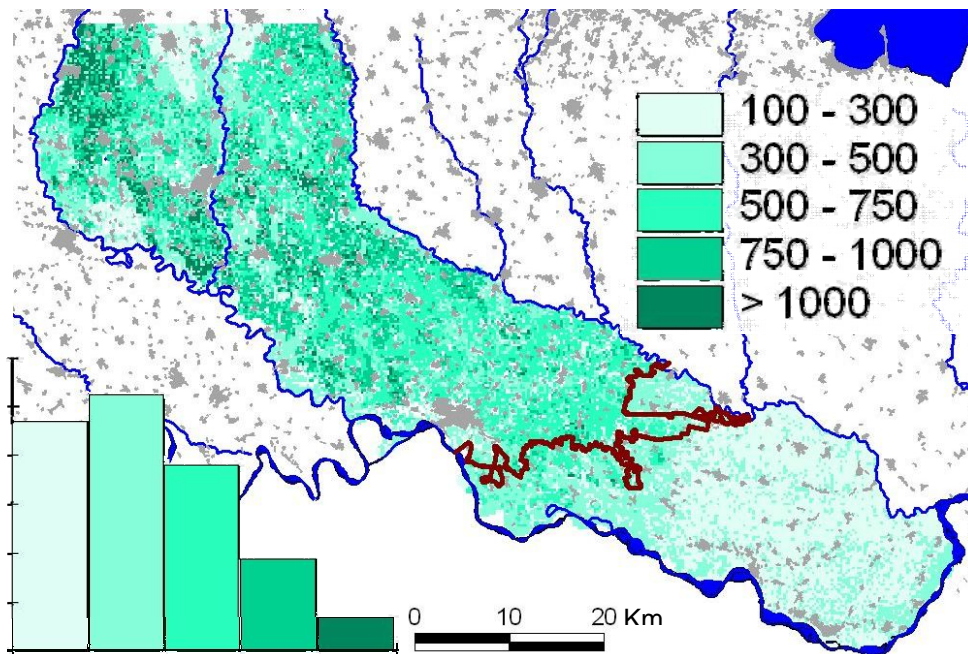


Figura 62. Scenario S0b: flusso di percolazione medio (mm/anno) verso la falda acquifera superficiale (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

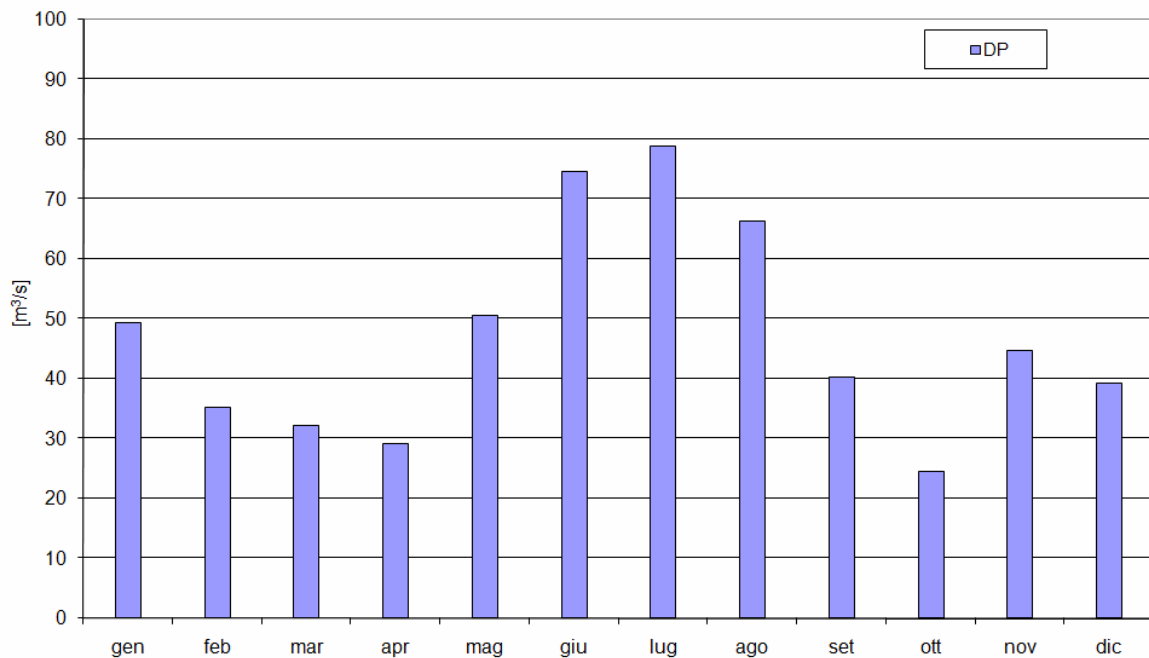


Figura 63. Scenario S0b – zona N: valori medi mensili (m³/s) della percolazione totale (anni 2001-2003).

3.3.2 *Simulazione degli effetti di interventi sul sistema irriguo*

L'applicazione del modello alla simulazione dello stato di fatto, illustrata nel Paragrafo precedente, ha lo scopo principale di verificarne le prestazioni e di rendere i risultati il più possibile coerenti con i dati osservativi disponibili. Evidentemente questa operazione favorisce anche la sistematizzazione e l'approfondimento delle conoscenze sulla dinamica delle grandezze idrologiche ed apre la strada all'utilizzo del modello per la valutazione delle conseguenze di variazioni della situazione attuale. Queste possono derivare, ad esempio, da alterazioni degli andamenti delle variabili meteorologiche (cosiddetti scenari di cambio climatico), da riduzioni delle portate delle derivazioni ad uso irriguo da corsi d'acqua superficiali (derivanti sia da cause naturali, sia da modifiche delle concessioni), o ancora da variazioni dell'uso del suolo (indotte, ad esempio, dai nuovi criteri di erogazione degli incentivi PAC). È possibile, inoltre, considerare una vasta gamma di opzioni legate sia ad interventi strutturali di riordino o riassetto dei sistemi irrigui, sia all'introduzione di diversi criteri nella gestione dei sistemi stessi.

Nella ricerca sono stati presi in considerazione due scenari di quest'ultimo tipo:

- il primo (scenario S1) riguarda una profonda modificazione dei sistemi irrigui, che prevede un sostanziale incremento dell'efficienza di adduzione e la sostituzione dell'irrigazione per scorrimento con l'aspersione mediante impianti ad elevata efficienza;
- il secondo (scenario S2) è ancora più radicale e prevede la realizzazione di reti di adduzione ad altissima efficienza di trasporto (verosimilmente reti tubate a medio-bassa pressione) ed alla diffusione di metodi di adacquamento dosati anch'essi ad altissima efficienza d'uso dell'acqua da parte delle colture (irrigazione localizzata e pratiche irrigue ottimali) con distribuzione a domanda; rappresenta quindi la condizione di massima variazione possibile rispetto allo stato di fatto ed in quanto tale si è ritenuto interessante investigarne gli effetti sull'assetto idrologico del territorio.

In entrambi i casi come uso del suolo è stato mantenuto quello di riferimento (anno 2004) e sono state fornite in ingresso le serie giornaliere delle grandezze meteorologiche 2001-2003. L'analisi si è focalizzata esclusivamente sui processi idrologici ed idrogeologici (illustrati rispettivamente nei Paragrafi seguenti e nel Paragrafo 6.2.2) e non ha preso in considerazione gli aspetti socio-economici ed ambientali; i risultati ottenuti costituiscono evidentemente un presupposto per l'approfondimento di questi ultimi.

3.3.2.1 Scenario S1

La Figura 64 mostra la distribuzione degli apporti irrigui erogati su campo nell'ipotesi di utilizzo di metodi di adacquamento con buona efficienza (circa 70%). L'andamento delle corrispondenti portate di derivazione (al netto delle eventuali perdite di adduzione-distribuzione) è illustrato in Figura 65, dove viene confrontato con le portate effettivamente derivate nel triennio di riferimento. Si può notare che una riduzione di queste ultime vicina al 30% circa risulta compatibile con la piena soddisfazione dei fabbisogni, anche in assenza di altre fonti, nell'ipotesi di perfetta efficienza delle reti di adduzione-distribuzione (di converso, si può anche dedurre che, mantenendo le attuali portate, perdite di rete inferiori al 30% sono compatibili con le portate richieste su campo).

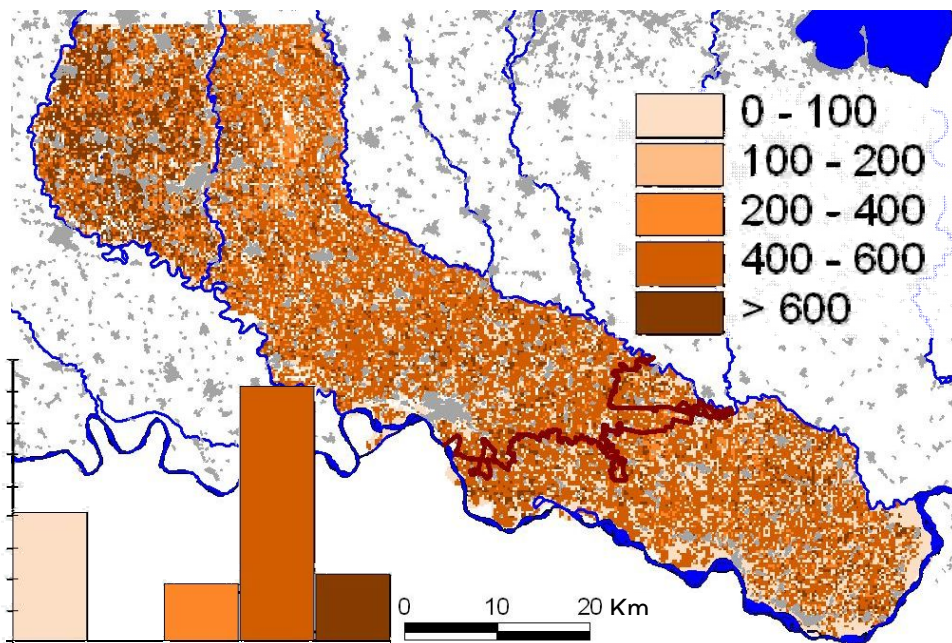


Figura 64. Scenario S1: apporto irriguo medio annuo (mm/anno) erogato su campo (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

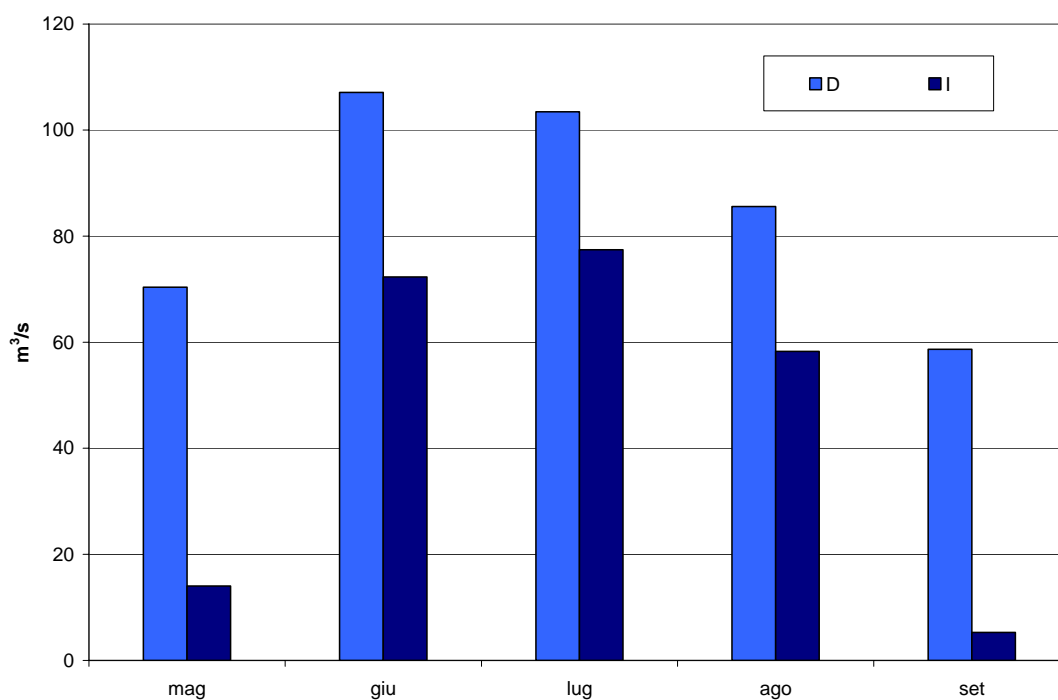


Figura 65. Scenario S1 – zona N: confronto tra le portate medie mensili necessarie per la soddisfazione dei fabbisogni culturali (I) e quelle effettivamente derivate (D) nel triennio di riferimento (2001-2003).

Il massiccio incremento dell'efficienza del sistema irriguo rispetto allo stato di fatto deprime gli apporti di percolazione verso la falda (Figura 66), particolarmente nei mesi primaverili ed estivi (Figura 67). Se si considera che le conseguenze sono notevoli riduzioni delle portate sia dei fontanili (si veda il Paragrafo 6.2.2) sia delle colature, risulta chiaro perché un incremento "apparente" dell'efficienza del sistema irriguo dal valore

teorico di 0.24 per lo stato di fatto (prodotto dell'efficienza di adduzione-distribuzione, posta pari a 0.65, per quella di adacquamento, pari a 0.4) a 0.7 per lo scenario (1 per l'adduzione-distribuzione e 0.7 per l'adacquamento) si traduca in un incremento effettivo da 0.4 a poco più di 0.7, considerando l'intera zona N.

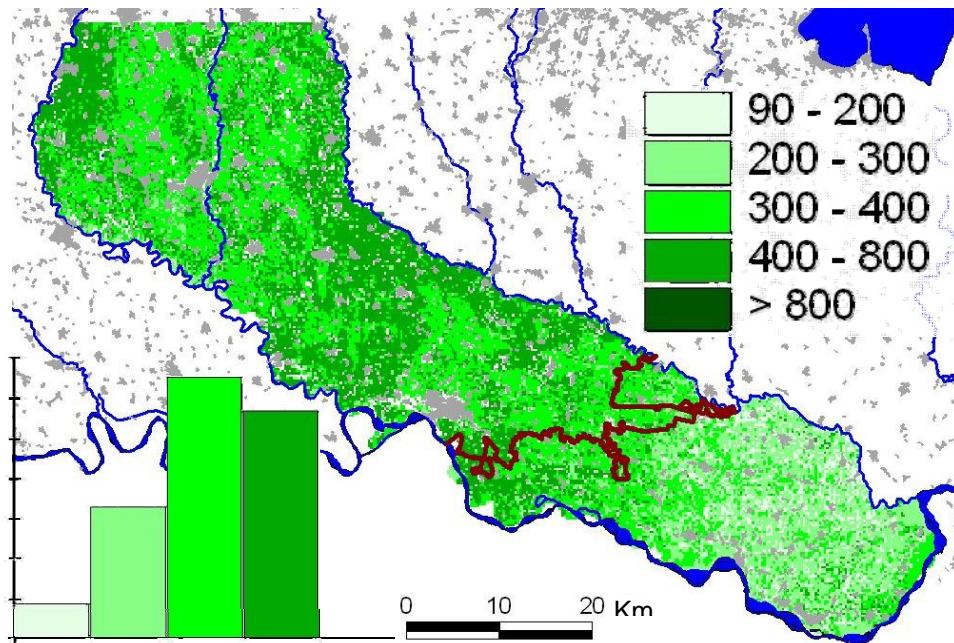


Figura 66. Scenario S1: flusso di percolazione medio (mm/anno) verso la falda acquifera superficiale (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

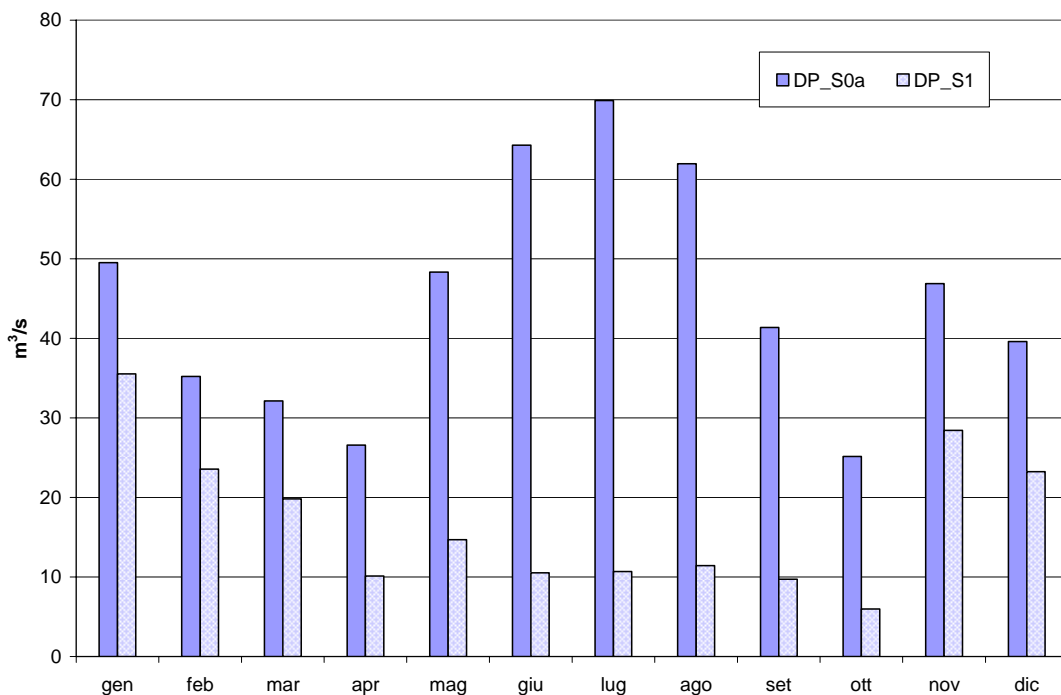


Figura 67. Zona N: confronto tra i flussi medi mensili di percolazione per lo scenario S1 (in assenza di perdite nelle reti di adduzione-distribuzione) e per lo scenario S0a (per quest'ultimo è rappresentata la percolazione netta, differenza tra la percolazione totale ed i prelievi dei pozzi ad uso irriguo) nel triennio di riferimento (2001-2003).

3.3.2.2 Scenario S2

La Figura 68 mostra la distribuzione degli apporti irrigui erogati su campo; poiché lo scenario ipotizza efficienze unitarie di tutte le componenti del sistema irriguo, essi coincidono con i fabbisogni colturali, nonché con l'aliquota della portata complessivamente derivata dalle diverse fonti che viene erogata, senza perdite, nelle diverse zone dell'area di studio.

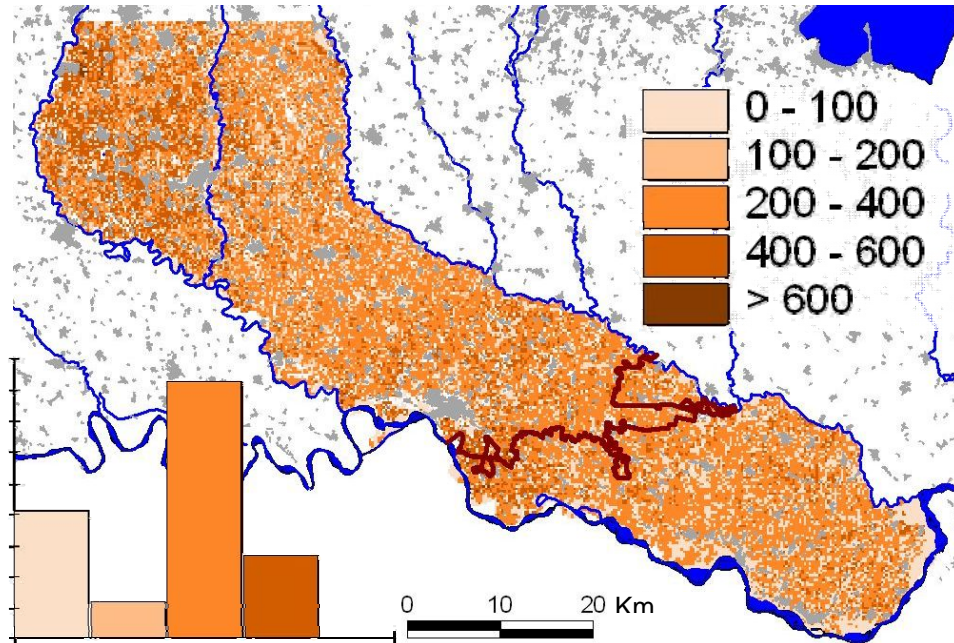


Figura 68. Scenario S2: apporto irriguo medio annuo (mm/anno) erogato su campo (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

La portata che è necessario derivare è quindi quella strettamente necessaria per la soddisfazione dei fabbisogni colturali e risulta, come era lecito attendersi, significativamente inferiore alla somma delle portate effettivamente derivate negli anni di riferimento (Figura 69). Le sole derivazioni da acque superficiali sono quindi ampiamente sufficienti, anche in assenza di colature (che evidentemente non sussistono nelle ipotesi dello scenario) e del contributo dei fontanili (il cui apporto praticamente si annulla, secondo le valutazioni riportate nel Paragrafo 6.2.2).

L'assenza di perdite del sistema irriguo mortifica però gli apporti di percolazione verso la falda (Figura 70), che nei mesi primaverili ed estivi risultano di gran lunga inferiori rispetto allo stato di fatto (Figura 71). I flussi di percolazione seguono evidentemente l'andamento delle precipitazioni, essendo il contributo degli apporti irrigui praticamente trascurabile. Gli effetti di queste variazioni sull'assetto dell'acquifero sono anch'essi analizzati nel Paragrafo 6.2.2.

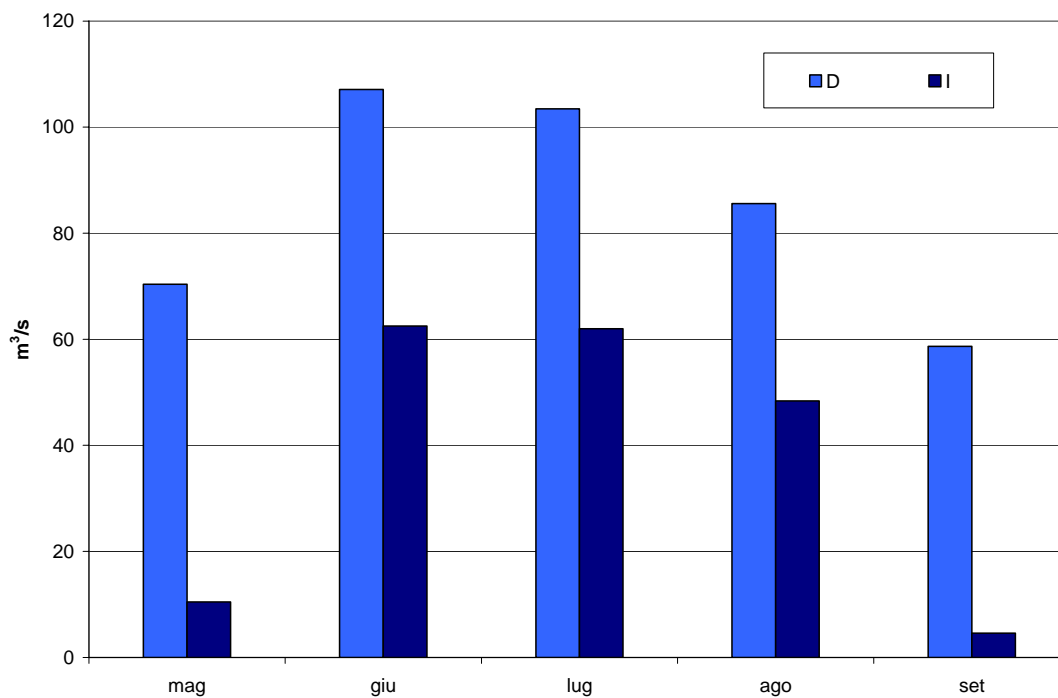


Figura 69. Scenario S2 – zona N: confronto tra le portate medie mensili necessarie per la soddisfazione dei fabbisogni culturali (I) e quelle effettivamente derivate (D) nel triennio di riferimento (2001-2003).

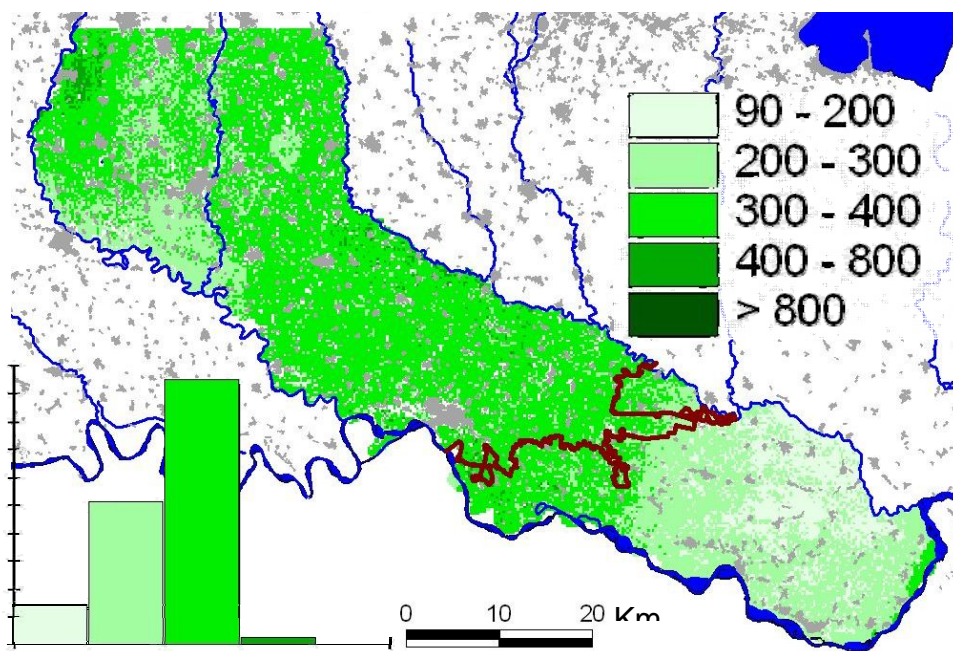


Figura 70. Scenario S2: flusso di percolazione medio (mm/anno) verso la falda acquifera superficiale (anni 2001-2003); in tratto rosso è evidenziato il confine tra zona N e zona S.

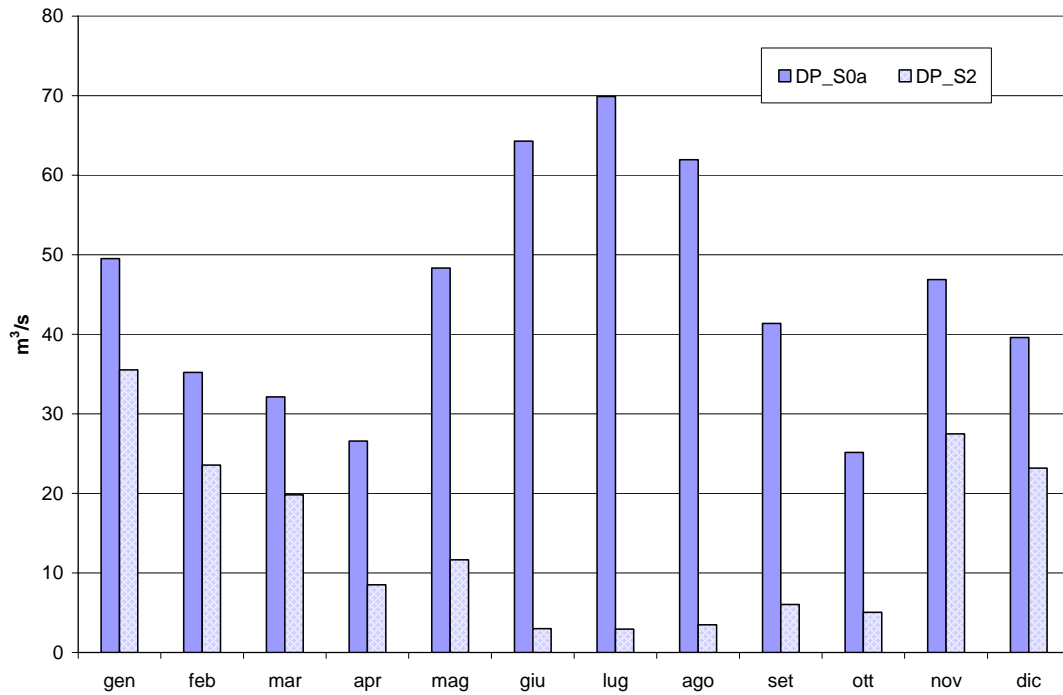


Figura 71. Zona N: confronto tra i flussi medi mensili di percolazione per lo scenario S2 e per lo scenario S0a (per quest'ultimo è rappresentata la percolazione netta, differenza tra la percolazione totale ed i prelievi dei pozzi ad uso irriguo) nel triennio di riferimento (2001-2003).

4 Elaborazione di carte tematiche e modello concettuale dell'acquifero

La messa a punto di un modello matematico di simulazione per la gestione del flusso idrico in un sistema acquifero richiede l'esecuzione dei seguenti passaggi (Giudici, 2001):

1. la messa a punto di un modello concettuale dell'acquifero, cioè la determinazione della geometria del dominio, della struttura fisica del sistema acquifero, della tipologia delle condizioni al contorno, dei principali meccanismi di flusso, della ricarica, ecc.;
2. la determinazione delle equazioni fisico-matematiche, della loro discretizzazione, e lo sviluppo o la scelta di codici di calcolo per la soluzione di tali equazioni discrete;
3. la calibrazione del modello matematico;
4. la validazione del modello matematico.

Nei primi Paragrafi di questo Capitolo vengono descritte le elaborazioni dei dati per formulare il modello concettuale e rappresentare qualitativamente la dinamica del flusso idrico del sistema acquifero di Cremona. Il Paragrafo 4.7 descrive invece il modello concettuale.

Per la preparazione del modello concettuale del sistema acquifero oltre ai dati elencati nel Capitolo 2 sono state considerate alcune informazioni provenienti dalle seguenti fonti:

- sezioni litostratigrafiche ricavate dai dati di pozzi per acqua ed interpolate da Beretta *et al.* (1992).
- “Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia” (Regione Lombardia, Eni Divisione Agip, 2002); in particolare la cartografia relativa ai gruppi acquiferi A, B, C è stata scaricata dal portale web della Regione Lombardia (GAP).
- Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000 della Regione Lombardia (CTR).
- Carta Geologica d'Italia in scala 1:100000 (fogli 46, 60, 61, 62) del Servizio Geologico d'Italia, rilevata nei primi anni '60 e utilizzata per controllare l'evoluzione di alcuni aspetti idrogeologici negli ultimi 50 anni.

Questi dati sono stati rielaborati e rappresentati in tavole in scala 1:250000 elencate in Appendice 9.4 e allegate a questa relazione. Le tavole, il cui scopo fondamentale è di essere uno strumento per lo sviluppo del modello, possono essere un risultato utile anche per altre attività delle amministrazioni locali, degli enti e delle imprese che operano sulla gestione, protezione e bonifica delle risorse idriche.

Come già ricordato nel Paragrafo 2.6, il sistema acquifero della Provincia di Cremona è stato distinto da Beretta *et al.* (1992) in un acquifero superficiale freatico e in uno più profondo semi-confinato, che tendono a diventare un acquifero monostrato nell'area settentrionale, lungo il corso dell'Adda ed in parte lungo il Po. Evidentemente una tale schematizzazione dipende dall'eterogeneità dell'acquifero e anche dalla scala a cui lo si esamina; uno studio alla scala del pozzo potrebbe utilizzare uno schema idrogeologico con molti più strati, ma le grandezze osservative di riferimento essenziali come la piezometria e le portate estratte o immesse nei vari strati resterebbero ignote, riducendo così lo studio ad un mero esercizio accademico senza alcun riscontro con dati osservativi e quindi senza validità pratica. Nel presente studio si è scelto di esaminare l'acquifero e di modellarne il flusso idrico con maglie quadrate di lato $\Delta x = 500$ m sulla base della distribuzione, della densità e attendibilità dei dati osservativi idrometrici, piezometrici e di sorgente e anche in considerazione degli scopi dello studio. A questa scala si è scelto di schematizzare il sistema acquifero come un bistrato con flusso quasi-tridimensionale, cioè orizzontale nel piano x-y nei due acquiferi e verticale attraverso l'acquitrando che li mette in comunicazione. Le tre unità idrogeologiche (acquifero freatico, acquitrando, acquifero semi-

confinato) sono da considerare come “equivalenti”, nel senso stretto della definizione e cioè che ciascuna di esse è idraulicamente equivalente alle corrispondenti formazioni geologiche multistrato, poiché con condizioni al contorno uguali, si lascia attraversare dallo stesso flusso idrico (Freeze & Cherry 1979, p. 33). Per semplicità nel seguito della relazione si parlerà generalmente di acquifero freatico o semi-confinato, tralasciando spesso l’aggettivo “equivalente”.

4.1 Definizione dell’area di studio

L’area su cui si imposta il dominio del modello (vedi Figura 72) si estende per circa 2000 km² ed è delimitata a ovest dal fiume Adda che scorre in direzione sud-est da Rivolta d’Adda a Crotta d’Adda dove si immette nel fiume Po che delimita la parte sud-orientale della Provincia di Cremona; ad est dal fiume Oglio che scorre in direzione sud-est da Soncino (limite nord orientale della Provincia di Cremona) alla confluenza nel Po nella Provincia di Mantova.

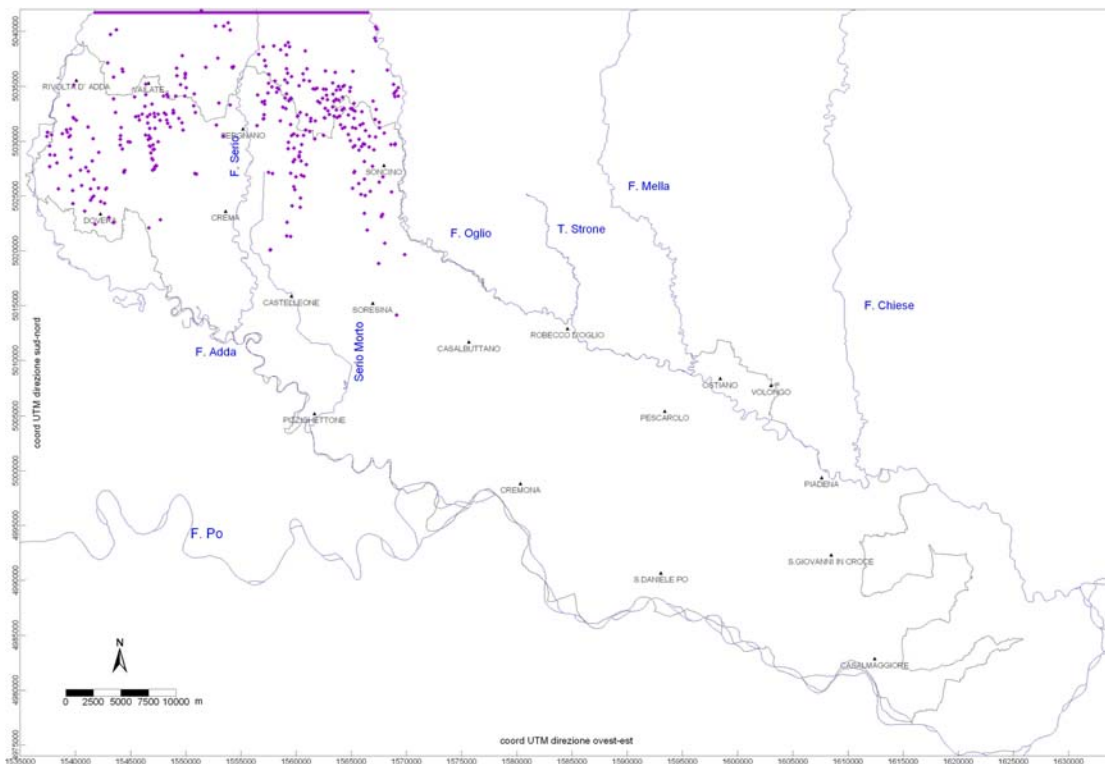


Figura 72. Area del modello.

A nord l’identificazione della chiusura del dominio del modello non è immediata per l’assenza di un limite idrogeologico naturale tra il territorio cremonese ed il bergamasco. Sono state quindi attentamente valutate tre diverse opzioni, derivanti dalle seguenti considerazioni.

- Uno degli elementi caratteristici del territorio di Cremona è la presenza di una fascia di fontanili nell’area settentrionale della Provincia (vedi Paragrafo 2.52.4). Seguendo il tracciato riportato nelle carte isopiezometriche dello studio di Beretta *et al.* (1992) sarebbe possibile individuare una linea sulla quale imporre condizioni al contorno di Dirichlet. Tale scelta sarebbe motivata dall’ipotesi che il livello piezometrico della falda in corrispondenza dell’emergenza dei fontanili sia abbastanza indipendente dalle condizioni del flusso nell’acquifero, e quindi

considerabile come potenziale fisso. Un innalzamento del livello freatico dell'acquifero provoca un innalzamento della portata del fontanile, che quindi ha un effetto di "feedback" sulla piezometria stessa. Ovviamente questo non è più valido se il livello diventa così basso da non permettere l'alimentazione del fontanile.

- Una scelta alternativa potrebbe essere l'inserimento di maglie tampone per creare una fascia di transizione tra l'area modellata e le maglie in cui assegnare un potenziale (condizioni di Dirichlet) ricavato dalle carte isopiezometriche precedentemente citate. Questa ipotesi è giustificabile considerando che con la creazione di una fascia sufficientemente ampia i risultati del modello per il territorio cremonese saranno abbastanza indipendenti dalle condizioni di potenziale fissato imposte. In generale la trasmissività e i termini di sorgente nelle maglie tampone, che sono esterne all'area di studio, sono "artificiali" e stimati con un elevato grado di arbitrarietà.
- Infine, un'ultima ipotesi, che è stata poi adottata per i modelli descritti nel Capitolo 5, è stata quella di fissare il limite settentrionale dei modelli lungo una linea con direzione ovest-est che congiunge i fiumi Adda e Oglio alcuni km a nord della provincia di Cremona (Figura 72). In particolare questo limite è situato in corrispondenza della coordinata Gauss-Boaga 5042000 Nord. Questa scelta è simile alla precedente, in quanto allontanando il bordo del modello dall'area di maggiore interesse si rendono i risultati del modello nell'area cremonese meno sensibili alle condizioni al contorno; però in questo caso le distribuzioni di trasmissività e delle portate (in estrazione e di ricarica) saranno vicine a quelle reali e non artificiali come accade nell'utilizzo di maglie tampone.

4.2 Topografia

La superficie topografica della Provincia di Cremona è stata ricavata dai dati della CTR, interpolati con metodi geostatistici (kriging) su una griglia con spaziatura di 500 m, ed è rappresentata mediante curve di livello con equidistanza di 5 m in Tavola 1.

La topografia ha un andamento decrescente da nord a sud e varia dalla quota di 120 m s.l.m.m., al confine nord, a quella di 20 m s.l.m.m. presso il confine meridionale.

Nella parte settentrionale del dominio i fontanili si estendono lungo una zona che descrive una forma ad "arco" dai paesi di Dovera e Sergnano sino a Soncino. Sempre nella zona settentrionale, i gradienti topografici medi sono allineati coi corsi dei tre principali fiumi, Adda, Serio e Oglio, che hanno generato e modellato la pianura alluvionale, e sono diretti da nord verso sud. Il modulo del gradiente topografico vale circa 0.003 a nord e approssimativamente si dimezza a sud dell'allineamento Dovera-Crema. Si osservi che la disposizione della cintura dei fontanili corrisponde grosso modo alla fascia di pianura dove il modulo del gradiente topografico diminuisce.

Una decina di chilometri a sud dell'allineamento Dovera-Crema la larghezza del dominio diminuisce di circa il 30%, i corsi di Adda e Oglio cambiano direzione e con essi anche i gradienti topografici medi che presentano direzione NNO-SSE e modulo di circa 0.0015. Nella parte meridionale della pianura, a sud dell'allineamento S. Daniele Po-Piadena, i moduli del gradiente topografico medio presentano valori ancora minori, dell'ordine di 0.0005.

La Tavola 1 evidenzia le seguenti strutture topografiche.

- a) L'incisione lungo cui è impostato l'attuale corso dell'Adda, che si estende per circa 50 km sino alla sua confluenza nel Po ad ovest di Cremona ed è situato una ventina di metri sotto il livello principale della pianura.
- b) L'alveo del Serio che diventa più marcato a sud di Sergnano sino alla sua attuale confluenza nell'Adda. A sud di Crema si evidenzia una struttura che si sviluppa

verso sud per circa 20 km, collegata probabilmente ad un alveo abbandonato del Serio (Serio Vecchio) che sfociava nell'Adda presso Pizzighettone.

- c) A metà dell'allineamento Dovera-Crema è ben marcato l'asse di uno spartiacque topografico che separa i bacini imbriferi di Adda e Serio.
- d) L'alveo dell'Oglio che si sviluppa per circa un centinaio di km, da nord di Soncino sino ad una ventina di km a sud-est di Piadena dove confluisce nel Po e che si trova ad una quota una decina di metri inferiore al livello principale della pianura.
- e) Uno spartiacque topografico che inizia ad ovest di Soncino e si sviluppa verso sud parallelamente al corso dell'Oglio lungo l'allineamento Soresina-Casalbuttano-Pescarolo delimitandone il bacino imbrifero della sponda occidentale.
- f) Nella parte meridionale dell'area, dove i gradienti topografici presentano i valori più bassi, è evidenziato un basso topografico che da S. Giovanni in Croce si sviluppa verso sud-est, per oltre 20 km sino alla confluenza Oglio-Po.

A completamento della descrizione della topografia dell'area è sembrato opportuno riportare in Tavola 2 la posizione dei terrazzi geomorfologici ripresa dal sito www.atlanteambientale.it curato dalla Provincia di Cremona. Poiché questi terrazzi sono stati erosi dai fiumi che nel corso delle ere geologiche più recenti hanno attraversato l'area di studio, le loro tracce costituiscono importanti evidenze osservative sulla evoluzione nello spazio e nel tempo della geometria dell'acquifero freatico e delle sue condizioni al contorno. Ad esempio la valle dell'Adda si estende verso ovest, mostrando quote diverse della base dei diversi ordini di terrazzi, molto più elevate della quota attuale del fiume, che si trova più di 20 m sotto il livello principale della pianura; un effetto analogo ma meno marcato si verifica per i Fiumi Serio e Oglio.

Questi terrazzi geomorfologici sono importanti per gli studi idrologici perché lungo le brusche rotture di pendenza topografica che li caratterizzano possono essere presenti sorgenti. Questo meccanismo è attivo soprattutto in acquiferi in cui una ricarica molto forte tiene il livello freatico più alto delle condizioni al contorno costituite dal livello idrometrico dei fiumi circostanti. Le acque drenate da queste sorgenti vengono raccolte da "canalette" che corrono parallele ai terrazzi geomorfologici, al loro piede. Le portate di questi termini di sorgente sono variabili nel tempo e difficili da quantificare, ma possono essere anche abbastanza elevate soprattutto nei periodi estivi quando le portate irrigue immesse in falda sono rilevanti. Evidentemente una modellazione sensata e congiunta di acque superficiali e sotterranee non può prescindere da una valutazione attendibile di questo meccanismo di scambio e dei valori delle portate scambiate.

La Tavola 2 evidenzia che i terrazzi geomorfologici sono allungati verso sud e convergono in un'area compresa tra Cremona e Pizzighettone. Ad una decina di km a sud di Cremona invece si sviluppa sull'allineamento S. Daniele Po-S. Giovanni in Croce sino alla confluenza dell'Oglio nel Po un terrazzo con direzione ovest-est. In particolare si osservano le seguenti successioni principali di terrazzi geomorfologici:

- a) tre o più ordini di terrazzi lungo l'Adda, di cui tuttavia quello più ad est potrebbe essere stato eroso da un vecchio corso del Brembo (comunicazione verbale del dott. M. Cremonini);
- b) un ordine di terrazzi lungo il corso del Serio sino alla sua confluenza nell'Adda. A sud di Crema si sviluppa una serie di terrazzi meno pronunciati collegati al Serio Vecchio che confluiva nell'Adda a sud di Pizzighettone;
- c) un ordine di terrazzi lungo tutto il corso dell'Oglio sino alla sua confluenza nel Po;

- d) un ordine di terrazzi che da nord-ovest di Soncino, passando tra Soresina e Casalbuttano si sviluppa sino a nord-ovest di Cremona alla confluenza tra Adda e Po;
- e) infine a sud di Cremona si sviluppa un lungo terrazzo con orientazione ovest-est, parallela al corso del Po prima della sua confluenza con l'Adda a Cremona, e sembra il prodotto di un vecchio corso del Po.

4.3 Piezometria

Come detto nel Paragrafo 2.6, il sistema acquifero della Provincia di Cremona è stato distinto in un acquifero freatico collegato ad un acquifero semi-confinato.

Peraltro le piezometrie dello studio di Beretta *et al.* (1992) mostrano che le curve di livello per gli acquiferi freatico e semi-confinato sono praticamente coincidenti come valori nella zona che va dal confine nord della Provincia alla linea che taglia la Provincia lungo il parallelo passante per Crema. Inoltre esaminando le stratigrafie del medesimo studio, si osserva che i sedimenti formano pressoché un unico strato permeabile in tale area, confermando l'ipotesi che l'acquifero si comporti essenzialmente come un monostrato almeno alla scala che verrà usata in questo studio per la modellazione matematica del flusso idrico sotterraneo.

Invece il confronto dei valori di piezometria rilevata in piezometri o pozzi superficiali (cioè con profondità massima di 50 m) e in pozzi profondi (che raggiungano profondità superiori ai 150 m dal piano campagna) vicini conferma che nella zona centrale della Provincia il sistema acquifero è multistrato. Dai dati disponibili sono state rintracciate tre coppie con queste caratteristiche; le differenze nei livelli piezometrici medi (per la stagione invernale) sono comprese tra 3 e 10 m e indicano in modo chiaro una differenza di piezometria tra i livelli più superficiali e i livelli profondi (Tabella 22). Inoltre, assumendo che i dati osservati nei piezometri superficiali e profondi siano riferibili alla massima profondità dei piezometri stessi, si può fornire una stima, sia pure grossolana, della componente verticale del gradiente idraulico compresa tra 1 e 5%, molto maggiore della componente orizzontale dell'1‰.

Tabella 22. Piezometri usati per il calcolo del gradiente verticale. I livelli riportati si riferiscono alle medie per la stagione invernale nel periodo 2001-2003.

Piezometri superficiali			Piezometri profondi		
Coordinate Gauss-Boaga (m)		Livello (m)	Coordinate Gauss-Boaga (m)		Livello (m)
Est	Nord		Est	Nord	
1585362	5005305	47	1582848	5005837	37
1589603	5000316	40	1587619	4998617	34
1598296	4994796	30	1600341	4993416	27

4.3.1 Piezometria dell'acquifero freatico

Per ricostruire la piezometria dell'acquifero freatico si sono utilizzati dati di tre tipi.

- Misure di livello in piezometri o pozzi superficiali, la cui profondità non supera i 50 m.
- Stime del livello del pelo dell'acqua dei fontanili.
- Idrometria dei principali corsi d'acqua.

4.3.1.1 Misure di livello in piezometri o pozzi superficiali

Per l'elaborazione delle carte piezometriche dell'acquifero freatico sono stati usati i dati di piezometria rilevati con piezometri o pozzi caratterizzati da profondità inferiori a 50 m. Il

data base è costituito da dati provenienti da fonti diverse, come mostrato in Tabella 23. La posizione dei punti di misura è rappresentata nella Figura 73. Come si può osservare i punti di misura sono distribuiti in modo irregolare, con una discreta densità nelle aree gestite dal consorzio irriguo Dugali e in subordine dal consorzio Vacchelli, mentre le altre aree sono ricoperte essenzialmente dalla rete della Regione Lombardia, i cui dati sono riportati nel PTUA. Mediamente si ha un punto di misura ogni 16 km² circa.

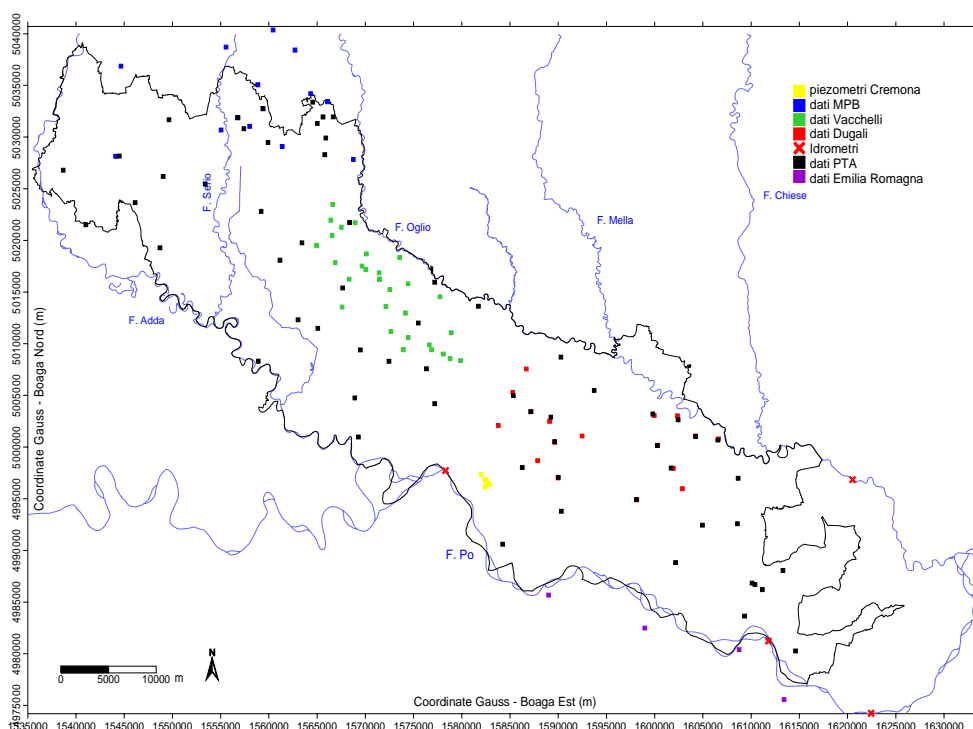


Figura 73. Distribuzione dei punti di misura della piezometria superficiali (piezometri e pozzi con profondità inferiore a 50 m) suddivisi in base alla fonte dell'informazione.

Tabella 23. Piezometri o pozzi superficiali.

Fonte	Intervallo temporale	Punti di misura	Frequenza di campionamento (rilievi/anno)	Escursione massima (m) nell'intervallo temporale
Consorzio della Media Pianura Bergamasca	Dicembre 1988 – aprile 2005	Da 85 a 66*	Da 1 a 12	1.5
Consorzio Dugali	Aprile 1973 – agosto 2003	21	36	1.3
Consorzio Vacchelli	Gennaio 2001 – maggio 2003	30	12	2.7
Regione Lombardia (PTUA)	Aprile 1994 – settembre 2003	6**	Da 1 a 12	0.7
	Marzo 2003	66	Dato singolo	N/D
AEM Cremona	Marzo 1994 – marzo 2004	7	12	1.6
Maione <i>et al.</i> (1991)	Novembre 1988 – Novembre 1990	150	6	1.0. ¹
ARPA Emilia-Romagna	Gennaio 1996 – dicembre 1998	5	1	3.9

* Solo nove di questi sono interni all'area di studio.

** Solo uno di questi è interno all'area di studio.

¹ Questa escursione massima si riferisce in effetti a un periodo di rilevamento molto più lungo, dal 1961 al 1990.

Solo nove dei pozzi del Consorzio della Media Pianura Bergamasca sono ubicati nell'area di studio; i dati esterni sono comunque stati utilizzati per le interpolazioni. Inoltre sono disponibili alcuni dati tratti da Maione *et al.* (1991), che si riferiscono a un periodo temporale precedente al 2001, quindi precedente all'intervallo temporale analizzato con questo studio; per questo motivo non sono stati inseriti in Tabella 23.

I risultati ottenuti con questo lavoro sono stati confrontati con le mappe di Beretta *et al.* (1992), realizzate tramite 74 punti di misura; poiché i dati originali non sono più disponibili, non sono noti né la data né il risultato della misura. Nelle mappe di Beretta *et al.* (1992) sono riportate graficamente le posizioni dei punti di misura utilizzati per l'interpolazione della corrispondente carta piezometrica.

4.3.1.2 Stima del livello dell'acqua dei fontanili

Per definire meglio la piezometria dell'acquifero freatico, ai dati osservati in pozzi e piezometri superficiali sono stati aggiunti anche i livelli dei fontanili presenti nell'area. Si tratta in particolare di 125 fontanili nella provincia di Bergamo a sud della coordinata Gauss-Boaga 5042000 Nord e di 235 nella provincia di Cremona.

Dal censimento dei fontanili della provincia di Cremona (D'Auria & Zavagno, 2005) sono stati recuperati i dati sulla profondità dello scavo rispetto alla quota topografica riferita al "terrazzo" del fontanile e sul livello dell'acqua nel fontanile.

Per quanto riguarda i fontanili della zona bergamasca sono note solo le coordinate geografiche nel piano e quindi non sono stati utilizzati per determinare il livello del pelo libero dell'acqua del freatico.

Purtroppo non sono disponibili misure delle variazioni temporali del livello idrico nei fontanili.

4.3.1.3 Idrometria dei principali corsi d'acqua

Ulteriori dati utili alla ricostruzione dell'altezza piezometrica dell'acquifero freatico sono forniti dai livelli idrometrici dei fiumi Adda, Po e Oglio, che si possono supporre in contatto idraulico diretto con l'acquifero. Questa ipotesi è suffragata dalle informazioni disponibili e dall'analisi della topografia e delle sezioni litostratigrafiche di Beretta *et al.* (1992). Infatti i principali fiumi di questa area hanno scavato il proprio alveo all'interno del livello principale della pianura, creando una serie di terrazzi. Poiché la soggiacenza della falda nella zona centrale del dominio, più lontana dai fiumi, è di pochi metri, si può ragionevolmente ritenere che i fiumi siano in contatto idraulico diretto con l'acquifero freatico e che lo drenino. Infatti le portate dei fiumi stessi aumentano tra due derivazioni successive e quindi, non essendoci immissari, devono essere alimentati dalla falda.

Misure di livello e portata per i fiumi Adda, Oglio e Serio sono disponibili in alcuni punti a monte della zona modellata e nei quattro punti rappresentati dalle croci rosse nella Figura 73. Le serie temporali sono riportate da Figura 74 a Figura 77 e mostrano la risposta del sistema fluviale alla variabilità meteorologica.

Occorre sottolineare che alcune apparenti incongruenze nei dati, come, ad esempio, le diverse indicazioni su alcuni episodi di piena dell'aprile 2001 sono legate alla mancanza di dati di alcune serie idrometriche per certi intervalli temporali.

Ovviamente le oscillazioni su periodi brevi, legate a eventi meteorici nel bacino idrografico di breve durata (pochi giorni), ma di notevole intensità, sono quasi irrilevanti rispetto alla dinamica stagionale del sistema acquifero. In altre parole, il segnale di questi eventi potrebbe essere osservato se fossero disponibili serie temporali di livelli piezometrici in punti di misura molto vicini ai fiumi e con passo di campionamento

confrontabile con quello delle idrometrie; invece questo segnale non può essere messo in evidenza dalle serie temporali della piezometria effettivamente osservate, neppure da quelle campionate con maggiore regolarità e con il passo temporale inferiore, che è variabile tra 10 giorni (consorzio Dugali) e 1 mese (consorzio Vacchelli).

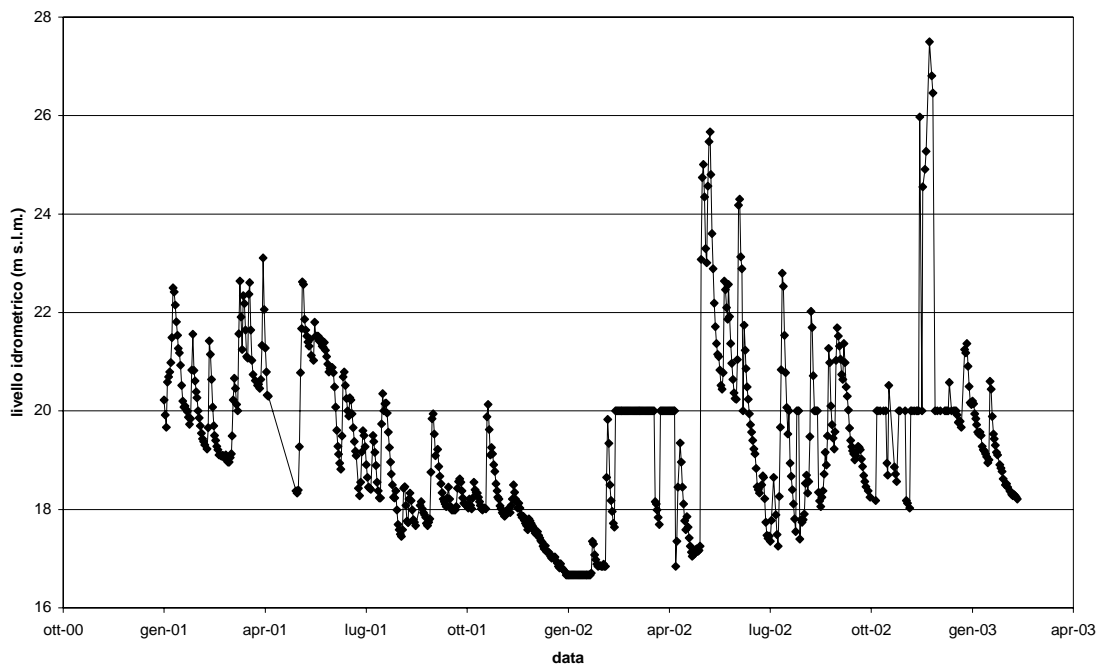


Figura 74. Serie temporale idrometro di Boretto (fiume Po).

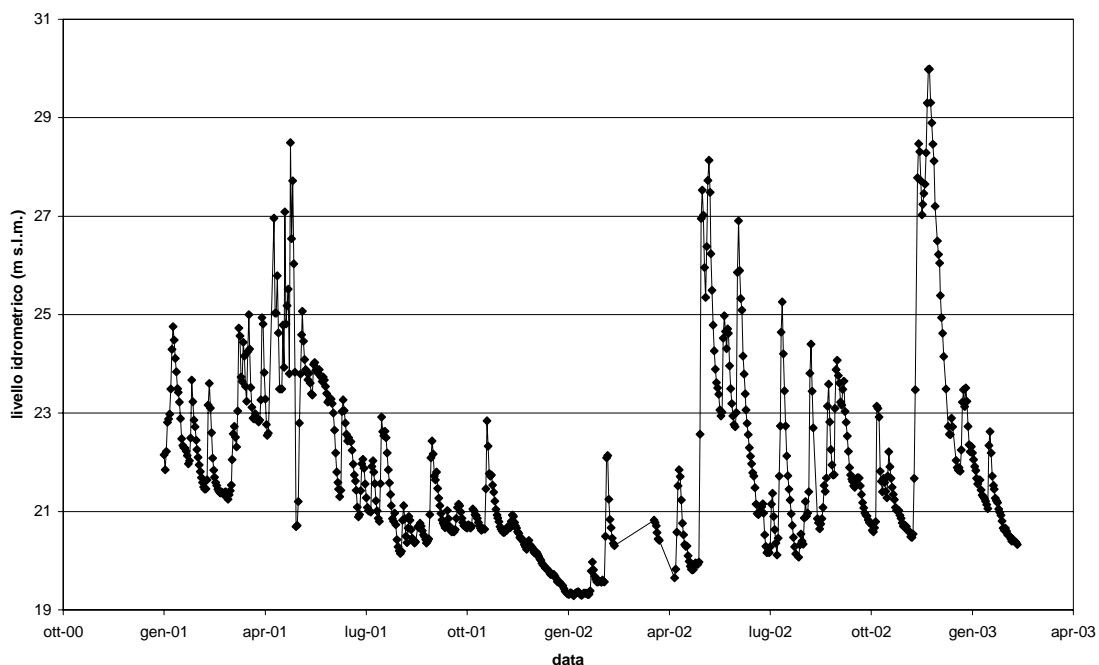


Figura 75. Serie temporale idrometro di Casalmaggiore (fiume Po).

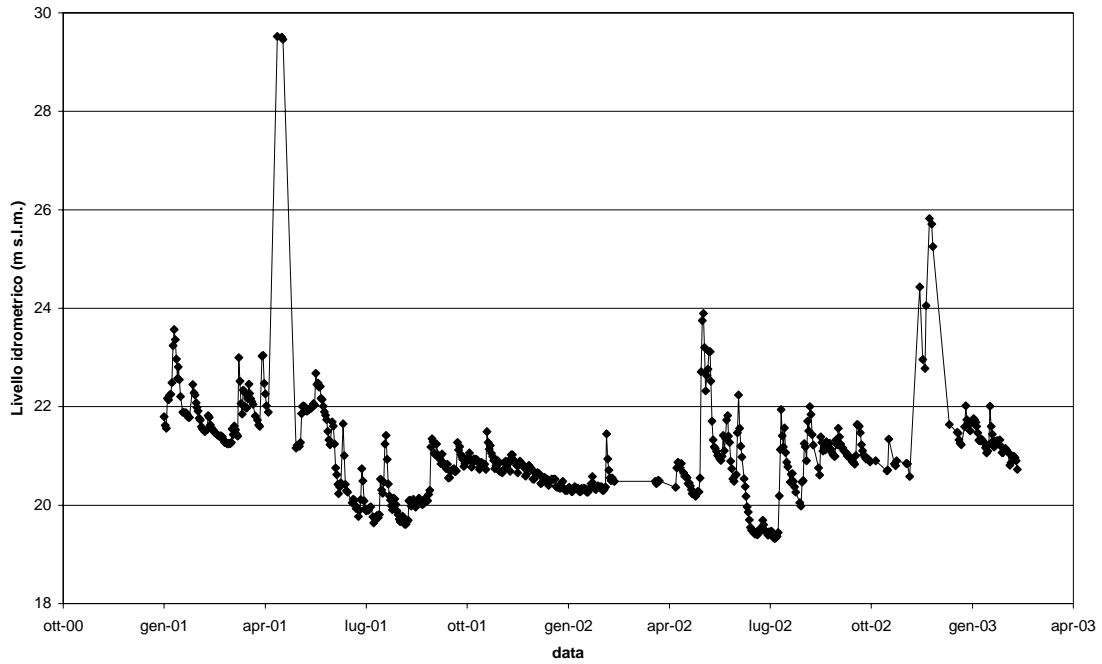


Figura 76. Serie temporale idrometro di Marcaria (fiume Oglio).

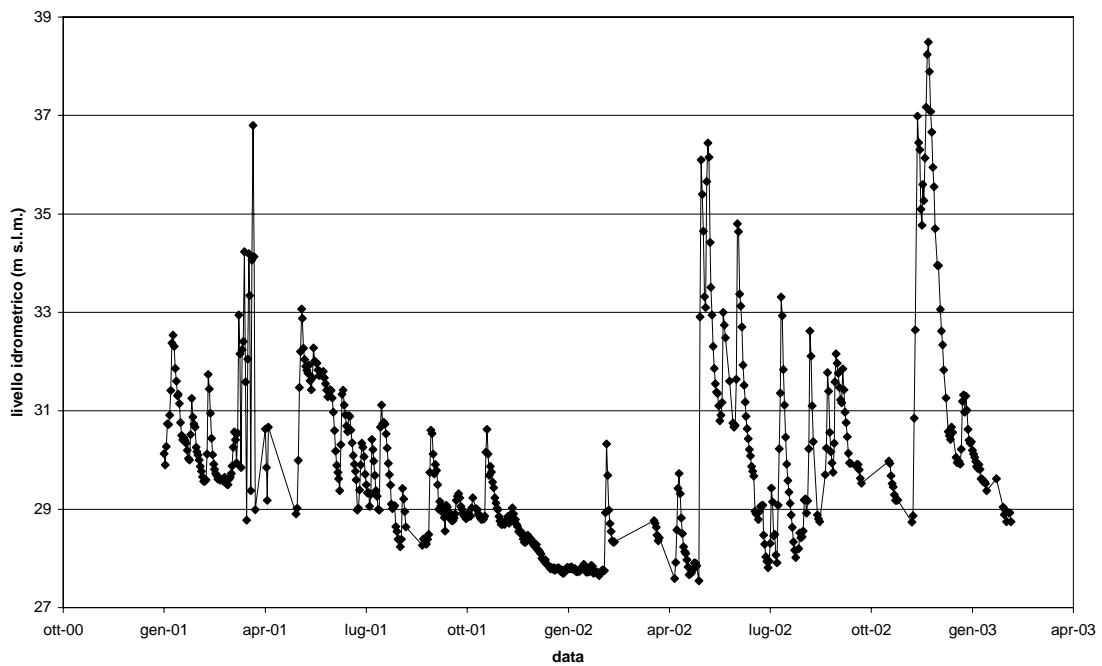


Figura 77. Serie temporale idrometro di Cremona (fiume Po).

Per stimare il livello idrometrico dei fiumi lungo tutto il loro corso sono stati elaborati i rilievi topografici dei profili longitudinali e delle sezioni trasversali dei fiumi Po, Adda, Serio e Oglio (Autorità di Bacino del Fiume Po, 2003).

Analizzando le sezioni dei fiumi Po, Adda, Serio e Oglio sono stati osservati gli andamenti dei profili trasversali di questi fiumi, ponendo particolare attenzione alle quote del punto minimo del fondo del fiume e alla profondità dei terrazzi in modo da ricavare una stima

della quota del livello idrometrico del fiume o perlomeno un intervallo entro cui tale livello può variare. Si riporta a titolo di esempio la sezione 12 del fiume Adda in Figura 78.

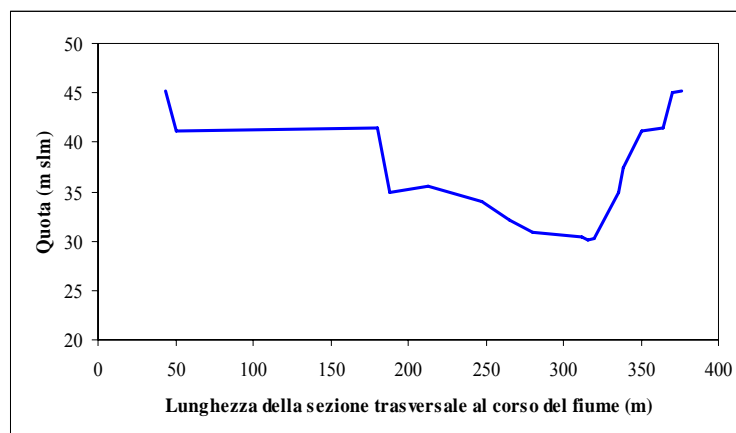


Figura 78. Sezione trasversale 12, fiume Adda: in ordinata la quota del fondo del fiume in m s.l.m. (Autorità di bacino del fiume Po, 2003).

Sono state elaborate 149 sezioni per il fiume Adda, 77 per il Serio, 71 per l’Oglio e 50 per il Po, la cui ubicazione è rappresentata in Figura 79. Nella Tabella 24 è riportato l’elenco dei dati inseriti per la stima del livello idrografico di questi fiumi.

Le osservazioni non possono essere applicate in modo altrettanto semplice e immediato al tratto del fiume Po a valle di San Daniele Po, dove il fiume si presenta pensile. Per comprendere meglio il comportamento del fiume in questa zona e per verificare la consistenza delle condizioni al contorno scelte lungo il corso del fiume, è stato eseguito anche un confronto con cinque dati di piezometria reperiti dal sito www.ermesambiente.it della Regione Emilia Romagna e riferiti a punti di osservazione nella Provincia di Parma, la cui ubicazione è rappresentata nella Figura 73.

Ovviamente i risultati dell’analisi delle sezioni del fiume non possono fornire un dato variabile nel tempo, ma solamente il livello medio del fiume nel tempo.

Tabella 24. Dati utilizzati per stimare il livello idrografico dei principali fiumi dell’area di studio.

Fonte	Intervallo temporale	Numero di punti di informazione	Frequenza di campionamento (campioni/giorno)	Tipologia di dato
Stazioni idrometriche	Giugno 1992 – Febbraio 2003	4	Da 1 a 48	Livello idrometrico e portata
Autorità di bacino del Fiume Po	N/D	149/182/305. ² Adda 71/234/449 Oglio 73/90/306 Serio 50/69/337 Po	N/D	Profili topografici delle sezioni trasversali al corso del fiume

² Questi numeri rappresentano rispettivamente il numero di sezioni analizzate, il numero di sezioni presenti nell’area del modello e il numero di sezioni totali.

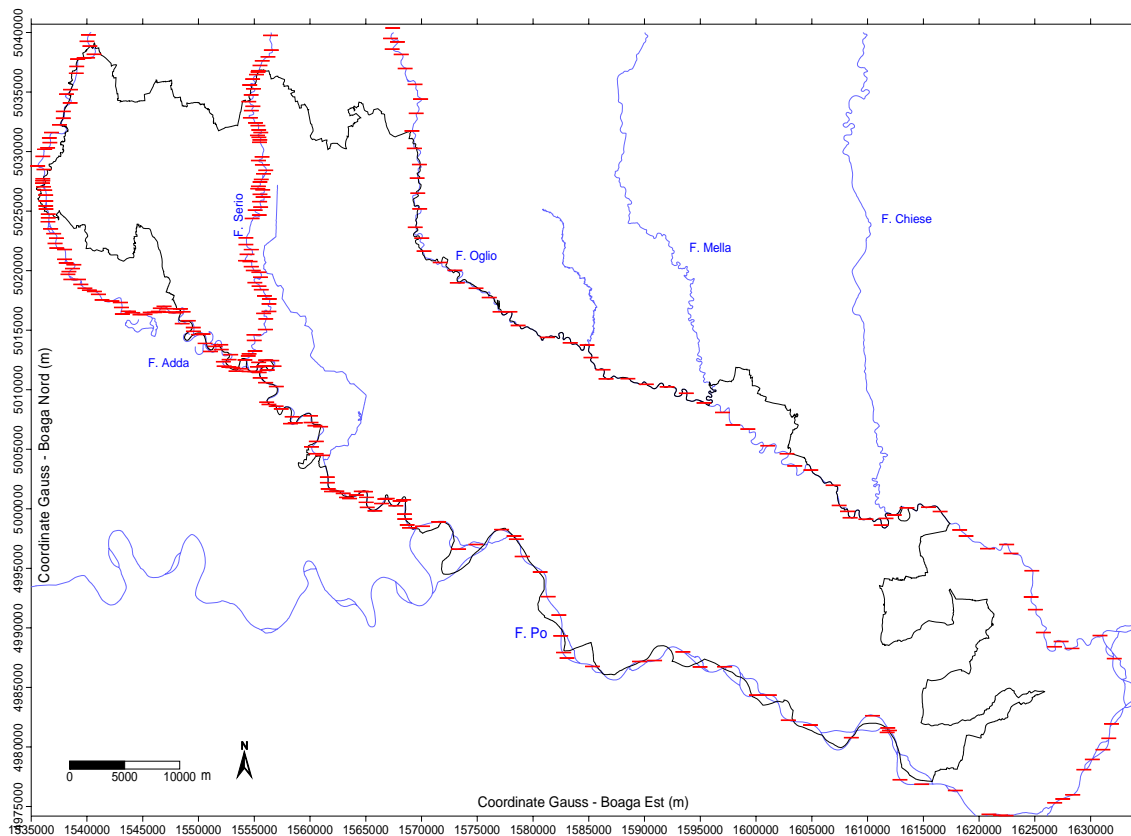


Figura 79. Ubicazione delle sezioni dei fiumi Po, Adda, Oglio e Serio elaborate.

4.3.1.4 Piezometria stazionaria per l'acquifero freatico

Per ricostruire il comportamento dell'acquifero freatico abbiamo interpolato una carta piezometrica con il metodo kriging su una griglia a celle quadrate di lato 500 m usando i dati mediati per gli anni dal 2001 al 2003. Le curve di livello della piezometria dell'acquifero freatico per la stagione invernale sono rappresentate in Tavola 3a e per la stagione estiva in Tavola 3b.

Confrontando la Tavola 3a e la Tavola 3b si nota come la differenza tra le piezometrie per le due stagioni (invernale e estiva) sia legata sostanzialmente alla presenza della serie di dati della campagna del marzo 2003 (da PTUA). Infatti nella porzione settentrionale del dominio e nella zona in cui sono disponibili i dati di livello piezometrico dei consorzi di bonifica Dugali e Vacchelli, cioè dove è presente un discreto numero di dati, le curve isopiezometriche nelle due stagioni sono pressoché coincidenti. Inoltre, contrariamente a quanto ci si aspetterebbe, nella stagione invernale si nota che il livello piezometrico nella zona meridionale (si consideri ad esempio l'area circostante Pescarolo) è più alto rispetto a quello della stagione estiva che dovrebbe essere caratterizzata da un intenso aumento della ricarica e quindi da un conseguente aumento del livello piezometrico.

Questo effetto può essere dovuto al fatto che è stata calcolata una media su periodi abbastanza lunghi (6 mesi); questo ha consentito di utilizzare un buon numero di dati per eseguire le medie temporali, ma dall'altro lato ha fatto perdere sensibilità rispetto alle oscillazioni del livello piezometrico.

Bisogna anche considerare che l'andamento temporale del livello nei piezometri del Consorzio di Bonifica Dugali mostra oscillazioni di ampiezza notevolmente minore rispetto a quella dei dati del Consorzio di Bonifica Vacchelli. Il problema andrà ripreso approfondendo lo studio delle serie temporali dei livelli piezometrici.

Dal momento che le due carte piezometriche mostrano andamenti molto simili, si è deciso di realizzare un'unica carta piezometrica, che darà luogo alla "piezometria di riferimento" dell'acquifero freatico.

4.3.1.5 Piezometria di riferimento per l'acquifero freatico

In questo lavoro la "piezometria di riferimento" per l'acquifero freatico (Tavola 4) consiste in un elaborato che raccoglie e sintetizza tutte le informazioni sull'acquifero e verrà utilizzato sia per estrarre una informazione media sul flusso idrico e le sue direzioni, sia come riferimento osservativo nella calibrazione del modello matematico di simulazione del flusso. In particolare questa mappa viene ottenuta attraverso un filtraggio delle mappe di Tavola 3 per smussare le variazioni a piccola lunghezza d'onda delle curve di livello, fisicamente non compatibili con maglie di lato pari a 500 m dove quindi l'altezza freatica è un valore medio "rappresentativo" di tutta l'area della maglia.

Giudici e Vassena (2007), studiando le caratteristiche spettrali dell'equazione di bilancio hanno mostrato che questa si comporta come un filtro che limita le componenti della altezza piezometrica ad alto numero d'onda (bassa lunghezza d'onda). Al contrario nel problema inverso attraverso il quale si calcolano le trasmissività a partire dalla conoscenza dei termini di sorgente e della piezometria, le componenti della piezometria con alti numeri d'onda vengono ingigantite e sono responsabili dei problemi di instabilità della soluzione di questo problema matematico.

Sulla base di questi risultati è evidente che l'interpolazione e il successivo filtraggio dell'altezza piezometrica, che è già una funzione regolare, risulta meno complicata dell'interpolazione delle trasmissività o di certi termini di sorgente (pozzi di presa che potrebbero essere trattati come valori puntuali) che sono molto più irregolari e quindi di difficile interpolazione.

Il filtro applicato agisce effettuando una media pesata sulla distanza: considerata una cella (i,j) , il valore dell'altezza piezometrica $h(i,j)$ viene calcolato come la media delle h in un reticolo di 5 righe per 5 colonne avente centro nella cella (i,j) , dando un peso maggiore ai valori più vicini. Al fine di ottenere un maggiore effetto di lisciamiento, il filtro può essere applicato ripetutamente. Questo filtro sarà applicato anche ad altre grandezze.

Sottolineiamo che la Tavola 4 è una carta piezometrica "equivalente" che rappresenta una situazione idraulica stazionaria, o meglio pseudo-stazionaria, ottenuta mediando nel triennio i valori di piezometria, i livelli idrometrici dei fiumi e dei fontanili misurati in condizioni transitorie. In acquiferi in condizioni naturali una situazione pseudo-stazionaria o di quasi-equilibrio è mantenuta quando, durante l'anno idrologico naturale, la somma delle portate in entrata nell'acquifero eguaglia la somma delle portate in uscita. L'acquifero freatico cremonese non è evidentemente in condizioni naturali poiché l'apporto per infiltrazione di acque utilizzate per la pratica irrigua e prelevate dai fiumi circostanti, supera di molto, o comunque è dello stesso ordine di grandezza, dell'apporto per infiltrazione naturale da pioggia. Il ciclo idrologico è dunque artificiale, governato soprattutto dalla ricarica estiva dell'acquifero provocata da una massiccia irrigazione, che, a causa della scarsa efficienza del sistema di canali irrigui e delle tecniche di irrigazione, provoca infiltrazioni massicce nel freatico e quindi flussi di ritorno verso fiumi e fontanili in diretto contatto con il freatico e da esso alimentati. Questa ricarica artificiale ha generato una situazione nuova e artificiale di quasi-equilibrio con una superficie freatica molto più alta dei livelli idrometrici attuali dei fiumi Adda, Oglio e Po che delimitano l'acquifero e ne costituiscono le condizioni al contorno di potenziale assegnato.



Figura 80. Sezione topografica in corrispondenza della coordinata Gauss-Boaga 5031000 Nord.

Il lato settentrionale dell'acquifero è caratterizzato dalla isopieza 110 m s.l.m.m. che attraversa l'acquifero da ovest ad est partendo dall'Adda ad ovest e raggiungendo l'Oglio ad oriente; verso sud la piezometria decresce abbastanza regolarmente e raggiunge valori di circa 65 m in corrispondenza di Crema. Più a sud, a Cremona, la piezometria mostra valori di 35 m e scende a valori inferiori ai 20 m nel lato meridionale dell'acquifero alla confluenza dell'Oglio nel Po.

Il confronto tra la piezometria di riferimento del freatico (Tavola 4) e la carta topografica (Tavola 1) mostra che la superficie freatica segue fedelmente la superficie topografica, lasciandone l'andamento. Infatti le emergenze dell'acqua del freatico sono costituite dai fontanili e dai livelli idrometrici dei fiumi a cui è stata ancorata la superficie freatica.

4.3.1.6 Gradienti idraulici medi

La Tavola 5 rappresenta il gradiente idraulico medio della piezometria freatica di riferimento e quindi, con l'ipotesi di acquifero isotropo, le direzioni medie spaziali e temporali del flusso idrico.

Si nota come il modulo del gradiente assuma valori differenti nella Provincia di Cremona: a nord della fascia dei fontanili ha un valore del 3%, procedendo verso sud mantiene la direzione nord-sud, ma diminuisce variando tra 1 e 2%. Questo aspetto è molto interessante perché mostra l'effetto dei fontanili: come descritto nel Paragrafo 2.5.4, da essi vengono derivate portate particolarmente intense. Dalle stime ricavate dalle misure del Consorzio della Media Pianura Bergamasca risulta che le rogge fontanilizie derivano circa 14 m³/s nella zona tra Adda e Serio e 7 m³/s tra Serio e Oglio. La conseguenza ben visibile di queste estrazioni da falda è la diminuzione del modulo del gradiente idraulico tra l'area a monte dei fontanili e quella a valle.

Lungo il tratto del fiume Oglio che va da alcuni chilometri a nord di Soncino fino a Robecco d'Oglio si ha un aumento e una rotazione verso sud-est del gradiente, il cui modulo supera il 4% e mostra l'effetto drenante particolarmente intenso del fiume. Procedendo verso sud nell'area centrale della provincia di Cremona si nota una progressiva

diminuzione del modulo del gradiente, con valori che oscillano attorno all'1‰, e l'effetto drenante dei fiumi che domina la circolazione idrica.

Nella zona a sud-est di San Daniele Po e San Giovanni in Croce il gradiente è diretto prevalentemente in direzione est-sud est e diminuisce notevolmente assumendo valori minori dello 0.5‰.

Procedendo verso sud, nella zona centrale della Provincia, si nota una progressiva ulteriore diminuzione del modulo del gradiente che presenta valori attorno all'1‰.

Lungo l'allineamento Soresina-Casalbuttano-Pescarolo-Piadena è ben individuato uno spartiacque sotterraneo, quasi coincidente con la linea di dislivello rappresentata nella carta topografica di Tavola 1 caratterizzata dalla presenza di una fitta rete di canali di distribuzione delle acque per l'irrigazione, che delimita ad est le acque drenate dall'Oglio da quelle drenate ad ovest dell'Adda e poi a sud dal Po. Nella zona a sud est di S. Daniele Po, verso S. Giovanni in Croce il modulo del gradiente diminuisce ulteriormente assumendo valori anche inferiori a 0.5‰. La direzione del gradiente, a sud di S. Giovanni in Croce è mediamente rivolta verso est, allineata dunque, in modo anomalo, non con il corso attuale del Po nell'area, ma con il corso del Po ad ovest di Cremona. In sintesi la Tavola 5 mostra chiaramente l'effetto drenante dei fiumi che domina la circolazione idrica sotterranea e fa risaltare in modo netto la presenza di quattro dreni principali dell'acquifero; più precisamente ad est il grande dreno costituito dall'Oglio, ad ovest il dreno dell'Adda ed a sud, sino a S. Daniele Po il dreno del Po. Nella zona centro-settentrionale è ben visibile l'azione drenante del Serio sino alla sua confluenza in Adda.

4.3.1.7 Soggiacenza

Un altro elaborato importante (Tavola 6) è quello che descrive la "soggiacenza", ovvero la profondità della superficie freatica sotto il piano di campagna. Evidentemente la superficie freatica si trova a profondità diverse nelle varie zone dell'acquifero, emerge, dunque ha profondità nulla, in corrispondenza di fontanili naturali o in corrispondenza dei corsi d'acqua, mentre è, in generale, più profonda sotto eventuali dislivelli topografici o spartiacque. L'elaborato che rappresenta la soggiacenza assume importanza sotto molti aspetti, ad esempio:

- a) da un punto di vista geotecnico permette di prevedere se gli scavi di grandi manufatti sotterranei o le fondamenta di grandi edifici, dovranno essere eseguiti in terreni saturi o insaturi d'acqua e se, una volta ultimati i lavori, le strutture dovranno essere impermeabilizzate per impedire eventuali futuri allagamenti;
- b) da un punto di vista idrogeologico permette di individuare zone dell'acquifero dove è possibile immagazzinare grandi quantità di acqua prelevata dai fiumi nei periodi di piena, da utilizzare come portate di ritorno nei periodi di siccità, o per scopi irrigui, o per mantenere la portata dei fiumi e di eventuali fontanili entro limiti di sostenibilità. Infatti i sedimenti sepolti possono immagazzinare e trattenere per tempi molto lunghi enormi volumi di acqua. Per esempio una porzione di 100 km² di acquifero freatico con una porosità efficace del 15% potrebbe immagazzinare 15 milioni di m³ di acqua se venisse innalzato il suo livello freatico di un metro attraverso una ricarica artificiale effettuata in zone opportune dell'acquifero ed in tempi opportuni prelevando acqua dai fiumi più vicini e mettendo in carica i canali della rete irrigua. A titolo di esempio si tratta circa del volume di acqua scaricato in Po, e quindi in mare, da un fiume come l'Adda in due giorni, assumendo per esso una portata media di 100 m³/s.

L'elaborato di Tavola 6 rappresenta la soggiacenza media ottenuta come differenza tra la quota della superficie topografica filtrata e la piezometria di riferimento dell'acquifero freatico (Tavola 4).

All'interno dell'acquifero freatico sono state individuate aree omogenee nei valori di soggiacenza con andamenti allungati lungo il corso dei principali fiumi e dei loro terrazzi geomorfologici. Una struttura di soggiacenza minima (meno di 2 m), colorata in blu, si sviluppa parallelamente al corso dell'Oglio lungo l'allineamento Soresina-Casalbuttano-Pescarolo in corrispondenza dello spartiacque topografico rappresentato in Tavola 1, probabilmente causata dalle forti perdite del canale artificiale "Naviglio Civico" che è anche alimentato dal canale Vacchelli che preleva acque a nord ovest dall'Adda.

Valori di soggiacenza medi (circa 5 m), rappresentati in verde, si incontrano nella gran parte dell'area anche a nord della cintura dei fontanili. Tra l'Adda e l'allineamento Crema-Castelleone-Pizzighettone è presente una struttura allungata colorata in rosso che presenta valori di soggiacenza anche maggiori di dieci metri. Tale struttura ha un andamento che coincide con l'asse dello spartiacque topografico descritto in Tavola 1.

4.3.1.8 Variazioni temporali della piezometria dell'acquifero freatico

Le escursioni della piezometria dell'acquifero freatico mostrate dalle serie temporali per il periodo preso in esame in questo lavoro (2001-2003) sono inferiori a 2 m nella maggioranza dei casi e molto spesso inferiori a 1 m. I dati corrispondenti a ciascuna fonte di informazione mostrano andamenti temporali specifici. Le elaborazioni che definiscono gli andamenti tipo utilizzano due medie. Considerato un gruppo di M piezometri, ad esempio quelli appartenenti ad un medesimo consorzio, indichiamo con $h_{m,n}$ il valore dell'altezza piezometrica osservato nel piezometro numero m al tempo t_n , con $n=1, \dots, N$. Definiamo allora la media di gruppo, che varia ad ogni istante temporale, come $M^{-1} \sum_m h_{m,n}$ e la media temporale, che varia da piezometro a piezometro, come $N^{-1} \sum_n h_{m,n}$. Per le elaborazioni mirate a mettere in evidenza le oscillazioni temporali dei diversi gruppi di piezometri, ad ogni serie temporale è stata sottratta la sua media temporale. Pertanto il riferimento, cioè lo "zero" delle oscillazioni piezometriche corrisponde alla media temporale della serie considerata.

I grafici riportati da Figura 81 a Figura 84, in Figura 86 e in Figura 87 mostrano gli andamenti delle oscillazioni piezometriche di diversi gruppi di pozzi o piezometri. Al fine di mettere meglio in evidenza le variazioni temporali, le scale delle ordinate di queste figure sono diverse per quasi tutte le figure. Invece la Figura 88 riporta le serie temporali con un'unica scala delle ordinate, al fine di confrontare meglio gli andamenti temporali delle piezometrie misurate nei diversi gruppi di punti di misura. In queste figure vengono rappresentati il valore medio di gruppo delle oscillazioni piezometriche e le relative barre di errore con ampiezza $\pm 1 \sigma$, deviazione standard.

La media di gruppo delle oscillazioni piezometriche dei piezometri del Consorzio Vacchelli evidenzia un andamento annuale con un massimo principale in estate e un minimo nel periodo invernale (Figura 81) con escursioni che raggiungono il metro.

Invece i piezometri del Consorzio Dugali seguono diversi andamenti tipo e comunque le escursioni dell'altezza piezometrica risultano inferiori a quelle osservate nei piezometri del Consorzio Vacchelli. Per raggruppare questi piezometri in base al loro andamento è stato calcolato il coefficiente di correlazione per ogni coppia di piezometri e quindi, eseguendo un'analisi dei risultati ottenuti, sono stati considerati tre gruppi per i quali sono state calcolate le oscillazioni piezometriche medie. Il gruppo A comprende i piezometri 6, 7, 8 e 10 e mostra andamenti non correlati alla stagionalità, piccole oscillazioni nell'anno 2002 e una tendenza negativa della piezometria dal gennaio 2003 (Figura 82). Il gruppo B comprende i piezometri 11, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21 e mostra due massimi nei periodi invernali del 2001 e 2003, mentre ancora nel 2002 le oscillazioni sono minime e infine una

tendenza negativa dal gennaio 2003 (Figura 83). Infine il gruppo C comprende i piezometri 4, 5, 9, 12 e 13 e mostra un andamento simile a quello del gruppo A, ma con una diminuzione della piezometria nel 2003 più accentuata (Figura 84).

È importante osservare che le scale delle ordinate da Figura 81 a Figura 84 sono differenti, per mettere meglio in evidenza le variazioni temporali. In particolare le escursioni sono massime per i piezometri del Consorzio Vacchelli e minime per i piezometri dei gruppi A e C del Consorzio Dugali.

La Figura 85 mostra l'ubicazione dei tre gruppi di piezometri del Consorzio Dugali. Come si vede la classificazione, che è stata effettuata sulla base degli andamenti temporali della piezometria, raggruppa piezometri distribuiti all'interno di zone dell'acquifero distinte. I piezometri più orientali del consorzio appartengono al gruppo B, mentre quelli occidentali appartengono ai due gruppi A e C, i cui andamenti temporali sono simili. La differenziazione tra i gruppi A e C mostra anch'essa una distribuzione spaziale, ma meno significativa.

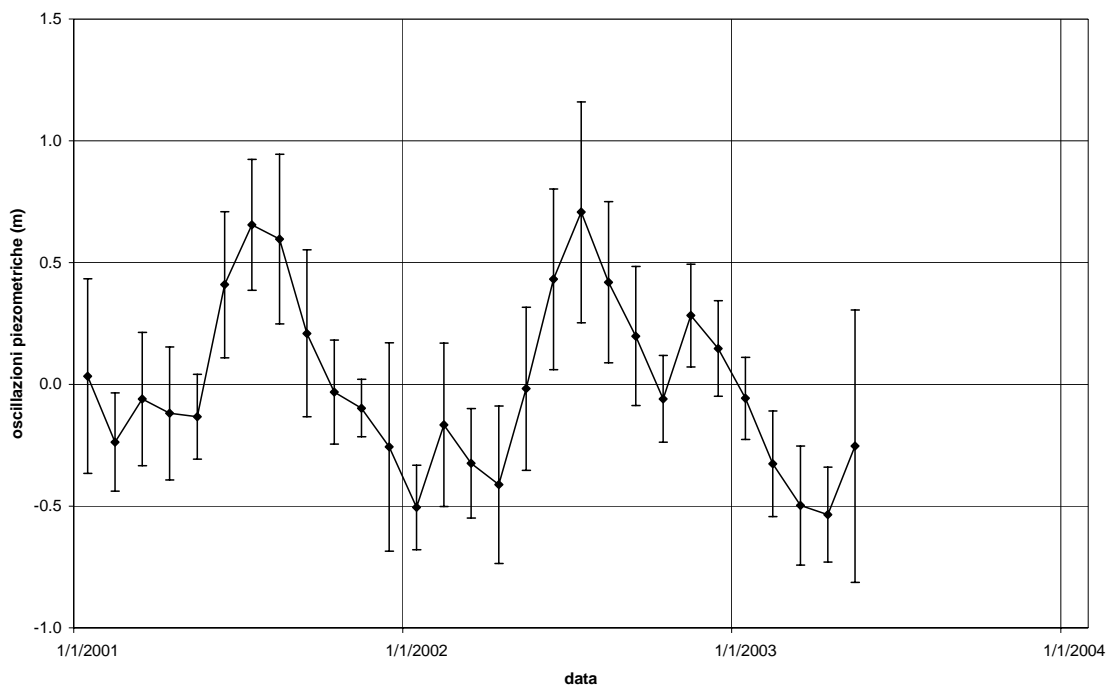


Figura 81. Oscillazioni piezometriche medie di gruppo per i piezometri del Consorzio Vacchelli.

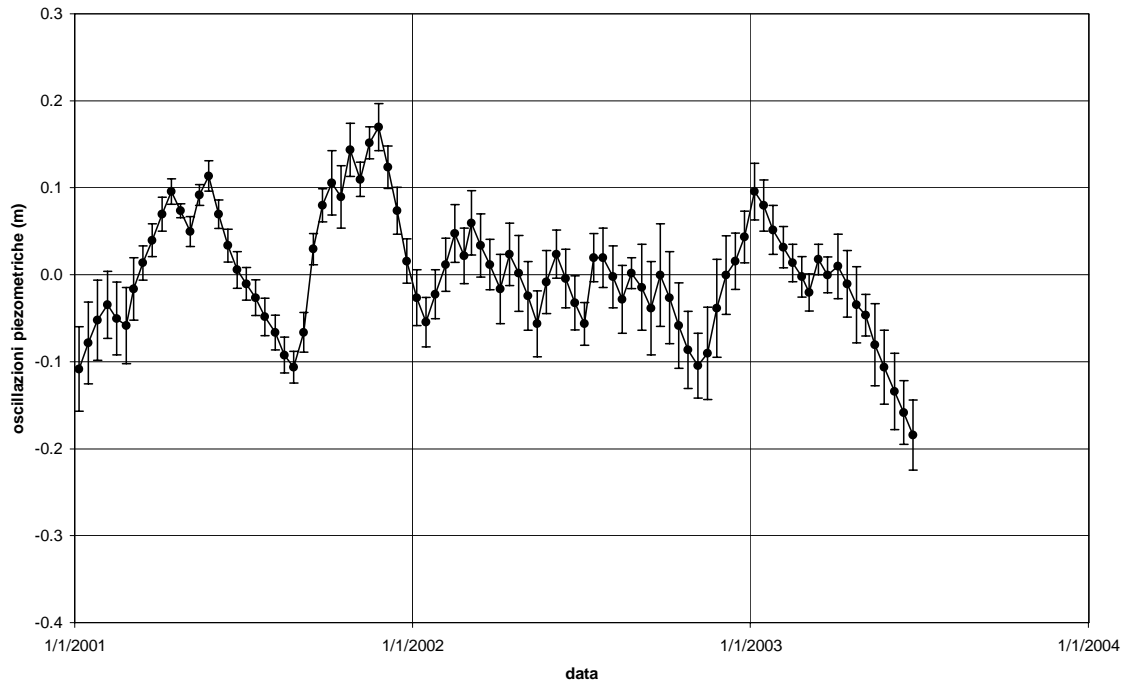


Figura 82. Oscillazioni piezometriche medie per i piezometri del Consorzio Dugali appartenenti al gruppo A.

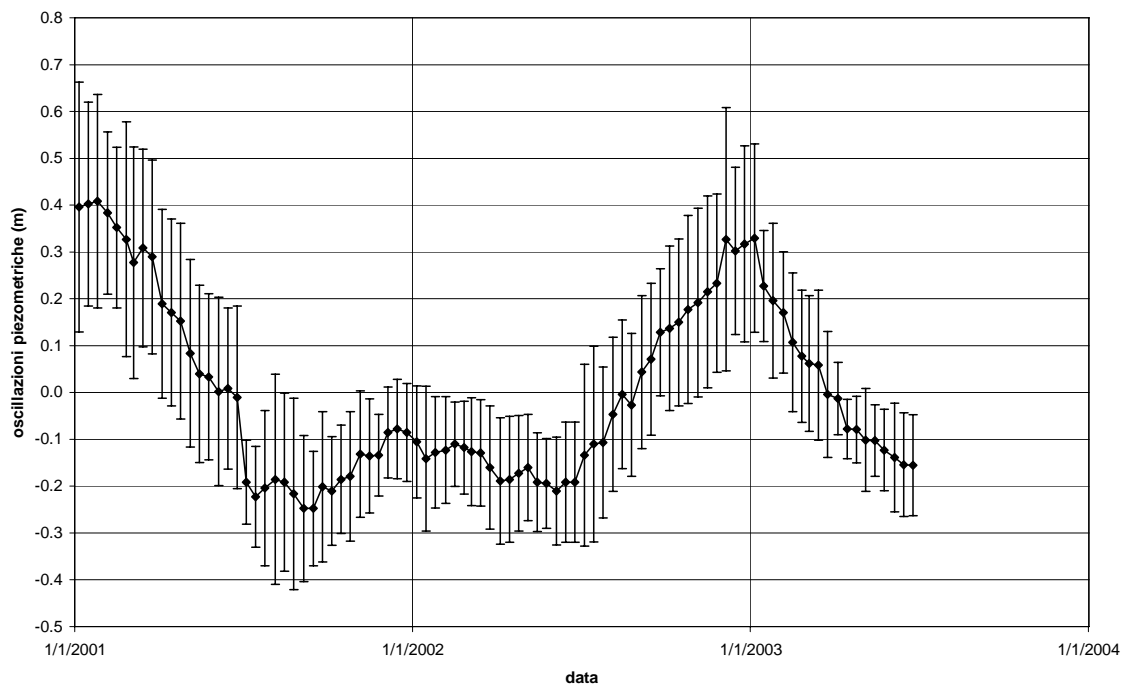


Figura 83. Oscillazioni piezometriche medie per i piezometri del Consorzio Dugali appartenenti al gruppo B.

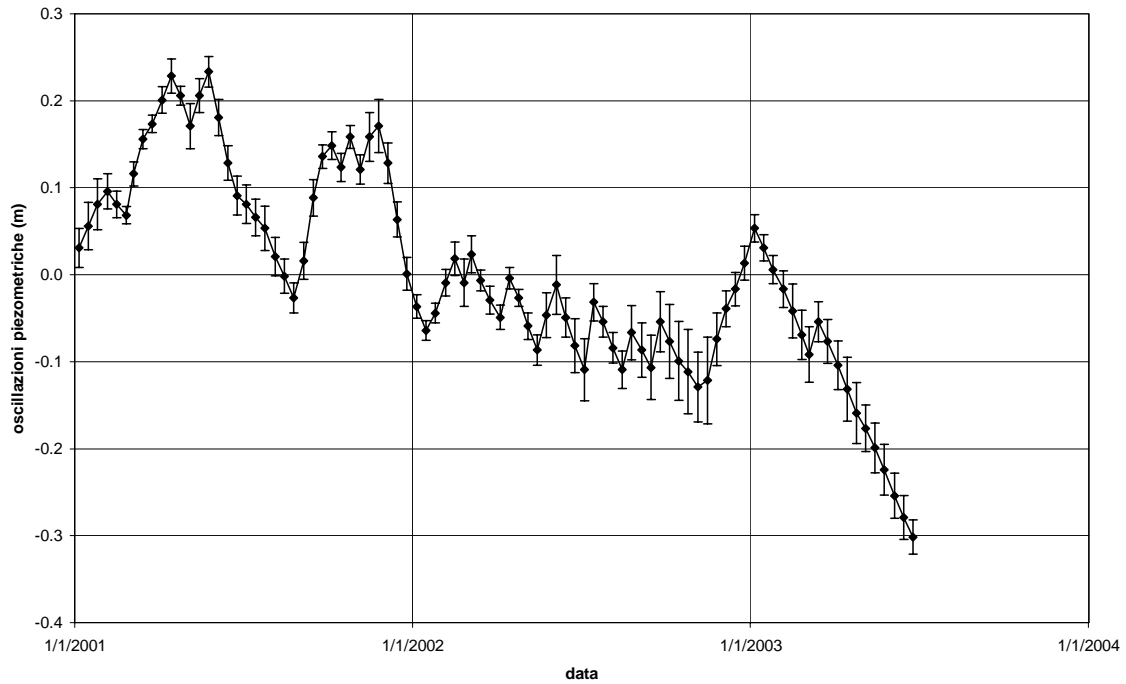


Figura 84. Oscillazioni piezometriche medie per i piezometri del Consorzio Dugali appartenenti al gruppo C.

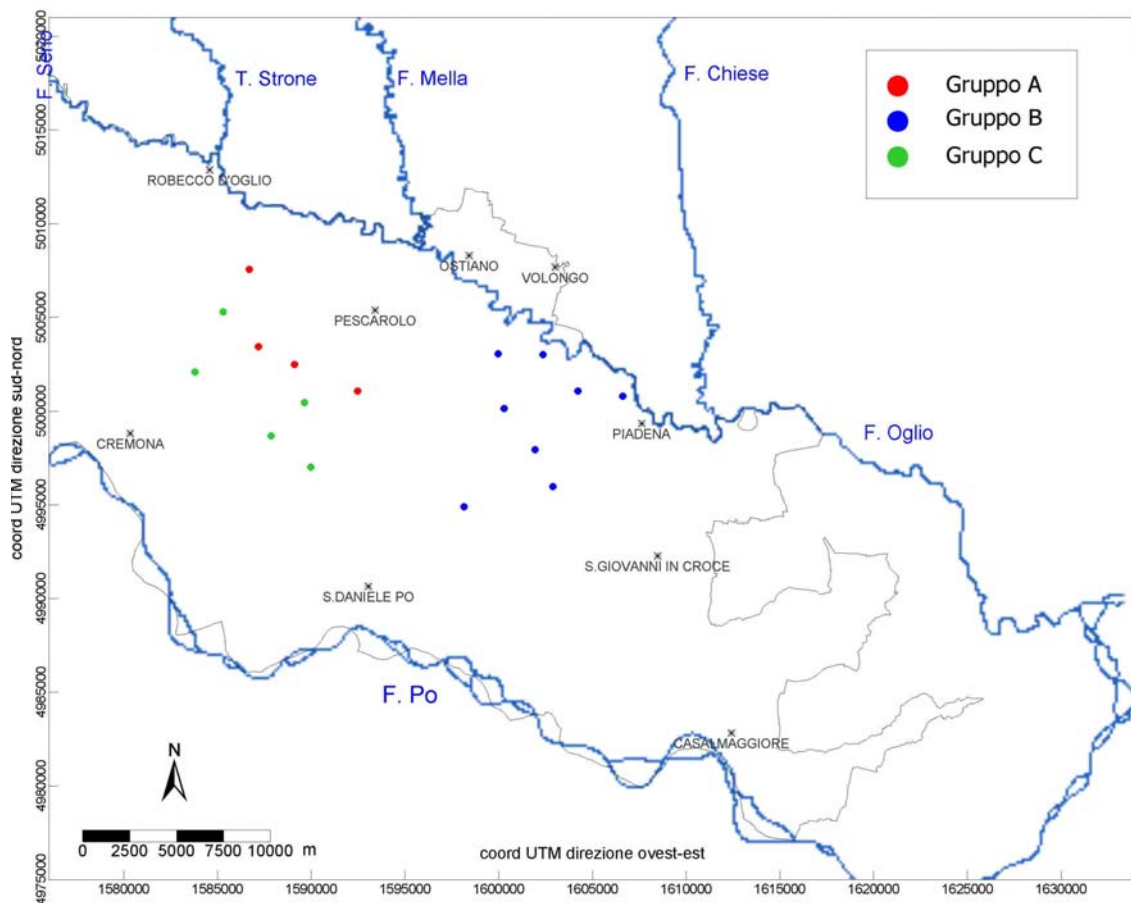


Figura 85. Posizione dei tre gruppi di piezometri del Consorzio Dugali.

Le oscillazioni medie di gruppo per i piezometri della rete gestita da AEM Cremona S.p.A. sono rappresentate in Figura 86. Occorre osservare che questi piezometri sono raggruppati in due zone molto ristrette nei pressi della città di Cremona (Figura 73). L'andamento appare abbastanza simile a quello mostrato dai piezometri del gruppo B del Consorzio Dugali, con dei massimi nell'inverno del 2001 e 2003 e una diminuzione della piezometria nel 2003.

I dati dei piezometri superficiali riportati nel PTUA sono in larga misura relativi alla singola campagna di misura eseguita nel marzo 2003. Si hanno invece le serie temporali per altri sei piezometri, per cinque dei quali il monitoraggio viene gestito dal Politecnico di Milano, mentre il monitoraggio dell'ultimo, che è anche l'unico interno al dominio di studio, è affidato all'ARPA. I dati di questo piezometro non sono stati validati e quindi non sono stati utilizzati per l'interpolazione delle piezometrie di riferimento stazionarie. Questi dati sono comunque utilizzati per l'analisi qualitativa degli andamenti temporali. L'andamento della piezometria nel piezometro identificato con il codice PZ0190940002 è riportato in Figura 87 e mostra un andamento abbastanza irregolare.

Infine la Figura 88 riporta con una scala delle ordinate unica le oscillazioni piezometriche rappresentate nelle figure precedenti. Appare evidente la somiglianza degli andamenti per i piezometri dei Gruppi A e C del Consorzio Dugali e la differenza degli andamenti mostrati dagli altri gruppi di piezometri. La barra di errore orizzontale riportata sui dati del consorzio Vacchelli evidenzia il fatto che per questi dati non è noto il giorno di campionamento all'interno del mese.

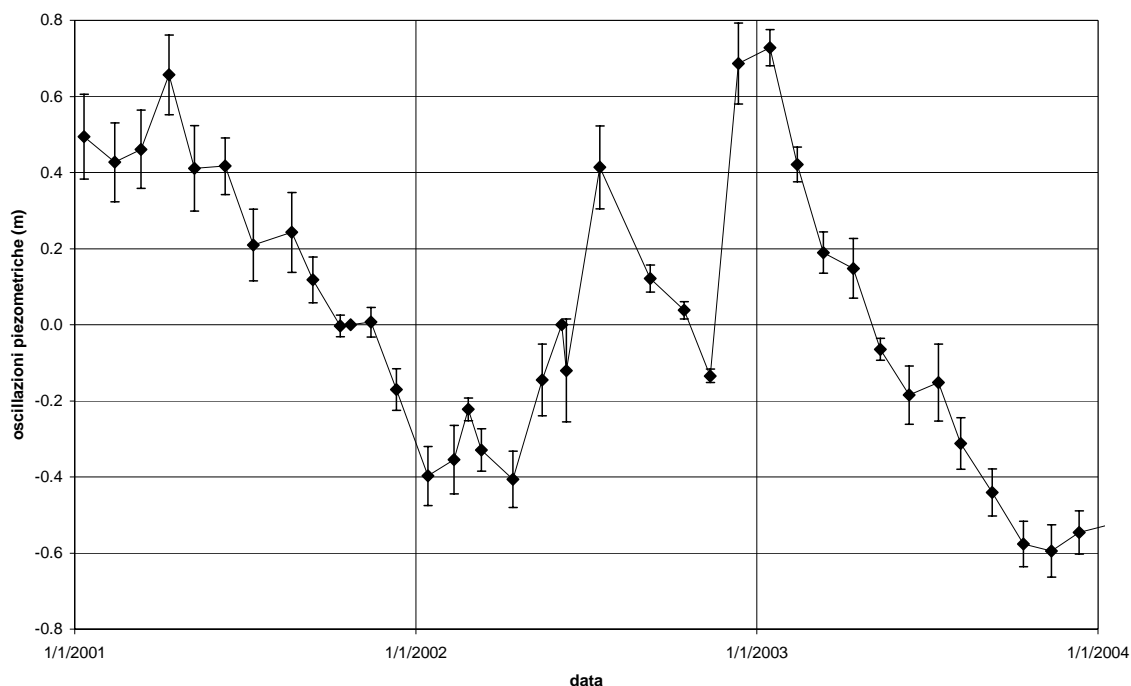


Figura 86. Oscillazioni medie di gruppo per i piezometri superficiali di AEM Cremona S.p.A.

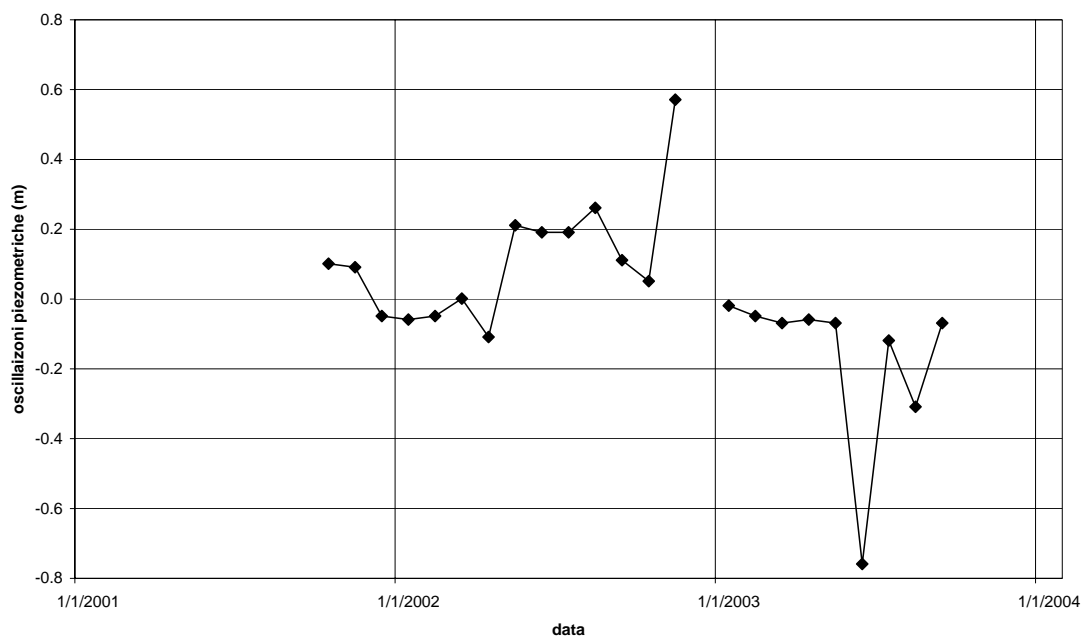


Figura 87. Oscillazione del piezometro superficiale PZ0190940002 (dal PTUA).

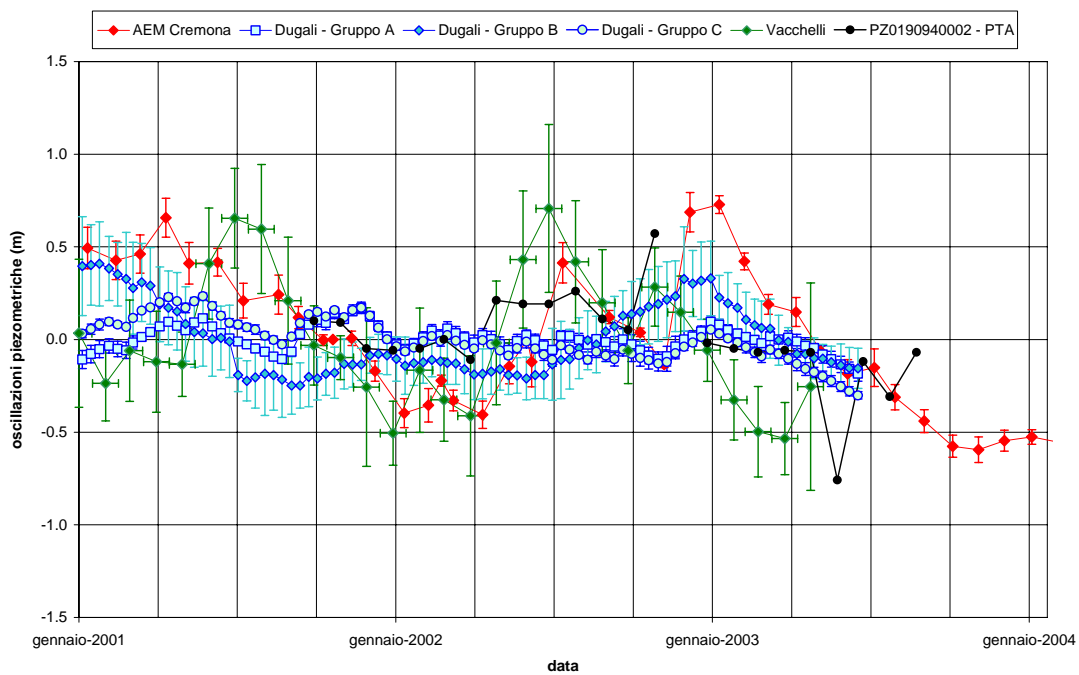


Figura 88. Oscillazioni piezometriche per i diversi gruppi di pozzi o piezometri superficiali.

4.3.2 Piezometria dell'acquifero semi-confinato

Si sono presi in considerazione i dati rilevati da pozzi profondi almeno 50 m; la maggioranza presenta comunque profondità maggiori di 100 m. La Tabella 25 riporta

l'elenco delle fonti di informazione. L'ubicazione dei punti di misura è invece mostrata in Figura 89.

Per ogni pozzo gestito da Padania Acque S.p.A. si hanno molte informazioni tra le quali le coordinate, la profondità, la stratigrafia, la posizione dei filtri e i livelli statici e dinamici espressi come soggiacenze rispetto alla quota del piano campagna. Sono stati presi in considerazione i livelli statici (cioè i livelli dell'acqua a pozzo spento) e non quelli dinamici (misure con pozzo acceso) perché i primi sono più affidabili e sono comunque rappresentativi del comportamento dell'acquifero, in quanto le misure non vengono effettuate simultaneamente (e quindi in assenza di estrazioni), ma con un solo pozzo spento per volta.

Tabella 25. Piezometri o pozzi profondi.

Fonte	Intervallo temporale	Punti di misura	Frequenza di campionamento (rilievi/anno)	Escursione massima (m) nell'intervallo temporale
Padania Acque S.p.A.	Novembre 1960 – aprile 2005	146	Da 1 a 12	6.15
Regione Lombardia (PTUA)	Gennaio 1997 – gennaio 2003	9*	Da 2 a 12	0.9
	Marzo 2003	121	Dato singolo	N/D

Otto di questi sono interni all'area di studio.

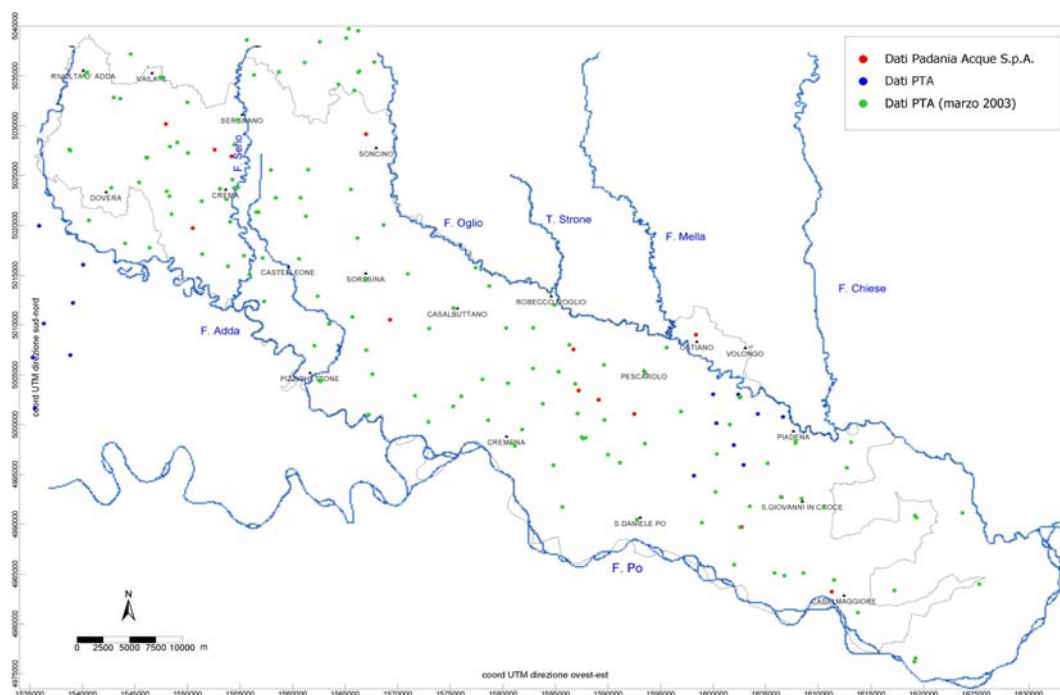


Figura 89. Distribuzione dei punti di misura della piezometria profondi (pozzi con profondità superiore a 50 m) suddivisi in base alla fonte dell'informazione.

Sono stati inoltre aggiunti i dati piezometrici ricavati dal database del PTUA, considerando 10 stazioni di misura utilizzate per l'interpolazione della piezometria per l'acquifero semi-confinato nella stagione estiva (da aprile a settembre) e 156 stazioni per la stessa nella stagione invernale (da ottobre a marzo). La sproporzione nel numero di dati utilizzati per le due stagioni è dovuta al fatto che sono presenti numerosi dati di livello piezometrico

profondo, ma sono quasi tutti (146 su 156) relativi alla campagna di monitoraggio condotta dal Politecnico di Milano nel marzo 2003 e quindi alla sola stagione invernale. Anche per l'acquifero semi-confinato, i risultati sono stati confrontati con le mappe di Beretta *et al.* (1992), basate su 129 punti di misura, per i quali valgono le stesse osservazioni fatte in precedenza per le piezometrie dell'acquifero freatico.

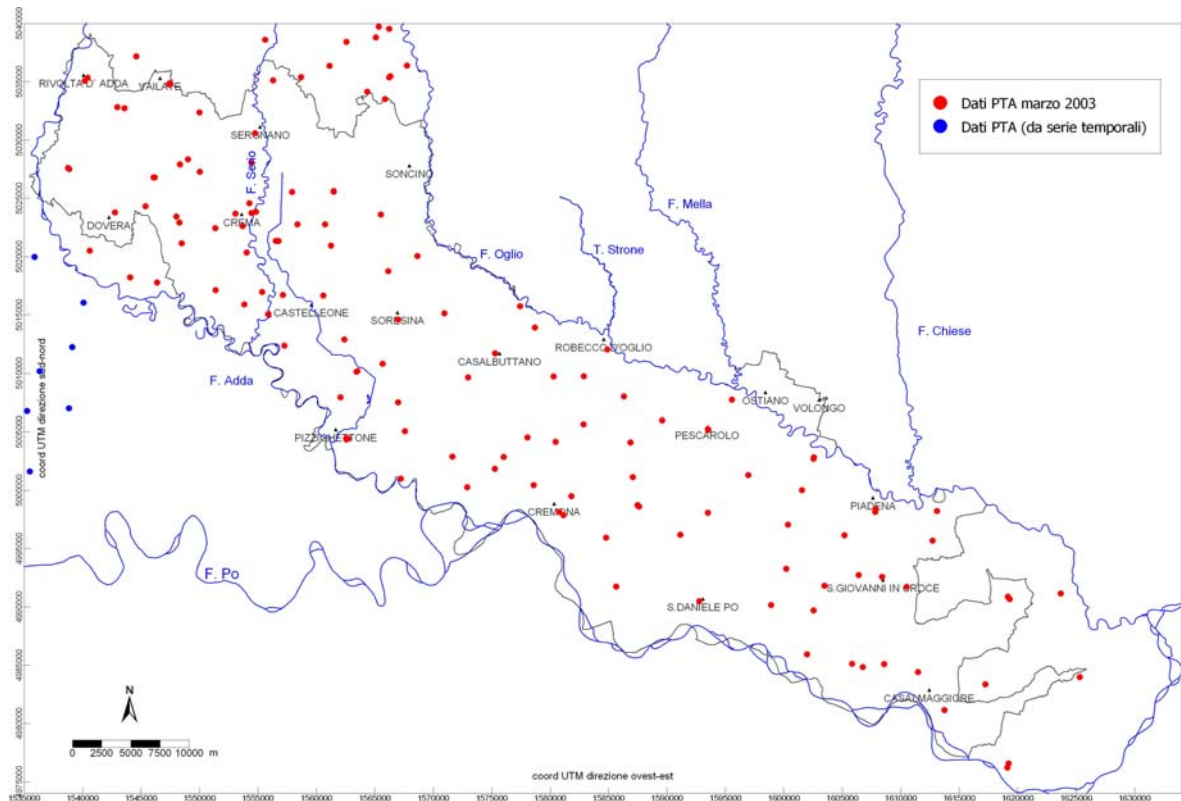


Figura 90. Distribuzione dei punti di misura (da PTUA) considerati per l'interpolazione della piezometria dell'acquifero semi-confinato (stagione invernale).

La piezometria media per l'acquifero semi-confinato per gli anni dal 2001 al 2003 è riportata in Tavola 7 (stagione invernale Tavola 7a; stagione estiva, Tavola 7b). La Tavola 7 è più affidabile per la presenza di un maggior numero di stazioni osservative e si notano alcune differenze rispetto alla piezometria dell'acquifero freatico; soprattutto vicino ai bordi del dominio rappresentato; queste sono da attribuire al fatto che per realizzare queste mappe di piezometria dell'acquifero semi-confinato non sono stati imposti i livelli dei fiumi, come fatto per l'acquifero freatico per il quale il contatto idraulico diretto tra fiume e falda è abbastanza ben dimostrato dai dati a disposizione.

I dati raccolti da Padania Acque S.p.A. possono essere raggruppati in due classi che includono le serie temporali per cui la soggiacenza delle misure eseguite in condizioni statiche risulta inferiore o superiore a 7 m dal piano campagna. I dati sono stati riportati in Figura 91 e Figura 92, che non mettono in evidenza un andamento chiaro, ma mostrano variazioni diverse da un punto di misura all'altro e abbastanza irregolari.

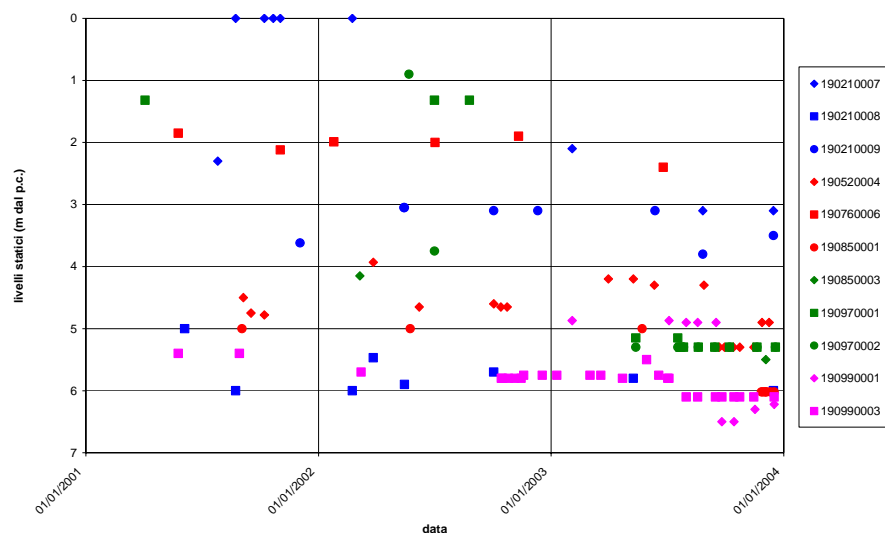


Figura 91. Livelli statici misurati nei pozzi profondi di Padania Acque S.p.A.: serie temporali con soggiacenze inferiori a 7 m dal p.c..

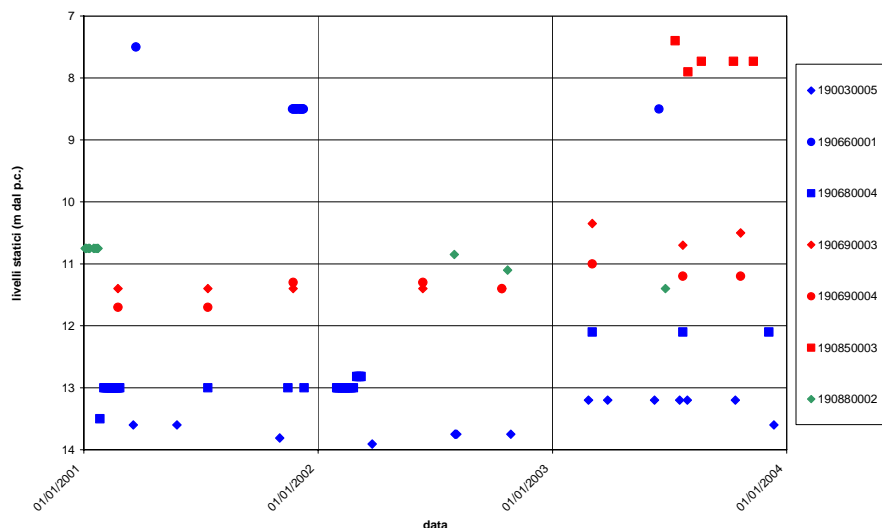


Figura 92. Livelli statici misurati nei pozzi profondi di Padania Acque S.p.A.: serie temporali con soggiacenze superiori a 7 m dal p.c..

Per ricavare un andamento medio nel tempo è stata calcolata la media di gruppo delle oscillazioni piezometriche osservate, dopo che è stata sottratta la media temporale. Le medie di gruppo sono state calcolate solo per quegli istanti temporali per cui fossero disponibili almeno 5 dati in un intervallo temporale di 20 giorni. I risultati, riportati in Figura 93, confermano l'osservazione precedente. Infatti la media di gruppo non evidenzia un andamento chiaro e le barre di errore, la cui ampiezza è pari a due volte la deviazione standard dei dati con cui è calcolata la media di gruppo, sono piuttosto ampie. La Figura 94 mostra infine la distribuzione dei punti di misura raggruppati nelle due classi (soggiacenza inferiore o superiore a 7 m dal p.c.): si nota che i livelli statici più vicini alla quota del piano campagna si concentrano nella zona sud-orientale del dominio di studio e molto vicino ai principali corsi d'acqua, mentre i livelli statici superiori a 7 m dal p.c. sono ubicati nella zona centrale del dominio.

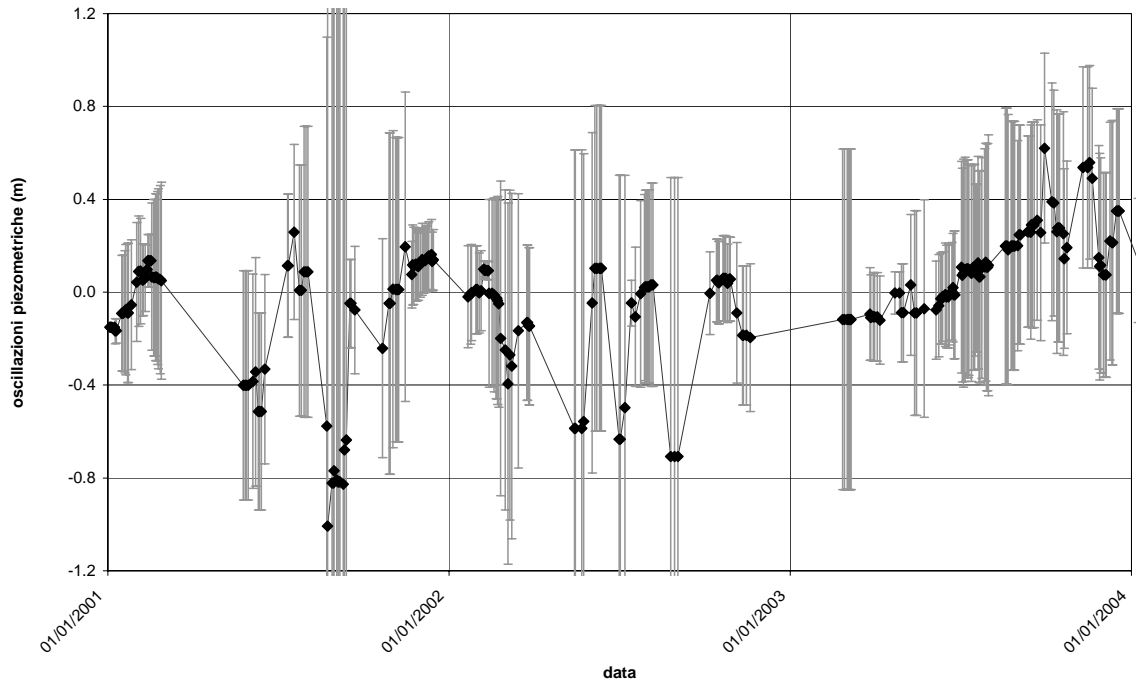


Figura 93. Media di gruppo delle oscillazioni piezometriche nei pozzi profondi di Padania Acque S.p.A.

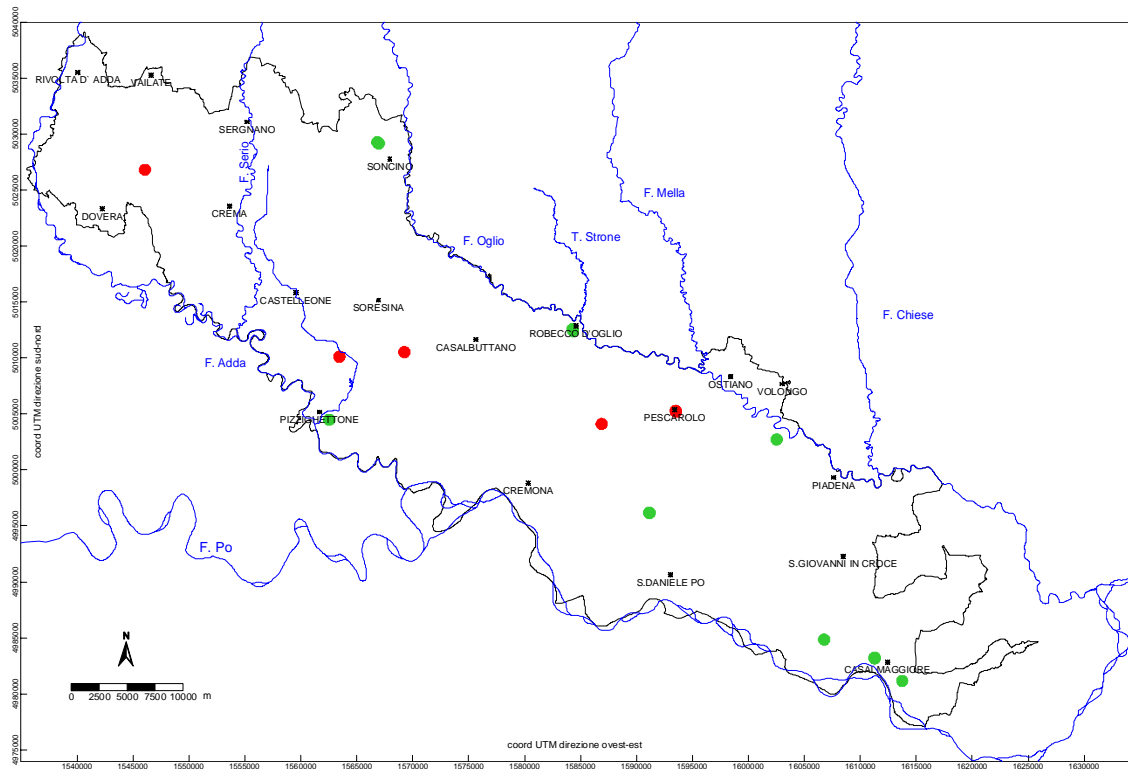


Figura 94. Mappa dell'ubicazione delle classi dei pozzi profondi di Padania Acque S.p.A. per i quali la soggiacenza risulta inferiore (cerchi verdi) o superiore (cerchi rossi) a 7 m dal p.c..

Per quanto riguarda i dati piezometrici ricavati dal database del PTUA, per nove stazioni di misura, otto delle quali interne al dominio di studio, sono disponibili serie di dati con passo di campionamento variabile da 1 a 6 mesi; il monitoraggio delle stazioni interne al dominio di studio è affidato ad ARPA e questi dati non sono stati validati, per cui non sono stati usati nelle interpolazioni delle piezometrie.

La media di gruppo delle oscillazioni piezometriche nei piezometri profondi riportati nel PTUA, mostrata in Figura 95, non fornisce particolari indicazioni poiché la serie temporale è relativamente breve e la deviazione standard, rappresentata dalle barre di errore, è piuttosto grande.

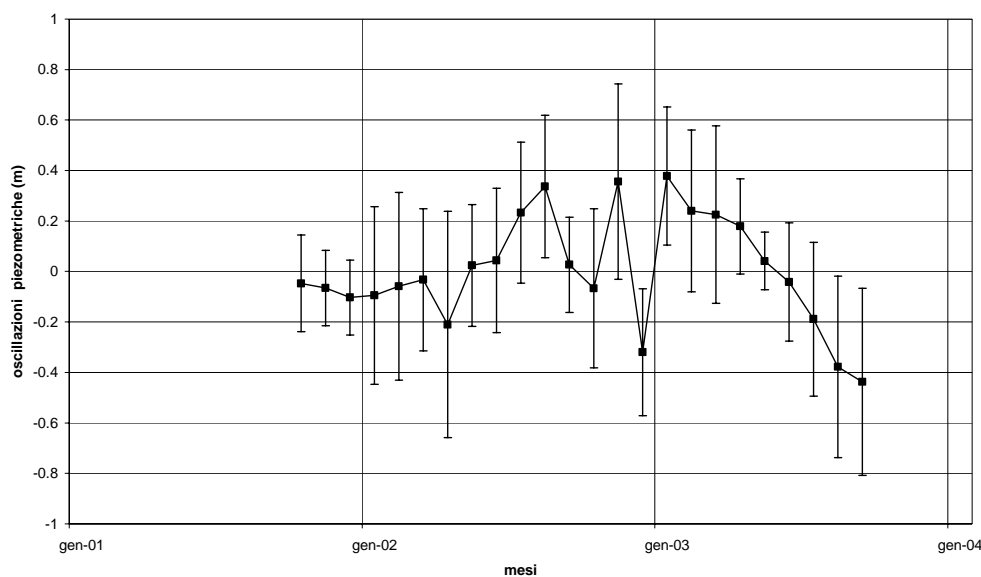


Figura 95. Media di gruppo delle oscillazioni piezometriche per i pozzi profondi del PTUA.

4.4 Parametri dell'acquifero semi-confinato da prove in pozzo

Le prove nei pozzi del sistema acquifero hanno permesso di ricavare stime di alcuni parametri fisici (trasmissività, conducibilità e portate specifiche) dell'acquifero semi-confinato, o, meglio, di alcuni livelli permeabili filtrati all'interno di tale acquifero.

4.4.1 Trasmissività "apparente" dell'acquifero semi-confinato

Per sistemi acquiferi complessi come quello cremonese con alternanza di strati permeabili e impermeabili, i valori di trasmissività calcolati interpretando le prove di portata nei pozzi sono significativi solo alla scala del pozzo e dell'eventuale piezometro di misura, hanno cioè un significato locale entro distanze di 10-50 m dal pozzo. Se, come nel nostro caso, i filtri dei pozzi sono ubicati tra setti semipermeabili posti a profondità di oltre 100 m, i valori di trasmissività ricavati dalle prove di portata vanno riferiti agli intervalli permeabili filtrati dai pozzi. Risulta così evidente che questi valori non sono direttamente utilizzabili per la calibrazione di un modello matematico che simuli il flusso idrico in tutto lo spessore dell'acquifero (orizzonti permeabili e non). Tuttavia una volta identificato lo schema idrogeologico del sistema acquifero cremonese, tali valori opportunamente adattati costituiscono un'informazione molto importante per la calibrazione del modello.

Queste analisi sono state eseguite utilizzando i dati elencati nella Tabella 7 del Capitolo 10 dello studio di Beretta *et al.* (1992) e dalla base di dati di Padania Acque S.p.A. (DB_PA). Nel primo caso sono stati associati i numeri riportati nella prima colonna al codice dei pozzi di Padania Acque S.p.A. (ad esempio il n° 1 di Acquanegra corrisponde al codice pozzo 190010001 del DB_PA) in modo da ubicare il dato di trasmissività con precisione nel piano orizzontale. Per il comune di Cremona sono riportati in tabella otto valori di trasmissività simili tra loro che però non possono essere associati a coordinate esatte perché i pozzi a cui si riferiscono non sono gestiti da Padania Acque S.p.A. Essendo i valori di trasmissività poco variabili è stata calcolata la loro media aritmetica e il valore è stato riferito al centroide del comune di Cremona. Dal DB_PA sono stati ripresi i dati di 81 prove a gradini e 8 curve di risalita interpretando le prime col metodo di Logan e le seconde col metodo di Pouchon³.

Al fine di effettuare una validazione dei valori di trasmissività ottenuti con tecniche diverse e da diversi operatori, i dati ripresi da Beretta *et al.* (1992) e quelli del DB_PA da noi interpretati sono stati interpolati con il metodo kriging su una griglia con celle quadrate di lato 500 m separatamente, in modo da poterne poi confrontare gli andamenti e i valori assoluti. I due elaborati risultano essere coerenti tra loro e si è quindi deciso di utilizzare insieme tutti i valori di trasmissività riferiti a profondità tra i 100 e 250 m per interpolare la carta rappresentata nella Tavola 8.

È importante sottolineare un concetto metodologico di base, e cioè che i valori di trasmissività, le cui posizioni sono riportate nell'allegato, si riferiscono solamente agli intervalli filtrati dei vari pozzi dove è stata condotta la prova di portata. I filtri sono tutti ubicati nell'acquifero semi-confinato, oppure entro livelli permeabili profondi del freatico dove l'acquifero è monostrato, quindi i valori di trasmissività devono essere riferiti solamente a questi intervalli permeabili filtrati e non possono essere riferiti in modo diretto all'intero acquifero semi-confinato oppure all'intero acquifero dove è monostrato. In conclusione questi valori sono da considerare come trasmissività "apparenti".

Le trasmissività lungo il corso dell'Adda presentano valori attorno ai 700-1000 m²/d e sono molto più elevate delle trasmissività ricavate dalle prove in pozzi lungo l'Oglio che si aggirano su valori di 100-250 m²/d. La parte centrale dell'area è caratterizzata da una vasta zona con valori pressoché costanti ed intermedi di trasmissività che si aggirano tra 300 e 500 m²/d. A Cremona, alla confluenza dell'Adda nel Po, si riscontrano valori di trasmissività anche maggiori di 1500 m²/d e valori analoghi sono stati calcolati lungo l'allineamento S. Daniele Po-S. Giovanni in Croce sino a sud della confluenza del Chiese in Oglio.

4.4.2 Conducibilità idraulica dell'acquifero semi-confinato

A partire dalle trasmissività è possibile calcolare la conducibilità idraulica: come già osservato i valori di T ottenuti da prove di portata e a gradini sono indicativi del solo acquifero semi-confinato e in particolare dei soli intervalli filtrati dai pozzi per acqua.

È stata quindi ricavata la conducibilità idraulica K dividendo la trasmissività per lo spessore dei filtri; i valori ottenuti sono stati interpolati con metodi geostatistici (kriging) e riportati nella Tavola 9.

Nella zona nord occidentale, lungo il corso attuale dell'Adda e lungo i suoi terrazzi geomorfologici rappresentati in Tavola 2 si riscontrano valori di conducibilità compresi tra $0.6 \cdot 10^{-3}$ m/s e $1.2 \cdot 10^{-3}$ m/s che si ritengono caratteristici dei sedimenti depositati dall'Adda. I sedimenti depositati dal Serio, lungo la parte settentrionale del suo corso, presentano

³ Per una descrizione di questi metodi si rimanda al manuale *Determinazione dei parametri idrogeologici* di G. Chiesa, distribuito dall'A.N.I.P.A.

valori di conducibilità di circa un ordine di grandezza più bassi. Nella parte finale del suo corso, alla confluenza del Serio nell'Adda, e lungo il paleoalveo del Serio antico sino a Pizzighettone si trova invece una vasta area che presenta conducibilità attorno a $1.2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Lungo tutto il corso dell'Oglio e dei suoi terrazzi geomorfologici si riscontrano trasmissività con valori molto bassi, circa $0.2 \cdot 10^{-3}$ m/s, quindi mediamente un ordine di grandezza più bassi dei sedimenti lungo l'Adda. A Cremona, alla confluenza dell'Adda nel Po è stata identificata un'ampia struttura che presenta valori massimi di conducibilità proprio in corrispondenza della struttura di massimo delle isopache dei sedimenti permeabili rappresentata nella Tavola 16, che verrà illustrata nel Paragrafo 4.6.3. L'asse di questa struttura si estende dapprima verso est e poi verso sud sino a S. Daniele Po. I valori di conducibilità di questi sedimenti depositati presumibilmente dal Po attuale e da suoi paleoalvei si aggirano attorno a 10^{-2} m/s.

La conoscenza della conducibilità idraulica è importante, perché da essa è possibile ricavare la trasmissività dell'intero sistema acquifero e non dei soli sedimenti circostanti i tratti filtrati dai pozzi.

Le stratigrafie allegare allo studio di Beretta *et al.* (1992) mostrano che gli spessori di sedimenti permeabili, specialmente per la zona di Cremona e lungo il corso dell'Adda, sono di un centinaio di metri circa. Pertanto la stima della trasmissività del sistema acquifero dovrebbe essere dell'ordine di 10^{-2} - 10^{-1} m²/s. È quindi evidente che il campo di trasmissività del sistema acquifero non può essere quello riportato in Tavola 8, ma sarà probabilmente di un ordine di grandezza superiore, come evidenziato nel successivo Paragrafo 5.2.2.3 dai risultati della calibrazione.

I filtri sono, in genere, posizionati entro sabbie medie o grossolane e ghiaie di varia pezzatura ed infatti i valori di conducibilità ricavati risultano consistenti con i valori caratteristici delle conducibilità di sedimenti di questo tipo riportati sulla tabella 2.3, p. 29, da Freeze & Cherry (1979) e da Bear (1979). L'interpolazione di questi valori sull'intero volume di sedimenti permeabili che costituiscono l'acquifero semi-confinato è una operazione molto critica poiché, come risulta dalle tabelle sopra citate, la stessa facies litologica per sedimenti non consolidati di questo tipo può presentare valori di conducibilità anche di alcuni ordini di grandezza differenti a seconda della sua profondità, dell'impacchettamento dei granuli, del grado di cementazione, ecc. Quindi l'ipotesi di omogeneità dei valori di conducibilità di sedimenti dello stesso tipo, su cui si basa l'interpolazione ed il calcolo della trasmissività equivalente del semi-confinato rappresentata nella Tavola 17, viene resa incerta dall'eterogeneità della stessa litologia lungo la colonna litostratigrafica. Le informazioni ricavate da questo elaborato possono tuttavia risultare utili a patto che vengano incrociate con altre carte tematiche, come fatto in questo lavoro.

È importante sottolineare che nella parte settentrionale dell'allegato sono stati rappresentati alcuni valori di conducibilità ricavati in modo analogo ma relativi a prove di portata eseguite in pozzi profondi poche decine di metri e quindi sicuramente riferibili all'acquifero freatico. Come si osserva le conducibilità del freatico assumono valori oltre cinque volte superiori a quelli corrispondenti del semi-confinato e ciò è consistente con i valori di trasmissività equivalente ricavati col modello inverso per il freatico nella zona e con gli altri elaborati che indicano che la maggior parte della portata idrica avviene nell'acquifero freatico.

4.4.3 Portate specifiche dell'acquifero semi-confinato

I valori delle portate specifiche dei pozzi sono grandezze misurate quasi di routine nei pozzi per acqua e quindi sono disponibili molti valori per eseguire l'interpolazione dell'elaborato. Purtroppo i valori delle portate specifiche non sono legati solamente alla

trasmissività dei sedimenti entro i quali è stato ubicato il filtro del pozzo ma anche ad alcune caratteristiche idrauliche del pozzo stesso che non sono interessanti per lo studio delle trasmissività dell'acquifero. In ogni caso l'utilità di questo elaborato consiste soprattutto nel poter prevedere le portate specifiche di eventuali nuovi pozzi perforati nel semi-confinato. La Tavola 10 ha permesso di effettuare una zonazione dell'acquifero in base ai valori di portata specifica che è stata distinta in tre categorie e cioè: zone blu caratterizzate da portate specifiche basse con valori sino a 3 (l/s)/m, zone bianche caratterizzate da portate specifiche comprese tra 3 e 6 (l/s)/m e zone rosse con portate specifiche elevate anche maggiori di 9 (l/s)/m.

Zone rosse con portate specifiche elevate sono presenti lungo il corso dell'Adda a nord e lungo il corso del Po da Cremona sino a Casalmaggiore a sud. La fascia di acquifero lungo il fiume Oglio è caratterizzata da pozzi con portate specifiche molto basse parallelamente a tutto il suo corso. Un'area a portate specifiche molto basse è anche presente lungo il corso del Serio a nord. Altrove si riscontrano valori medi di portate specifiche interrotti soltanto qua e là da piccole strutture locali con valori anomali ora più bassi ora più alti.

Sottolineiamo anche che, nella parte settentrionale, sono stati riportati in rosso alcuni valori di portate specifiche relative a pozzi perforati nel freatico che mediamente sono di un ordine di grandezza maggiori delle portate specifiche del semi-confinato. Questo dato è in accordo con i valori di conducibilità del freatico riportati sulla Tavola 9 e assieme ai valori dei gradienti idraulici del freatico e del semi-confinato hanno convalidato l'ipotesi che la maggior parte del flusso idrico avviene nell'acquifero freatico.

4.5 Prelievi

Uno degli obiettivi del modello per l'acquifero cremonese è quello di studiare la sostenibilità delle estrazioni presenti e future di acque sotterranee della Provincia. È quindi importante tenere in considerazione le estrazioni effettuate nell'area.

In Tavola 11 viene rappresentata la distribuzione dei punti di prelievo idrico ad uso acquedottistico gestiti da Padania Acque S.p.A.; si tratta di 119 pozzi attivi, mentre i rimanenti 129 pozzi sono in parte cementati e in parte usati per altri scopi (piezometri, protezione catodica o riserva).

Oltre a questi dati di prelievo, come già scritto nel Paragrafo 2.7, sono stati considerati i prelievi per altri usi a partire dai dati di concessione da PTUA. Questi dati sono aggregati per comune e quindi sono stati distribuiti sul territorio comunale in modo uniforme. La distribuzione risultante è pressoché omogenea, ad eccezione dell'area settentrionale dell'acquifero per effetto dei prelievi da falda ad uso irriguo particolarmente intensi nei comuni della provincia di Bergamo considerati.

Per stimare la distribuzione spaziale del prelievo idrico da falda sono state raccolte informazioni da diverse fonti:

- Per l'uso agricolo sono stati utilizzati i risultati del modello di bilancio idrologico nel suolo, ad eccezione della zona meridionale in cui sono stati usati i valori delle concessioni.
- Per l'uso idropotabile sono stati usati principalmente i valori dei prelievi da pozzo presenti nel data base di Gandolfi (2004); nei comuni per i quali non è disponibile un dato di maggiore dettaglio come quello di Padania Acque S.p.A. (si tratta dunque dei comuni appartenenti alle province di Lodi, Mantova e Bergamo compresi nel dominio del modello) è stato considerato il dato di concessione da PTUA. In particolar modo per il comune di Cremona è stato utilizzato il dato riportato sul sito ufficiale dell'AEM Cremona S.p.A. (www.aemcremona.it) di 12 Mm³/anno.

4.6 Struttura idrogeologica del sistema acquifero

Per quanto riguarda la ricostruzione della struttura idrostratigrafica dell'acquifero, sono stati utilizzati i risultati di Beretta *et al.* (1992) e di GAP e le stratigrafie inserite nella banca dati (paragrafo 2.9). In particolare l'analisi di questi dati è stata rivolta in questo lavoro soprattutto alla determinazione di due superfici:

- la base del sistema acquifero;
- la superficie di separazione tra la porzione del sistema acquifero più superficiale ad alta trasmissività e quella profonda.

Per fare questo oltre all'analisi delle sezioni litostratigrafiche pubblicate da Beretta *et al.* (1992) sono state realizzate alcune sezioni ottenute attraverso una simulazione geostatistica, che è descritta in dettaglio nell'Appendice 9.8.

4.6.1 Base del sistema acquifero

In vista della realizzazione di un modello bistrato o di un modello monostrato equivalente, il primo problema da affrontare è la determinazione della base del sistema acquifero da modellare.

Ad oggi le elaborazioni più aggiornate disponibili a scala regionale sono quelle dello studio GAP, nel quale vengono differenziati quattro gruppi acquiferi principali denominati con le lettere A, B, C, D partendo dalla superficie topografica andando verso il basso. Sebbene tale studio si riferisca ad una scala di minore dettaglio rispetto a quella provinciale, inizialmente si è comunque ritenuto opportuno fare riferimento ad esso per la determinazione della base dell'acquifero da modellare in una prima fase.

Le carte delle basi dei gruppi acquiferi A, B e C, sono state scaricate in formato *.shp dal portale della Regione Lombardia; da questi file sono state successivamente ricavate e interpolate le quote s.l.m.m. di tali superfici.

Confrontando le mappe così ottenute e riportate nelle precedenti relazioni con la posizione dei filtri nei pozzi (e quindi con la profondità alla quale vengono effettuate le estrazioni) è possibile osservare che:

- nell'area settentrionale della Provincia i prelievi interessano principalmente il gruppo acquifero B e in parte C, pertanto i due gruppi acquiferi più superficiali A e B non sono sufficientemente profondi per modellare completamente il flusso di tale zona;
- nella parte meridionale (da Cremona verso sud-est) il gruppo A si approfondisce notevolmente ed è il sistema sfruttato per i prelievi idrici locali.

Una possibilità per scegliere la base del modello è quella di considerare il gruppo acquifero C a nord, il gruppo B nella zona di Cremona e il gruppo A nella restante porzione meridionale del territorio, in modo da comprendere tutti i 250 pozzi del DB_PA. Dal confronto della quota di questa superficie con le sezioni idrogeologiche allegate allo studio di Beretta *et al.* (1992) si è visto che la scelta di questo limite come base impermeabile dell'acquifero porterebbe a considerare uno spessore di sedimenti troppo ampio rispetto alla profondità alla quale vengono effettuate le estrazioni, coinvolgendo inoltre sedimenti sui quali non si hanno informazioni né di trasmissività né stratigrafiche.

Si è preferito interpretare un orizzonte da utilizzare come fondo impermeabile del modello. Si è cioè ipotizzato che il flusso sia trascurabile ad una profondità maggiore della massima profondità raggiunta dai pozzi per acqua, che attraversano i sedimenti più permeabili e quindi favorevoli alla circolazione idrica sotterranea, mentre anche le perforazioni dei pozzi per acqua più profondi si fermano quando vengono incontrati strati di sedimenti fini, poco permeabili e quindi poco produttivi, cioè nei quali i flussi sono molto bassi. La base del modello è stata quindi ricostruita con l'utilizzo della profondità dei pozzi di Padania

Acque S.p.A. e col confronto con le sezioni idrostratigrafiche di Beretta *et al.* (1992), considerando non solo le sequenze deposizionali ivi descritte, ma anche le profondità dei pozzi riportati in tale lavoro.

Nella Tavola 12 sono rappresentate (a) la profondità della base rispetto al piano campagna e (b) la quota della base del modello così ottenuta.

Questo elaborato non rappresenta un limite fisico ben definito ma un orizzonte equivalente che è stato ottenuto interpolando la profondità massima dei pozzi per acqua la cui posizione è rappresentata nell'allegato. L'ipotesi è che le velocità di filtrazione del semi-confinato sono molto basse poiché, a parità di gradienti idraulici col freatico i valori di trasmissività ricavati dalle numerose prove di portata in pozzi profondi (circa 100) indicano valori di trasmissività 20-30 volte inferiori alle trasmissività del freatico. Siamo quindi di fronte a velocità integrate lungo la verticale molto più basse di quelle del freatico, con acqua che viene praticamente movimentata dalle depressioni locali provocate dal pompaggio dei pozzi per acqua. Globalmente i valori delle portate estratte col pompaggio dal semi-confinato sono di gran lunga inferiori alle portate movimentate nel freatico dall'irrigazione, fontanili, piogge ecc.

Nella zona a nord il letto dell'acquifero semi-confinato, base di tutto il sistema acquifero, è stata localizzata ad una quota media tra -90 e -100 m s.l.m.m., nella parte centrale essa si approfondisce raggiungendo valori di -150 m s.l.m.m. sino a -200 m s.l.m.m. in corrispondenza della città di Cremona dove l'Adda confluisce nel Po. Nella parte meridionale il letto equivalente del sistema acquifero si trova a quote variabili tra -130 m e -180 m s.l.m.m.

4.6.2 Base dell'acquifero freatico equivalente

La superficie di separazione tra la porzione superficiale del sistema acquifero, caratterizzata da trasmissività elevate, acque meno pregiate, forti interazioni con le acque superficiali, e la porzione profonda del sistema acquifero, caratterizzate da acque generalmente abbastanza "protette" e flussi causati principalmente dal prelievo di tipo idropotabile, è stata ottenuta analizzando le sezioni litostratigrafiche rappresentate in Appendice 9.8 e confrontandole con quelle di Beretta *et al.* (1992).

Questa superficie ha una grossa importanza per il modello concettuale, come vedremo nel successivo Paragrafo 4.7, e può essere identificata con la base dell'acquifero freatico equivalente. Per semplicità nel seguito indichiamo questa superficie con la sigla BFE.

In Figura 96 sono rappresentate le tracce delle 43 sezioni stratigrafiche analizzate: 29 sono analoghe a quelle di Beretta *et al.* (1992), le rimanenti 14 sono state pensate per approfondire l'analisi nel Mantovano o in aree particolarmente critiche.

Per determinare BFE sono stati analizzati due tipi di punti sulle sezioni di Beretta *et al.* (1992): gli incroci delle sezioni stesse e i pozzi con profondità maggiore di 50 m. La scelta per posizionare BFE è stata fatta in base ad alcuni criteri:

- BFE si riferisce alla quota superiore di lenti limoso-argillose, che abbiano una discreta continuità laterale lungo la sezione esaminata e/o quella trasversale.
- Lo spessore dei sedimenti a bassa permeabilità sotto BFE deve essere tale da garantire una separazione delle acque superficiali da quelle profonde.
- La presenza di depositi grossolani (ad esempio, ghiaie) è interpretata come elemento caratteristico dell'acquifero freatico superficiale, che è contraddistinto da valori di trasmissività piuttosto elevati. In questo caso si pone BFE sotto tali sedimenti ghiaiosi, compatibilmente con gli altri criteri.

- Le stratigrafie devono essere affidabili: la presenza di più pozzi con stratigrafia simile in una data zona, la maggior profondità delle indagini, la corrispondenza negli andamenti laterali su più sezioni e in particolare la congruenza delle stratigrafie negli incroci sono elementi che permettono di confermare una data scelta.
- Si deve tenere conto della posizione dell'area esaminata, in quanto il dominio studiato è fortemente influenzato dai fiumi Adda, Serio, Oglio e Po, e le sequenze deposizionali sono collegate con i processi sedimentari di questi fiumi. In questo modo è possibile comprendere meglio l'attendibilità di una stratigrafia e il metodo migliore per scegliere BFE.

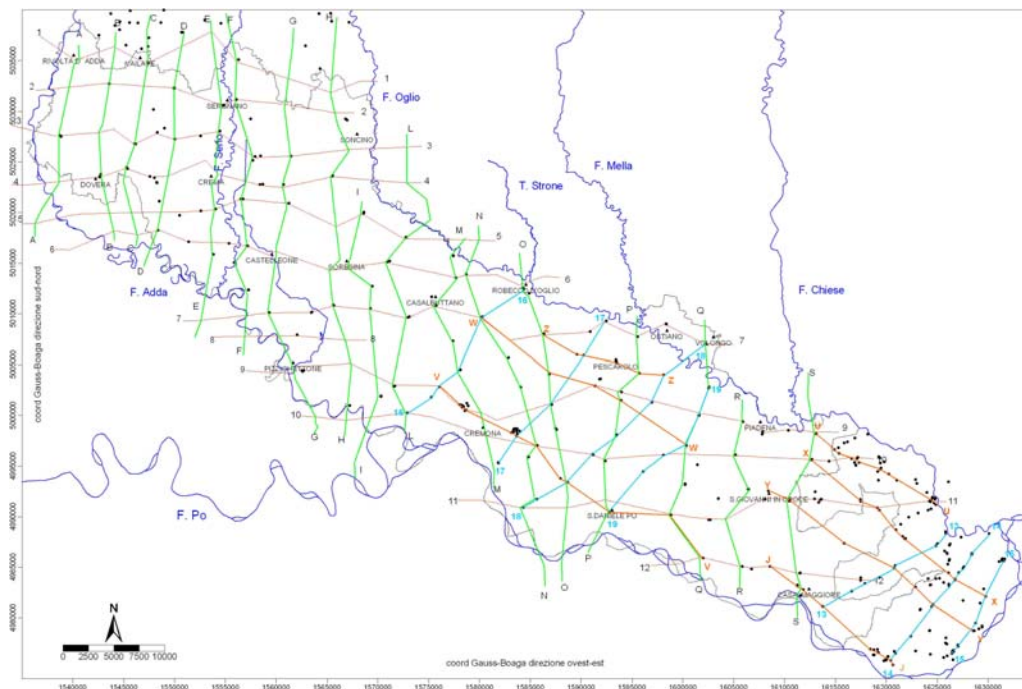


Figura 96. *Tracce delle sezioni: in rosso e verde le tracce delle sezioni di Beretta et al. (1992), in azzurro e arancione le tracce delle sezioni generate con T-PROGS e Rockworks.*

Seguendo questi criteri si è cercato di individuare BFE. Non sempre però è possibile trovare una superficie che separi i due acquiferi in modo da soddisfare tutti o la maggior parte dei criteri elencati; in questi casi si è assegnato a BFE un valore interpolato che rappresenti un limite (affetto da un certo grado di approssimazione) per la separazione tra i flussi più intensi e quelli profondi. La zona più critica è quella della confluenza dell'Adda nel Po dove il fiume ha alternativamente depositato ed eroso le lenti a bassa permeabilità generando continuità verticale nei sedimenti sabbiosi, mettendo a contatto le acque di falda a diverse profondità. Per affrontare il problema in questa zona sono state generate altre sezioni dirette parallelamente e perpendicolarmente ai fiumi Po e Oglio (sezioni V, W, Z e da 16 a 19), tramite le quali si è cercato di definire un limite, seppur approssimato, per la separazione dei flussi più intensi e quelli più profondi.

I valori della quota di BFE così ottenuti sono stati interpolati con metodi geostatistici (kriging) su una griglia a maglie quadrate di lato 500 m e in seguito filtrati con un filtro passa-basso al fine di smorzare gli andamenti più irregolari (Tavola 13).

Il letto dell'acquifero freatico non è costituito da una formazione argillosa continua e ben definita nello spazio come è facilmente deducibile da una semplice ispezione visiva delle

sezioni litostratigrafiche di Beretta *et al.* (1992), ma è un livello semipermeabile discontinuo e interrotto da numerose finestre idrogeologiche. Queste discontinuità dell'orizzonte semipermeabile mettono in contatto diretto l'acquifero freatico col sottostante acquifero semi-confinato e favorisce localmente una miscelazione delle acque freatiche, di qualità scadente, con quelle profonde più adatte ad usi civili.

Come considerazione di carattere generale risulta, anche da una ispezione visiva della Tavola 13, che le principali strutture hanno i loro assi orientati grosso modo lungo i corsi attuali o lungo i terrazzi geomorfologici di Tavola 2. Fa eccezione la struttura a sinclinale nella parte sud dell'elaborato con asse che si estende da ovest a est, da S. Daniele Po sino alla confluenza dell'Oglio nel Po, che non è allineata col corso attuale del Po ma col corso del Po ad ovest di Cremona e coincide con il terrazzo geomorfologico, riportato anche sulla Tavola 2 e sulle carte geologiche, scavato anticamente dal Po.

La parte nord occidentale della Tavola 13 evidenzia una struttura, grosso modo parallela al corso dell'Adda tra Rivolta D'Adda e Dovera. Questa struttura è interrotta da una marcata struttura a sinclinale con asse nord-sud parallela ai terrazzi ed al corso attuale del Serio e a quello antico del Serio Vecchio. A ovest tra Soncino e Soresina è presente una struttura di alto che corre parallela al corso dell'Oglio ed ai suoi terrazzi e il cui asse si sviluppa per molti km verso sud sino a Piadena. La parte centrale dell'elaborato, tra Soresina, Casalbuttano e Pizzighettone, è caratterizzata da valori abbastanza costanti della profondità del letto del freatico, tra 10 e 20 m s.l.m.m. Più a sud, alla confluenza dell'Adda nel Po, a Cremona, il letto del freatico si approfondisce bruscamente, passando da 10 m sino a -30 m s.l.m.m. in meno di 10 km. Questo approfondimento raggiunge un minimo di -40 m s.l.m.m. lungo l'asse della sinclinale che corrisponde ad un antico alveo del Po. A sud il letto del freatico s'innalza raggiungendo valori maggiori di -20 m s.l.m.

4.6.3 *Analisi della permeabilità dei sedimenti del sistema acquifero attraverso le stratigrafie*

Avendo a disposizione le stratigrafie e la quota della BFE è possibile fare delle elaborazioni che permettano di estrapolare da questi dati delle informazioni riguardanti il tipo di sedimenti predominante negli acquiferi o nell'acquitardo che li separa. In particolare sono stati calcolati:

- lo spessore dei sedimenti permeabili nell'acquifero freatico compresi tra la superficie freatica e BFE;
- lo spessore dei sedimenti permeabili nell'acquifero semi-confinato compresi tra BFE e la quota del fondo impermeabile;
- la frazione di sedimenti impermeabili nei 50 m sottostanti BFE.

A tal fine si è scelto di suddividere i diversi tipi di sedimenti in due classi: sono definite permeabili tutte le ghiaie (da grossolane a fini, includendo i conglomerati fessurati) e le sabbie medie e grossolane, e impermeabile tutto il resto.

Con un codice di calcolo scritto appositamente si calcolano le variabili interessate ponendo attenzione a considerare stratigrafie sufficientemente profonde (ad esempio per la frazione di sedimenti impermeabili è necessario che le indagini esaminate siano almeno più profonde di BFE-50 m).

4.6.3.1 Spessore dei sedimenti permeabili del freatico

La Tavola 14 rappresenta lo spessore dei sedimenti permeabili (ghiaie e sabbie) dell'acquifero freatico compresi tra il suo fondo, rappresentato nella Tavola 13, e l'altezza freatica media di riferimento della Tavola 4. I valori degli spessori dei sedimenti permeabili, utilizzati come dati per l'interpolazione, sono stati "interpretati" dai log

litostratigrafici dei numerosi pozzi per acqua della zona. Questo elaborato deve essere analizzato con molta attenzione e confrontandolo con altri elaborati del presente studio. Infatti esso potrebbe essere usato per determinare la disposizione di aree dell'acquifero caratterizzate da valori elevati di trasmissività (spessori elevati di sedimenti permeabili) e da valori bassi di trasmissività (piccoli spessori di sedimenti permeabili), e determinando l'estensione di tali aree, effettuare una zonazione dell'acquifero prima di calcolare i valori numerici delle trasmissività che lo caratterizzano.

Alcuni autori utilizzano questo elaborato assieme a relazioni semi-empiriche tra granulometria e conducibilità idraulica, ad esempio l'equazione di Kozeny-Carman, per valutare la trasmissività equivalente dell'acquifero tramite operazioni di upscaling. La grande difficoltà, risiede nel fatto che per sedimenti non consolidati è difficile ricavare valori di conducibilità significativi per i vari livelli attraverso prove in laboratorio su campioni indisturbati e ci si riduce quindi a mediare numeri che possono essere sbagliati anche di due o più ordini di grandezza.

Altri autori, propongono un approccio differente, basandosi sulla osservazione precedente e sulla evidenza osservativa che una formazione geologica o una facies litologica non identificano necessariamente aree dell'acquifero con proprietà idrauliche uniformi. Più in dettaglio, la conducibilità idraulica varia non solo per effetto delle variazioni litologiche, ma anche per altri processi, per cui lo stesso tipo di sedimento, ad esempio una sabbia media, a 10 m di profondità può presentare valori di conducibilità idraulica anche di due ordini di grandezza diversi della stessa sabbia ad ugual granulometria, che si trovi però a 100 m di profondità (Freeze & Cherry, 1979, figura 4.6 a pag. 154, oppure tabella 2.2 a pag. 29). Sembra allora più ragionevole calcolare direttamente alla scala del modello i valori di "conducibilità equivalente" mediante la soluzione di un problema inverso che utilizza grandezze osservative più facilmente misurabili come la piezometria e le portate totali emunte da pozzi per acqua da tutto l'intervallo filtrato e non dai singoli livelli permeabili. In questo modo l'eventuale zonazione dell'acquifero sulla base dei valori di trasmissività calcolati alla scala del modello verrebbe fatta indipendentemente dai risultati rappresentati nella Tavola 14 che potrebbe essere tuttavia utilizzata per un controllo a posteriori dei risultati della calibrazione.

In ogni caso la Tavola 14 ha permesso di suddividere l'acquifero in zone con diversi colori, ciascuna di esse caratterizzata da spessori omogenei di sedimenti permeabili del freatico, che partendo da valori anche minori di 10 m (blu e viola) passa attraverso aree verdi o gialle (spessori di 30-40 m) ad aree rosse che indicano spessori di sedimenti permeabili anche maggiori di 100 m. Questa zonazione dell'acquifero freatico è comunque fatta a monte della stima dei valori di trasmissività fatta mediante la soluzione del problema inverso, e comunque senza tener conto dei valori di trasmissività ricavati dalle prove di portata eseguite nel freatico, quindi per quanto scritto sopra potrebbe anche essere insoddisfacente.

4.6.3.2 Percentuale di sedimenti poco permeabili nei primi 50 m sotto il letto del freatico (spessore dell'aquitardo equivalente).

La frazione di sedimenti impermeabili che si trovano tra la quota di BFE e BFE-50 m è stata calcolata allo scopo di analizzare la reale separazione tra le falde freatica e semiconfinata; infatti dove sotto BFE è presente uno spessore rilevante di sedimenti a bassa permeabilità ci si aspetta che il sistema acquifero sia descrivibile come un bistrato, mentre dove la frazione di sedimenti impermeabili è più bassa significa indicativamente che le due falde non sono separate fisicamente da acquitardi di particolare importanza e quindi il sistema potrebbe comportarsi come un monostrato.

Le posizioni dei punti campionati utilizzati per l'interpolazione sono riportate in Tavola 15, dove i colori viola e blu identificano zone dell'acquifero con una percentuale di sedimenti poco permeabili (argille, limi e sabbie fini) pari rispettivamente al 100% e all'80% di 50 m, le zone verdi presentano invece percentuali di poco superiori al 50%. I colori gialli e rosati sono riferiti a zone con percentuale di sedimenti poco permeabili rispettivamente pari al 40% ed al 10% dello spessore dell'acquitaro "equivalente" cioè compresi tra BFE ed una profondità di 50 m sotto tale superficie. Questa profondità di 50 m sotto il letto del freatico è ragionevole anche sulla base delle sezioni litostratigrafiche di Beretta *et al.* (1992).

Come il precedente, anche questo elaborato deve essere utilizzato con molta cautela senza mai trarne conclusioni unilaterali senza cioè incrociarlo con i precedenti elaborati, pena giungere a conclusioni errate.

In linea di principio questo elaborato può essere utilizzato per i seguenti scopi:

- a) dal punto di vista idrodinamico per l'individuazione di zone dell'acquifero dove gli spessori dell'acquitaro "equivalente" sono rilevanti e continui lateralmente e dove quindi l'acquifero dovrebbe essere modellato con uno schema a due strati;
- b) dal punto di vista del trasporto le zone dove le isopache di sedimenti fini raggiungono valori rilevanti garantiscono una buona protezione della qualità delle acque dell'acquifero semi-confinato poiché vi è scarsa miscelazione tra le acque superficiali più a diretto contatto con gli agenti inquinanti e spesso di qualità scadente, con quelle profonde, più adatte all'utilizzo per approvvigionamento idropotabile;
- c) le zone caratterizzate da spessori poco significativi dell'acquitaro sono zone dove abbondano le finestre idrogeologiche che mettono in contatto idraulico e quindi geochimico diretto le acque del freatico con quelle del semi-confinato.

L'esame dell'elaborato mostra una vasta zona, al centro dell'acquifero che si estende da nord di Casalbuttano sino a Piadena e a S. Giovanni in Croce, caratterizzata da valori elevati, sino a 50 m, delle isopache dell'acquitaro, dove presumibilmente quindi l'acquifero si comporta come un acquifero a due strati con il semi-confinato ben protetto dal leakage di acque dal freatico. A sud di Cremona, lungo un asse che congiunge S. Daniele Po con S. Giovanni in Croce e la confluenza di Oglio in Po gli spessori dell'acquitaro si riducono a 20-30 m e l'acquitaro stesso sembra arealmente piuttosto discontinuo.

4.6.3.3 Spessori dei sedimenti permeabili del semi-confinato

La Tavola 16 rappresenta con una scala di colori gli spessori dei sedimenti permeabili (ghiaie, sabbie medie e grossolane) dell'acquifero semi-confinato, cioè la somma dei sedimenti permeabili compresi tra il letto dell'acquitaro equivalente e la base del sistema acquifero rappresentata nella Tavola 12. I valori degli spessori dei sedimenti permeabili sono stati interpretati dai log litostratigrafici dei pozzi per acqua la cui posizione è stata rappresentata nell'allegato. Considerazioni analoghe a quelle fatte a commento della Tavola 14, nel Paragrafo 4.6.3.1 valgono anche per questo elaborato, che, comunque, esaminato congiuntamente alla Tavola 15 fornisce informazioni importanti per la perforazione di nuovi pozzi per la captazione di acqua ad usi civili e per il grado di protezione della qualità della stessa favorito da alti spessori ed estesa continuità laterale dell'acquitaro.

Nella zona settentrionale dell'acquifero gli spessori si mantengono attorno a valori abbastanza costanti di 20-30 m eccetto che sull'allineamento Sergnano-Soncino, ed a nord di esso, dove gli spessori si riducono ad una decina di metri. Ad ovest di Crema si estende per una decina di chilometri sino all'Adda una struttura con spessori attorno a 40-50 m.

Nella parte centrale tra Pizzighettone, Cremona e S. Daniele Po il semi-confinato presenta spessori notevoli, di cinquanta e più metri sino a raggiungere i cento metri attorno alla città di Cremona alla confluenza tra Adda e Po.

Nella parte meridionale dell'acquifero lungo l'allineamento S. Daniele Po, S. Giovanni in Croce e la confluenza dell'Oglio in Po è presente una struttura con alti valori, anche superiori a 70 m, di isopache rispetto ai valori circostanti di 20-30 m.

4.7 Il modello concettuale del sistema acquifero

Sulla base delle carte tematiche descritte in precedenza e di tutta l'informazione geologica, idrogeologica ed idrologica della zona è stato identificato un modello concettuale dell'acquifero.

Il modello concettuale del sistema acquifero è un modello qualitativo che descrive ed analizza i meccanismi idrodinamici che governano il flusso idrico dell'acquifero, le sue condizioni al contorno, il suo bacino di alimentazione, i suoi rapporti con i corpi idrici superficiali, con l'irrigazione, con le piogge e con eventuali acquiferi semiconfinati.

Si è fatto riferimento ad una situazione con flusso in regime pseudo-stazionario ricavato come media della piezometria di tre anni (2001, 2002, 2003) relativa alla falda freatica. Analogamente si è agito mediando le portate estratte per usi idropotabile, industriale, agricolo, irriguo e quelle dovute alla ricarica per infiltrazione della pioggia e delle irrigazioni che sono state riferite alla piezometria media come termini di sorgente per un confronto di congruenza.

Appare dunque evidente che le considerazioni evinte dal modello concettuale avranno un valore mediato sull'anno idrologico e potranno discostarsi, anche in maniera sensibile, da episodi stagionali o da eventi eccezionali che il modello concettuale, per come è stato identificato, non può prendere in considerazione.

4.7.1 Meccanismi di alimentazione

L'alimentazione dell'acquifero avviene essenzialmente attraverso tre meccanismi idrodinamici:

1. portata di transito che attraversa il sistema acquifero proveniente da nord, cioè dalla media pianura bergamasca. La larghezza del confine settentrionale del modello è di quasi 30 km, mentre il gradiente idraulico ha un modulo di circa 3.5‰; ipotizzando una trasmissività dell'ordine di 0.5 m²/s, coerente con le stime riportate da Maione *et al.* (1991), si ottiene una portata di transito in ingresso superiore a 40 m³/s.
2. Infiltrazione delle piogge. I risultati del modello di simulazione del sistema irriguo (Paragrafo 3.3) forniscono una stima della ricarica pari a 17 m³/s nel semestre invernale; questo dato fornisce una stima dell'ordine di grandezza della ricarica media annua dovuta alle precipitazioni meteoriche.
3. Infiltrazione legata alla pratica irrigua. I risultati del modello di simulazione del sistema irriguo (Paragrafo 3.3) mostrano che questo termine è molto importante. Questo è ragionevole, se si tiene conto che le concessioni di derivazioni dai fiumi Adda, Oglio e Serio ammontano a una portata totale di circa 100 m³/s (Paragrafo 2.5.2) nell'area settentrionale del dominio in esame. La portata media delle rogge fontanilizie è pari a circa 20 m³/s (Paragrafo 2.5.4). Queste portate corrispondono a un notevole volume d'acqua, che viene distribuita sul territorio attraverso una fitta rete di canali e colli e dispersa sul terreno attraverso la pratica irrigua. Quindi una parte di queste portate si infiltra attraverso la zona insatura e ricarica l'acquifero freatico.

4.7.2 Meccanismi di drenaggio da parte del reticolo idrografico superficiale

L'enorme volume d'acqua riversato nell'acquifero attraverso i tre meccanismi sopra descritti viene drenato in gran parte dalla cintura dei fontanili e dai fiumi Serio, Adda, Oglio e Po. Il drenaggio della falda da parte dei fontanili e dei fiumi mette a disposizione dell'agricoltura grandi volumi di acqua. In particolare l'acqua prelevata dalle rogge fontanilizie e attraverso le derivazioni dai fiumi viene distribuita con una fitta rete di canali e coli sul territorio, per essere utilizzata nell'irrigazione. Come descritto nel Paragrafo 4.7.1, una porzione di queste portate ritorna ad alimentare il sistema acquifero.

4.7.2.1 Azione drenante dei fontanili.

I fontanili sono situati nella zona settentrionale dell'area, in corrispondenza di una diminuzione della pendenza topografica. La captazione di questi fontanili è una fonte importante di acqua per l'agricoltura. Infatti essi prelevano dall'acquifero e mettono a disposizione dei consorzi irrigui una portata media annua di 20 m³/s distribuita in quantità circa doppia nel transetto Adda-Serio rispetto a quella del transetto Serio-Oglio. Contrariamente al volume d'acqua drenato dai fiumi, che viene celermente riversato verso valle, l'acqua drenata dai fontanili viene utilizzata in loco per l'irrigazione e in parte restituita all'acquifero freatico.

4.7.2.2 Azione drenante del fiume Serio.

Il Serio scorre nella parte mediana settentrionale dell'acquifero e lo attraversa da nord a sud sino alla confluenza nell'Adda presso Castelleone. Nella parte centro-settentrionale del suo corso le concessioni di derivazione di acque dal fiume per la pratica irrigua sono di circa 5 m³/s.

Tutte le informazioni e gli elaborati esaminati sembrano ragionevolmente indicare che il Serio sia in contatto idraulico diretto con l'acquifero.

L'azione drenante del Serio sull'acquifero è meno evidente nella parte settentrionale del suo corso dove i gradienti idraulici dell'acquifero sono molto elevati e con prevalente direzione nord-sud quindi quasi paralleli al corso del fiume. Da Sergnano, procedendo verso sud, l'azione drenante del Serio sull'acquifero risulta evidente dalla carta piezometrica e dalla direzione e verso dei gradienti.

4.7.2.3 Azione drenante del fiume Adda.

Nella parte settentrionale del corso dell'Adda le concessioni di derivazione per la pratica irrigua sono dell'ordine di 75 m³/s.

L'Adda è un imponente dreno dell'acquifero che si estende da una decina di km a nord di Rivolta d'Adda sino alla sua confluenza nel Po poco a nord di Cremona. Da una semplice ispezione visiva della topografia della zona si evince che il fiume scorre in un basso topografico essendo circondato in riva destra e sinistra da una successione di terrazzi che a nord superano una decina di metri di altezza sopra il livello idrometrico medio del fiume. A sud l'altezza dei terrazzi non supera i 5-7 m.

Poiché l'elaborato riportato in Tavola 6 della soggiacenza rivela che il livello freatico si trova pochi metri sotto il piano di campagna e i gradienti idraulici dell'acquifero mostrano una componente notevole verso il corso del fiume è parso ragionevole considerare l'Adda in contatto idraulico diretto con l'acquifero freatico che lo alimenta. Per queste ragioni, e considerate le portate medie del fiume molto elevate, si è pure deciso di assumere il livello idrometrico medio dell'Adda come condizione al contorno di potenziale assegnato per l'acquifero (condizione al contorno di Dirichlet) sul lato occidentale sino alla confluenza nel Po. L'azione drenante dell'Adda sull'acquifero freatico si esplica in maniera più o

meno intensa lungo il suo corso sino alla confluenza nel Po. Dall'analisi qualitativa dei moduli e della direzione e verso dei gradienti idraulici sembra tuttavia importante a sud di Dovera e presso Pizzighettone dove i bassi moduli dei gradienti sembrano indicare che il corso del fiume attraversa aree dove il sistema acquifero è caratterizzato da valori elevati di trasmissività.

4.7.2.4 Azione drenante del fiume Oglio.

Nella parte settentrionale del corso dell'Oglio le concessioni di derivazione dal fiume per la pratica irrigua sono di quasi 30 m³/s. Come per l'Adda tale portata viene utilizzata per scopi irrigui. Anche l'Oglio scorre in una depressione topografica con l'alveo incassato tra terrazzi alti 10 o più metri a nord e via via meno pronunciati nella parte meridionale del suo corso.

L'ispezione della carta piezometrica di riferimento e i suoi gradienti idraulici con una forte componente verso l'alveo del fiume indicano che esso è in contatto idraulico diretto con l'acquifero che viene drenato lungo quasi tutto il suo corso e comunque sino a sud di Piadena alla confluenza col fiume Chiese.

L'azione drenante dell'Oglio sull'acquifero si esplica dunque lungo quasi tutto il suo corso con elevati valori della componente del gradiente idraulico diretta verso l'alveo del fiume.

I moduli dei gradienti idraulici dell'acquifero lungo il corso dell'Oglio sono due o più volte maggiori dei moduli dei gradienti dell'acquifero lungo il corso dell'Adda e inducono quindi a pensare che il fiume scorra in una zona del sistema acquifero caratterizzata da trasmissività più basse di quelle riscontrate lungo il corso dell'Adda. Unica eccezione si riscontra nell'area a sud di Piadena in corrispondenza della confluenza del fiume Chiese dove i valori molto bassi dei moduli dei gradienti indicano un'area a trasmissività elevata che si estende per un'ampia superficie verso sud-ovest all'interno del dominio di studio.

4.7.2.5 Azione drenante del fiume Po tra Cremona e S. Daniele Po.

Il Po delimita l'acquifero a sud-ovest e lo attraversa da Cremona sino alla confluenza con l'Oglio a est di Casalmaggiore per una lunghezza di circa 75 km. Le concessioni di derivazione per la pratica irrigua sono di quasi 30 m³/s.

I rapporti idrodinamici tra l'acquifero ed il Po sembrano più complicati di quelli tra l'acquifero e l'Adda a nord-ovest e l'Oglio ad est. Infatti un esame congiunto della carta topografica e di quella della piezometria di riferimento sembra indicare che il Po drena l'acquifero nella parte del suo corso tra Cremona e S. Daniele Po mentre da questo punto sino a sud-est di Casalmaggiore il suo alveo risulta pensile e quindi i rapporti tra falda e fiume sono più incerti.

La carta piezometrica di riferimento indica che la rimanente acqua che circola nell'acquifero viene scaricata nella parte sud orientale del corso del Po sino alla sua confluenza col fiume Oglio.

4.7.3 Circolazione nel sistema acquifero

Per comprendere la dinamica del flusso nell'acquifero è importante osservare alcuni aspetti relativi ai termini di sorgente medi annui:

- le stime dei prelievi idrici per uso agricolo e industriale sull'intera area modellata sono pari a circa 11 m³/s, mentre quelle per usi acquedottistici (che interessano acque più profonde) ammontano a circa 3 m³/s;
- le stime dei prelievi da fontanile sono al massimo di 20 m³/s;

- il termine di ricarica per infiltrazione delle precipitazioni e dell'acqua usata nell'irrigazione, più intenso nella zona centro settentrionale del dominio rispetto alla parte meridionale compresa fra i fiumi Po e Oglio, è di circa 30 m³/s;
- la stima della ricarica dovuta le perdite della rete di canali del sistema irriguo è di circa 30 m³/s.

Questi dati confermano l'ipotesi che il sistema acquifero cremonese sia interessato da un sistema di circolazione duplice formato da una parte superficiale caratterizzata da sedimenti molto permeabili che permettono il passaggio di grandi quantità d'acqua e una parte più profonda, nella quale vengono effettuati i prelievi di minore intensità e dove il flusso idrico sembra inferiore a quello della porzione più superficiale.

Dall'esame della piezometria di riferimento dell'acquifero freatico e della piezometria ricavata con misure su pozzi profondi oltre un centinaio di metri emerge una componente verticale del gradiente idraulico con verso in direzione dei pozzi profondi che attingono acqua per uso potabile dall'acquifero semi-confinato. È dunque assai verosimile che l'abbassamento di pressione nell'acquifero semi-confinato causato dai prelievi idrici richiami portate di acqua anche dalla falda freatica e che quindi, almeno in queste aree dell'acquifero, il semi-confinato debba essere considerato alla stregua di un dreno dell'acquifero freatico.

5 Il modello preliminare dell'acquifero

5.1 Caratteristiche generali dei modelli realizzati

A partire dai dati elaborati e descritti nel Capitolo 4 è stato simulato il flusso idrico in condizioni stazionarie, modellando cioè la situazione di flusso media nel corso di tre anni (dal 2001 al 2003).

Facendo riferimento al modello concettuale dell'acquifero, alle carte tematiche descritte nel Capitolo 4 e a tutta l'informazione disponibile sul sistema acquifero si è proceduto alla messa a punto di due modelli:

1. un modello matematico monostrato equivalente (**M²ME-CR** – **Modello Matematico Monostrato Equivalente della Provincia di Cremona**);
2. un modello matematico bistrato (**M²S-CR** – **Modello Matematico bistrato della Provincia di Cremona**);

M²ME-CR è uno dei primi passi per la costruzione di un modello matematico per la gestione dell'acquifero. Esso utilizza uno schema idrogeologico semplificato e si riferisce a piezometrie e a termini di sorgente in condizioni di flusso pseudo-stazionario, le stesse utilizzate per descrivere le principali caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero con il modello concettuale. Un requisito importante richiesto a M²ME-CR è di essere equivalente al modello matematico preliminare che simula il flusso nel sistema acquifero, nel senso che le portate globali di transito in gioco devono corrispondere, con buona approssimazione, a quelle del modello ottenuto al termine del progetto. Queste portate di transito globali devono quindi essere attentamente valutate sulla base di tutta l'informazione idrogeologica, idrologica e geofisica disponibile e vanno confrontate con quelle di eventuali modelli matematici preesistenti; nel caso dell'acquifero cremonese i modelli precedenti da considerare sono quelli realizzati per la DG Risorse idriche e Servizi di pubblica utilità (2001) della Regione Lombardia, utilizzato per il PTUA, e, per la parte più settentrionale del dominio di studio, con il modello di Maione *et al.* (1991).

Per M²ME-CR è stata svolta una approfondita calibrazione, che ha permesso di determinare un campo di trasmissività che riproduce la piezometria dell'acquifero freatico a meno di un errore medio inferiore a 0.5 m, in modo consistente con i dati e le informazioni sul sistema acquifero.

Per M²S-CR i valori dei parametri fisici che intervengono nel modello sono stati ricostruiti in parte dai risultati della calibrazione di M²ME-CR e in parte dall'analisi di altri dati (stratigrafie, ecc.). Per questo secondo modello sono state realizzate simulazioni in condizioni sia stazionarie che transitorie.

5.1.1.1 Equazioni e scala del modello

La simulazione del flusso idrico viene realizzata risolvendo le equazioni di bilancio descritte in Appendice 9.5 con schemi conservativi alle differenze finite. Queste equazioni sono state discretizzate su una griglia regolare composta da circa 8500 maglie quadrate di lato 500 m.

I modelli sono stati implementati scrivendo codici di calcolo originali in linguaggio Fortran 90 e per M²ME-CR anche attraverso il modello Modflow utilizzato con l'interfaccia GMS (Groundwater Modeling System) descritta in Appendice 9.6. I risultati di M²ME-CR ottenuti con il codice originale e con Modflow sono congruenti, a conferma della validità dei risultati numerici dei due codici.

5.2 Il modello monostrato equivalente – M²ME-CR

5.2.1 Caratteristiche del modello M²ME-CR

5.2.1.1 Schema idrogeologico di M²ME-CR

Lo schema idrogeologico utilizzato per M²ME-CR è molto semplice; si tratta cioè di un monostrato freatico con flusso 2D stazionario. L'equazione di bilancio è dunque quella di Boussinesq. Tuttavia, considerato che le fluttuazioni della piezometria tra la stagione irrigua e quella asciutta sono di pochi metri, mentre lo spessore dell'acquifero è di oltre un centinaio di metri, è possibile ipotizzare che la trasmissività dell'acquifero sia indipendente dallo spessore saturo dell'acquifero, una approssimazione che ha l'enorme vantaggio di permettere di risolvere sistemi di equazioni lineari.

Il limite superiore dell'acquifero è dunque la topografia rappresentata in Tavola 1, mentre come limite inferiore o fondo dell'acquifero si è deciso di prendere un orizzonte ricavato dall'interpolazione (Tavola 12) dei valori di profondità raggiunti dai numerosi pozzi di presa della zona. Comunque lo spessore dell'acquifero risulta ovunque superiore al centinaio di metri.

5.2.1.2 Condizioni al contorno

Come discusso in precedenza (Paragrafi 4.3.1 e 4.7.2), è ragionevole assumere che i fiumi Adda, Oglio e Po siano in contatto idraulico diretto con l'acquifero freatico. Inoltre le sezioni di Beretta *et al.* (1992) mostrano che gli scambi tra fiume e acquifero avvengono attraverso sedimenti piuttosto grossolani che facilitano il raggiungimento dell'equilibrio dei livelli idrici nei fiumi e nella falda. Le notevoli portate di questi fiumi permettono di assumere i livelli idrometrici medi dei fiumi come condizioni al contorno di potenziale assegnato per l'acquifero, in quanto tali livelli non saranno molto influenzati dagli scambi tra fiume e falda.

In questo modo l'acquifero è delimitato da condizioni al contorno di Dirichlet fisicamente consistenti almeno lungo i suoi lati occidentale, orientale e meridionale.

Lungo il lato settentrionale, descritto nel Paragrafo 4.1, si è assegnata una condizione al contorno di Dirichlet interpolata ubicandola qualche chilometro a nord del confine della provincia di Cremona, in modo da rendere i risultati del modello nella zona di maggiore interesse poco sensibili rispetto alle incertezze introdotte da questa condizione al contorno interpolata. Alcune prove hanno richiesto l'assegnazione di condizioni al contorno di flusso imposto su questo bordo.

5.2.1.3 Piezometria di riferimento

Oltre a questi dati è necessario disporre di una carta piezometrica di riferimento (Tavola 4). Infatti obiettivo di un modello di simulazione del flusso in un sistema acquifero è quello di prevedere l'andamento del carico idraulico della falda in risposta a certe "forzanti" (prelievi, ricarica, condizioni al contorno). Per calibrare e validare il modello (si veda la breve discussione all'inizio del Capitolo 4) occorre confrontare le previsioni del modello, h^{mod} , con le osservazioni eseguite in pozzi o piezometri, h^{oss} , o con una piezometria di riferimento, h^{rif} , ricostruita sulla base di tutte le informazioni disponibili (ad es., i termini di estrazione e ricarica, le relazioni tra acque superficiali e sotterranee). In generale, lo scarto tra h^{mod} e h^{oss} o h^{rif} è controllato da diversi processi e problemi, che vengono di seguito richiamati.

- a. Errori di misura casuali e scorrelati, che possono essere dell'ordine di qualche centimetro se le misure sono raccolte con misuratori di livello manuali.
- b. Errori sistematici dovuti alla conoscenza approssimata della quota topografica di riferimento del pozzo, a partire dalla quale viene misurata la soggiacenza e da cui, per differenza, si ottiene il carico idraulico. In questo caso l'errore può essere di pochi centimetri o anche inferiore, se la quota del pozzo è stata ottenuta con un rilievo topografico eseguito appositamente, ma può arrivare a qualche metro, se questo dato viene stimato dalle carte topografiche.
- c. Errori correlati dovuti alla differenza tra le posizioni dei punti di misura e dei nodi del reticolo. Considerando un gradiente medio del 2 ‰, per una cella di lato 0.5 km, si possono avere errori massimi superiori a 0.5 m.
- d. Errori dovuti al fatto che le osservazioni nei diversi punti di misura non sono simultanee; solitamente una campagna di misura su tutti i punti di una rete di osservazione richiede alcuni giorni e questo può fare sì che si verifichino differenze anche significative di carico idraulico, dovute alla non contemporaneità delle osservazioni.
- e. Errori dovuti alla mancata conoscenza del funzionamento (portate estratte, posizioni dei filtri, periodi di pompaggio) di pozzi vicini al punto di osservazione.
- f. Errori dovuti al fatto che le misure eseguite nei pozzi in esercizio vengono raccolte in una condizione cosiddetta "semi-dinamica", ovvero aspettando che trascorra un certo lasso di tempo dopo lo spegnimento della pompa nel pozzo. In tal modo il valore osservato dovrebbe essere rappresentativo del livello nell'acquifero, quando tutti gli altri pozzi circostanti al punto di osservazione sono in funzione.
- g. Errori di modello, dovuti al fatto che il modello non considera alcuni processi rilevanti o legati al tipo di condizioni al contorno assegnate. Anche in questo caso si tratta di errori correlati, che possono riguardare, ad esempio, il confronto tra osservazioni eseguite in condizioni transitorie con previsioni per una situazione di flusso stazionario.
- h. Errori concettualmente simili a quelli descritti nel punto precedente e legati al confronto tra (1) le misure di altezza idraulica, di cui è difficile stabilire se si tratti di dati "puntuali" o "mediati" su un certo spessore a causa della conoscenza imperfetta sulla posizione degli intervalli filtrati o campionati⁴, e (2) i risultati di modelli che introducono approssimazioni sulla dimensionalità del flusso (2D, quasi-3D o 3D).
- i. Errori dovuti alla scala del modello, ad esempio al fatto che il modello fornisce un valore "medio" sulla cella discreta, mentre la misura è un valore "puntuale". Inoltre un modello fornisce previsioni diverse a seconda della scala utilizzata. Anche questo è un errore correlato e in certi casi sistematico.

Poiché con M²ME-CR l'acquifero è modellato come un monostrato equivalente e le portate in gioco sono particolarmente significative per la parte superficiale del sistema acquifero (Paragrafo 4.7.3), la piezometria dell'acquifero freatico è stata considerata come riferimento per la calibrazione.

⁴ La presenza di intervalli filtrati a diverse profondità, ma anche di un dreno attorno al pozzo o piezometro, può mettere in contatto falde altrimenti separate da strati a bassa conducibilità idraulica e quindi alterare il campo di moto e la distribuzione delle piezometrie.

5.2.1.4 Termini di sorgente

Il termine noto delle equazioni di bilancio descritte in Appendice 9.5 è la somma algebrica delle sorgenti in entrata e uscita. In particolare sono stati considerati i termini di sorgente elencati di seguito:

- $F^{(abs)}$ è il termine di sorgente dovuto alle estrazioni di acqua dai pozzi;
- $F^{(recharge)}$ è il termine di sorgente di ricarica per infiltrazione dell'acqua piovana e di irrigazione;
- $F^{(river)}$ è il termine di sorgente che descrive gli scambi con il fiume Serio e viene modellato come:

$$F^{(river)} = \begin{cases} -C^{(river)}(h - h^{(river)}) & h > b^{(river)} \\ C^{(river)}(h^{(river)} - b^{(river)}) & h < b^{(river)} \end{cases}$$

dove h e $h^{(river)}$ sono, rispettivamente, l'altezza piezometrica e il livello idrometrico del fiume, $b^{(river)}$ è la quota s.l.m.m. del letto del fiume;

- $F^{(springs)}$ è il termine di sorgente che descrive il drenaggio dai fontanili e che può essere stimato dai dati, $F^{(springs)_{obs}}$, o modellato come:

$$F^{(springs)} = \max(0, C^{(springs)}(h - b^{(springs)}));$$

- $F^{(terraces)}$ è il termine di sorgente che descrive il drenaggio dai terrazzi geomorfologici, modellato come:

$$F^{(terraces)} = \max(0, C^{(terraces)}(h - b^{(terraces)}));$$

- $F^{(channels)}$ è il termine di sorgente che descrive le perdite dei canali. La somma di questi termini su tutto l'acquifero è stimato dal modello del sistema irriguo e viene in parte distribuito su tutto il dominio, in cui è presente una fitta rete di canali, e in parte assegnato come termine di ricarica lineare in corrispondenza dei canali Naviglio Civico, Cavo Canobbia Vecchia e Cavo Ciria Vecchia⁵.

Per quanto riguarda i dati di prelievo da pozzo, la maggior parte delle informazioni è costituita da valori medi annuali di concessione per comune; non conoscendo l'ubicazione esatta dei punti di prelievo si è deciso di distribuire uniformemente la portata prelevata sulla superficie di ogni comune cui appartengono i pozzi in oggetto.

I valori dei parametri $C^{(river)}$, $C^{(springs)}$ e $C^{(terraces)}$ sono stati determinati con la procedura descritta nel Paragrafo 5.2.2.

I valori di $h^{(river)}$ e $b^{(river)}$ sono stati ottenuti sulla base dell'analisi delle sezioni del fiume Serio: in particolare $b^{(river)}$ è il punto con la quota minima lungo i profili delle sezioni del Serio, mentre $h^{(river)}$ è il punto medio tra $b^{(river)}$ e la quota massima delle sezioni fluviali.

Il valore di $b^{(springs)}$ è dato dalla quota topografica del fontanile alla quale è stata sottratta la profondità dello scavo, sulla base dei dati riportati in D'Auria & Zavagno (2005).

Infine per determinare il termine di sorgente $F^{(terraces)}$ sono state identificate le celle attraversate dalle tracce dei terrazzi principali riportati nella carta tematica "Elementi geomorfologici" elaborata dal Servizio Ambiente naturale, cave del Settore Ambiente della Provincia di Cremona e disponibile attraverso il sito internet www.atlanteambientale.it. In ognuna di queste celle, il valore di $b^{(terraces)}$ è stato calcolato come il minimo dei punti quotati della CTR all'interno della cella stessa, alla quale è stato sottratto un valore costante⁶.

⁵ Le perdite di questi canali sono necessarie per riprodurre lo spartiacque sotterraneo che viene messo in evidenza dalle carte piezometriche e che si estende da nord-ovest a sud-est nella porzione centrale della Provincia.

⁶ Il valore assegnato a questo parametro è 2 m.

5.2.2 Calibrazione del modello

5.2.2.1 Il Metodo del Modello del Confronto per la calibrazione di M²ME-CR

La calibrazione di un modello è anche nota dalla letteratura scientifica specializzata come identificazione parametrica (Giudici, 2001). Questo processo è indispensabile per la messa a punto di un modello di simulazione in quanto i risultati del modello sono strettamente legati ai valori attribuiti ai parametri del modello stesso; previsioni calcolate utilizzando parametri che non siano stati ben calibrati possono essere anche molto inaffidabili (Bear, 1979, p. 490). Le maggiori difficoltà dipendono dalla necessità di identificare parametri del modello rappresentativi alla scala del modello stesso (500 m nel caso di M²ME-CR) e dalla eterogeneità degli acquiferi. Per ognuna delle circa 10000 maglie quadrate, con lato di 500 m, che costituiscono il modello è indispensabile dunque calcolare il valore della trasmissività equivalente. Per questo scopo la letteratura scientifica suggerisce l'utilizzo di metodi inversi e rimandiamo il lettore interessato ad articoli di rassegna sulla soluzione di problemi inversi (Carrera, 1988; Carrera *et al.*, 2005; Ginn & Cushman, 1990; Giudici, 2001; Yeh, 1986).

Per calibrare M²ME-CR si è utilizzato il metodo del modello del confronto (nel seguito indicato con la sigla CMM, acronimo di Comparison Model Method), le cui caratteristiche sono descritte nell'Appendice 9.7, alla quale si rimanda anche per la notazione.

Questo metodo fu originariamente proposto da Scarascia & Ponzini (1972) e successivamente modificato e ulteriormente elaborato da Ponzini & Lozej (1982), Ponzini & Crosta (1988), Ponzini *et al.* (1989). Alcune innovazioni e osservazioni sono presentate anche da Pasquier & Marcotte (2006) e Ponzini *et al.* (2007).

Applicazioni di questo metodo ad acquiferi reali sono state fatte da lungo tempo: all'acquifero della pianura irrigua Novarese–Lomellina per conto dell'Associazione Irrigazione Est Sesia (Associazione Irrigazione Est Sesia, 1979), dal Servizio Geologico Svizzero sull'acquifero nella piana del Vedeggio presso Bellinzona (Beatrizotti *et al.*, 1983), all'acquifero di Châteauguay e ad altri acquiferi canadesi da ricercatori del Politecnico di Montreal (Pasquier & Marcotte, 2004; Pasquier, 2005; Benoit *et al.*, 2005).

I metodi per la soluzione del problema inverso descritti nella letteratura specializzata sono generalmente utilizzati per risolvere quello che Sagar *et al.* (1975) definiscono il problema inverso di primo tipo: dati un campo di potenziale e i termini di sorgente trovare un campo di trasmissività che sia consistente con questi dati osservativi.

La ricostruzione del campo di potenziale di riferimento generalmente si basa sulla interpolazione delle misure di altezza piezometrica ottenute in punti sparsi dell'acquifero in studio, possibilmente tenendo conto delle conoscenze sul sistema fisico, come ad esempio le condizioni al contorno e le relazioni con le acque superficiali.

I termini di sorgente (estrazioni di acqua di falda per uso potabile, agricolo, industriale; ricarica per infiltrazione di acqua piovana o irrigua; ricarica per perdite delle reti acquedottistiche, fognarie e dei canali irrigui; scambi con il reticolo idrografico superficiale; drenaggio dei fontanili e dei terrazzi geomorfologici) non sono facilmente misurabili, o meglio non tutti questi termini sono quantificabili con precisione. In linea di principio le estrazioni dai pozzi possono essere misurate con semplici contatori volumetrici; molto spesso questo dato non è disponibile e si conoscono solo stime, ad esempio, come per le portate per utilizzo industriale del sistema acquifero in esame, basate sulle portate dichiarate nelle richieste di concessione. I termini di ricarica per infiltrazione delle acque piovane o irrigue possono essere stimati con modelli del sistema irriguo e dell'infiltrazione attraverso il suolo e la zona insatura del terreno. Altri termini sono difficili e spesso impossibili da misurare o anche da stimare.

A titolo di esempio, può essere utile menzionare che è spesso impossibile quantificare la portata scambiata tra un acquifero e i fiumi in contatto diretto con esso mediante le

tecniche ed i metodi finora sviluppati dall'idrologia di superficie. Ad esempio la portata media del Fiume Po si aggira attorno ai 1000 m³/s, che può essere determinata in diverse stazioni di misura lungo il suo corso con un errore di misura di circa il 10%, cioè dell'ordine di 100 m³/s. In linea di principio si potrebbe usare il bilancio idrologico per questo tratto del fiume, che si riduce nella forma più semplice e banale alla equazione:

$$\textit{portata a valle} = \textit{portata a monte} + \textit{drenaggio dalla falda} + \textit{afflussi da fiumi e canali affluenti}$$

per stimare le portate di scambio tra il fiume e l'acquifero⁷. Però, se la differenza di portata tra due stazioni di misura è dell'ordine di grandezza dell'errore sulla stima della misura di portata fluviale, che nel caso del fiume Po è davvero elevato (come detto di circa 100 m³/s), l'applicazione del bilancio idrologico non può fornire una stima affidabile del termine di scambio con l'acquifero. Inoltre, poiché la portata di transito attraverso una sezione del sistema acquifero è stimata dell'ordine di alcune decine di m³/s, è impossibile che il fiume possa drenare dalla falda una portata vicina o addirittura maggiore di questa, che è circa un terzo dell'errore di misura sulle stime delle portate ad una singola stazione di misura lungo il fiume Po.

In base alle considerazioni precedenti, la calibrazione di un modello richiede un metodo di inversione che:

- A) sia robusto cioè che possa essere applicato anche con dati affetti da vari tipi di errore;
- B) identifichi correttamente le trasmissività almeno nelle zone dell'acquifero caratterizzate da dati piezometrici e di sorgente tra loro congruenti (Baratelli, 2006), senza che i risultati ottenuti nelle zone dell'acquifero con dati inconsistenti o nelle aree con valori piccoli del gradiente idraulico dove il problema inverso è più instabile deteriorino i risultati su tutto il dominio;
- C) calcoli molte migliaia di valori incogniti di trasmissività senza tempi di calcolo eccessivamente lunghi;
- D) sia agile e applicabile facilmente per "hypotheses testing", cioè che al variare degli assetti piezometrici e delle relative sorgenti riproduca tanti campi di trasmissività, tra i quali l'idrogeologo esperto potrà scegliere quelli più probabili;
- E) faciliti l'individuazione di aree dell'acquifero caratterizzate da dati inconsistenti.

Il CMM possiede tutte le caratteristiche sopra menzionate e per questo è stato scelto per calibrare M²ME-CR.

L'idea di base del CMM è che il campo di trasmissività iniziale, $T^{(0)}$, produca, risolvendo un problema in avanti ben posto, un campo di piezometria ausiliaria, $h^{(CM)}$, tale che l'integrale della velocità di Darcy lungo lo spessore dell'acquifero calcolato dalla soluzione del modello di confronto (CM), $T^{(0)}|\nabla h^{(CM)}|$, sia una buona approssimazione di quello "reale", $T^{(est)}|\nabla h^{(ref)}|$, in cui interviene la trasmissività incognita da stimare. Uguagliando queste due espressioni, il calcolo della trasmissività stimata è basato sulla formula:

$$(5.2.1) \quad T^{(est)} = T^{(0)} \left(\frac{|\nabla h^{(CM)}|}{|\nabla h^{(ref)}|} \right).$$

⁷ Per alcune considerazioni sul bilancio idrico di un bacino e gli effetti delle incertezze sulle stime dei diversi termini, si veda anche Giudici *et al.* (2003).

Affinché sia valida l'approssimazione che il flusso ottenuto con il CM e quello reale siano simili, occorre che il campo di trasmissività iniziale sia abbastanza vicino a quello reale incognito, così come i potenziali e i termini di sorgente ricavati dai dati osservativi e usati come riferimento devono essere una buona approssimazione di quelli reali. Questo implica la necessità di determinare una configurazione iniziale, cioè una “tripletta” $h^{(ref)}$, $T^{(0)}$ e $F^{(ref)}$, che sia fisicamente consistente e con la quale inizializzare il CMM.

Poiché questo problema inverso non ha una soluzione unica non ci si dovrà aspettare che il CMM dia “la soluzione” cioè la trasmissività vera dell'acquifero, ma piuttosto una serie di campi di trasmissività ciascuno dei quali ha il pregio, una volta utilizzato per M²ME-CR, di onorare i dati piezometrici, le sorgenti e le condizioni al contorno ricavate dalle osservazioni. È compito dell'idrogeologo scegliere assieme all'utilizzatore tra tutte queste soluzioni quella più verosimile per parametrizzare il modello. Sottolineiamo inoltre che produrre infinite soluzioni in trasmissività non significa che ogni soluzione può essere accettata come valida per parametrizzare il modello, soltanto le soluzioni “fisicamente consistenti” debbono essere accettate.

Nel Paragrafo 5.2.2.2 analizzeremo diverse possibili configurazioni iniziali, che daranno luogo a diversi campi di trasmissività e a diversi valori dei coefficienti $C^{(river)}$, $C^{(springs)}$ e $C^{(terraces)}$. L'analisi svolta in quel Paragrafo avrà un duplice obiettivo:

- individuare criteri che consentano di mettere in evidenza le configurazioni iniziali fisicamente consistenti;
- determinare tra i diversi campi di trasmissività coerenti con i dati a disposizione quello che si ritiene allo stato attuale della conoscenza più affidabile.

5.2.2.2 Identificazione di configurazioni iniziali per la calibrazione

Al fine di determinare una configurazione iniziale, cioè una “tripletta” $h^{(ref)}$, $T^{(0)}$ e $F^{(ref)}$, che sia fisicamente consistente e con la quale inizializzare il CMM sono state eseguite prove numeriche variando i valori dei coefficienti $C^{(river)}$, $C^{(springs)}$ e $C^{(terraces)}$ e i valori della ricarica come rappresentato nella Tabella 26.

Tabella 26. Elenco dei codici che permettono di caratterizzare le diverse prove.

<i>Parametro</i>	<i>Codice</i>	<i>Descrizione</i>
Ricarica	R100	Stime ottenute con il modello del sistema irriguo
	R80	80% del valore usato per R100
	R50	50% del valore usato per R100
Drenaggio dai fontanili	SM025	Modellati con $C^{(springs)} = 0.025 \text{ m}^2/\text{s}$
	SM050	Modellati con $C^{(springs)} = 0.05 \text{ m}^2/\text{s}$
	SM100	Modellati con $C^{(springs)} = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$
Drenaggio dai terrazzi geomorfologici	TD006	Modellati con $C^{(terraces)} = 0.00625 \text{ m}^2/\text{s}$
	TD025	Modellati con $C^{(terraces)} = 0.025 \text{ m}^2/\text{s}$
	TD050	Modellati con $C^{(terraces)} = 0.05 \text{ m}^2/\text{s}$
Scambi con il Fiume Serio	SR025	Modellati con $C^{(river)} = 0.025 \text{ m}^2/\text{s}$
	SR050	Modellati con $C^{(river)} = 0.05 \text{ m}^2/\text{s}$
	SR100	Modellati con $C^{(river)} = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$
Perdite dei canali	Ch100	Stime ottenute con il modello del sistema irriguo
	Ch80	80% del valore usato per Ch100
	Ch50	50% del valore usato per Ch100

Come già accennato i risultati della calibrazione dipenderanno oltre che dai dati anche dal campo $T^{(0)}$ utilizzato per inizializzare il processo iterativo del CMM. La procedura

utilizzata per la determinazione del campo di trasmissività iniziale è descritta nell'Appendice 9.7.

Il campo di piezometria $h^{(CM)}$ dipende dalla distribuzione puntuale dei termini di sorgente ed è confrontata con $h^{(int)}$. Quindi l'applicazione del CMM si basa sulla soluzione del CM che fornisce un potenziale regolare $h^{(CM)}$ che deve essere confrontato con il campo di riferimento filtrato $h^{(ref)}$.

Le prove numeriche eseguite mostrano che non c'è una differenza notevole tra i residui medi e massimi delle piezometrie, calcolati come $|h^{(CM)} - h^{(int)}|$ o come $|h^{(CM)} - h^{(ref)}|$.

Analizzando i risultati delle prove realizzate con le possibili combinazioni dei parametri elencati in Tabella 26 è possibile fare alcune considerazioni.

- La portata entrante dal bordo settentrionale del modello varia tra 5 e 25 m³/s.
- La somma delle portate drenate dal fiume Serio è inferiore a 10 m³/s.
- La somma delle portate drenate dai fontanili varia tra 2 e 15 m³/s, ma il contributo dei fontanili compresi fra Adda e Serio è sempre inferiore a quello dei fontanili compresi tra Serio e Oglio. Non si riesce a riprodurre l'osservazione che le portate delle rogge fontanilizie per il settore Adda-Serio siano circa il doppio di quelle per il settore Serio-Oglio.
- La somma delle portate drenate dai terrazzi geomorfologici è inferiore a 8 m³/s.
- I residui medi sono simili e minori di 1 m per circa il 95% delle prove.

Non essendo i residui un criterio sufficiente per scegliere un insieme limitato di prove promettenti sulle quali approfondire l'analisi, sono stati fissati ulteriori criteri:

1. la somma delle portate drenate dal fiume Serio sia inferiore a 7 m³/s;
2. la somma delle portate drenate dai fontanili sia superiore a 10 m³/s;
3. la somma delle portate dai fontanili, dai terrazzi e dal fiume Serio sia superiore a 20 m³/s;
4. il numero di fontanili attivi sia almeno pari al 50% dei fontanili presenti nei due settori Adda-Serio e Serio-Oglio.

Il criterio 1 è basato sulla osservazione che la portata media del fiume Serio a Ponte Cene è pari a circa 20 m³/s (Beretta *et al.*, 1992), mentre le portate in concessione per le derivazioni presenti nell'area del modello danno un totale poco superiore a 5 m³/s. Pertanto è sembrato che un drenaggio superiore a quello massimo imposto fosse poco plausibile sulla base di questi dati e di queste informazioni.

Il criterio 2 è invece basato sulle misure delle portate delle rogge fontanilizie nella zona settentrionale del dominio, che danno un valore medio annuo di circa 20 m³/s.

La presenza di colli al piede dei terrazzi geomorfologici è stata verificata nel corso della escursione effettuata il 28 luglio 2006, che viene descritta nell'appendice 9.1.1; purtroppo non sono disponibili stime recenti delle portate drenate da questi colli direttamente dalla falda. L'unica indicazione reperita nella letteratura è quella di Cavagna di Galdana (1952), secondo il quale “*sono ammesse risorgenze utilizzabili di mc. 15 per l'Oglio (Il Consorzio dell'Oglio nel primo decennio della sua costituzione – Milano 1938) e di mc. 16 per l'Adda (Prof. G. De Marchi – Valutazione delle portate che la regolazione del Lago di Como renderà disponibili per la irrigazione – Brescia 1933), valutazione quest'ultima che... riteniamo anche noi, confortati dall'autorità del prof. De Marchi, certamente in difetto*”. Non potendo fissare un criterio sul drenaggio dei terrazzi, si è comunque scelto di introdurre un criterio sul drenaggio totale.

Il criterio 4 è basato sull'ipotesi che la maggior parte dei fontanili censiti sia effettivamente attivo; in altre parole, questo criterio tende a scartare le configurazioni per cui sono attivi un numero relativamente basso di fontanili, ciascuno dei quali estrae una portata cospicua,

privilegiando le configurazioni per cui sono attivi un maggior numero di fontanili, anche se con una portata unitaria per fontanile inferiore.

Con i criteri 1 e 2 si isolano 42 prove accettabili, tutte con ricarica totale superiore a 50 m³/s. Se chiediamo che sia soddisfatto anche il criterio 4, le prove positive si riducono a 34. Infine introducendo anche il criterio 3, isoliamo 10 prove, elencate nella Tabella 27.

Tabella 27. Prove selezionate.

<i>Codice</i>	<i>Ricarica</i>	<i>Fontanili</i>	<i>Terrazzi</i>	<i>Serio</i>	<i>Canali</i>
6005	R100	SM025	TD025	SR050	Ch100
6083	R100	SM050	TD006	SR050	Ch100
6085	R100	SM050	TD025	SR025	Ch100
6086	R100	SM050	TD025	SR050	Ch100
6088	R100	SM050	TD050	SR025	Ch100
6089	R100	SM050	TD050	SR050	Ch100
6094	R100	SM050	TD025	SR025	Ch80
6095	R100	SM050	TD025	SR050	Ch80
6097	R100	SM050	TD050	SR025	Ch80
6098	R100	SM050	TD050	SR050	Ch80
6142	R80	SM050	TD050	SR025	Ch100

Limitando la nostra attenzione alle prove con la ricarica massima (Ch100), permane un certo grado di approssimazione sui parametri $C^{(river)}$, $C^{(springs)}$ e $C^{(terraces)}$. Come ulteriore criterio per la scelta di $C^{(river)}$ si è operata una verifica di congruenza tra i dati piezometrici e i termini di sorgente con la seguente procedura. Il CMM è stato applicato su dati non influenzati significativamente dalle interazioni tra il fiume Serio e la falda. In particolare, il CMM è stato applicato con i termini di sorgente corrispondenti alle configurazioni 6005, 6083, 6085, 6086, 6088 e 6089, senza termini di scambio lungo il corso del Fiume Serio e con un campo di potenziale ottenuto dalla interpolazione delle piezometrie, senza l'inserimento dei livelli stimati lungo il corso del Fiume Serio. In questa fase si è ottenuto un campo di trasmissività che denoteremo con $T^{(V)}$. Il campo di trasmissività $T^{(V)}$ può essere considerato affidabile laddove non si verificano errori nella determinazione dei termini di sorgente e nella interpolazione dei potenziali. Pertanto è stato calcolato l'errore di bilancio, maglia per maglia, con $T^{(V)}$, $h^{(ref)}$ e i termini di sorgente elencati sopra, per una fascia di 5 km centrata lungo il corso del Fiume Serio. I risultati sono riportati in Tabella 28.

Tabella 28. Errore di bilancio per diverse prove nella zona lungo il Fiume Serio

<i>Codice prova</i>	$C^{(river)}$ (m ² /s)	<i>Scambio con il fiume Serio</i> (m ³ /s)	<i>Errore di bilancio</i> (m ³ /s)
6005	0.050	5.3	2.7
6083	0.050	5.2	4.2
6085	0.025	3.3	3.4
6086	0.050	4.8	3.4
6088	0.025	2.9	2.9
6089	0.050	4.4	2.9

Il coefficiente che permette di avvicinarsi di più alla portata stimata è 0.025 m²/s e quindi vengono selezionate le seguenti prove:

6085 (R100, SM050, TD025, SR025, Ch100),

6088 (R100, SM050, TD050, SR025, Ch100).

Manca ancora un criterio per fissare $C^{(terraces)}$: notiamo che con il coefficiente più alto si attivano 158 celle attraversate da un terrazzo e la portata totale estratta è $6.35 \text{ m}^3/\text{s}$, con il coefficiente più basso si attivano 174 celle e la portata è $4.12 \text{ m}^3/\text{s}$. Abbiamo utilizzato il valore inferiore, perché riteniamo più credibile avere un elevato numero di sorgenti ai piedi dei terrazzi attive con una portata piccola, che un basso numero di sorgenti che estraggano una portata elevata. Questa ipotesi è ragionevole in base alle osservazioni dirette su campo e potrà essere ulteriormente confermata da eventuali ulteriori indagini.

I risultati di queste prove mostrano la presenza di alcune zone critiche:

- (a) la striscia intorno allo spartiacque sotterraneo che si estende da nord-ovest a sud-est nella porzione centrale della Provincia;
- (b) la zona meridionale, dove i gradienti piezometrici sono molto bassi e dove quindi il problema inverso è intrinsecamente instabile.

5.2.2.3 Risultati della calibrazione

Le prove descritte nel Paragrafo precedente hanno fornito indicazioni utili per la calibrazione di M²ME-CR.

Applichiamo il CMM alla soluzione ottenuta con la configurazione 6085 (R100, SM050, TD025, SR025, Ch100): con quattro iterazioni del CMM la media dei residui sui potenziali diventa inferiore a 0.45 m (Figura 97). La Figura 97 mostra l'andamento sia della media che del massimo degli errori sul potenziale in funzione del numero di iterazioni del CMM: Si vede come l'andamento sia regolare e progressivamente decrescente, per entrambi i tipi di errore, fino a stabilizzarsi.

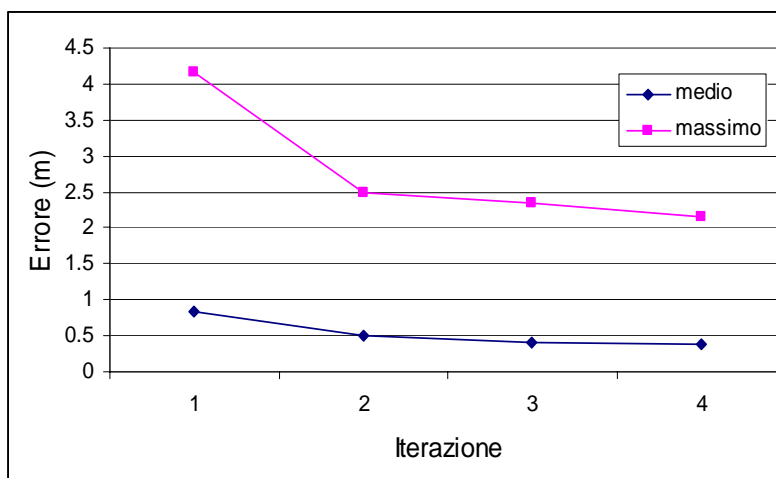


Figura 97. Andamento dei residui sul potenziale in funzione del numero di iterazioni del CMM.

La Figura 98 e la Figura 99 mostrano il campo di trasmissività iniziale e quello ottenuto dopo le iterazioni del CMM; la Figura 100 e la Figura 101 mostrano il confronto tra il campo di altezza piezometrica ottenuto con il CMM dopo quattro iterazioni e l'altezza piezometrica di riferimento utilizzata.

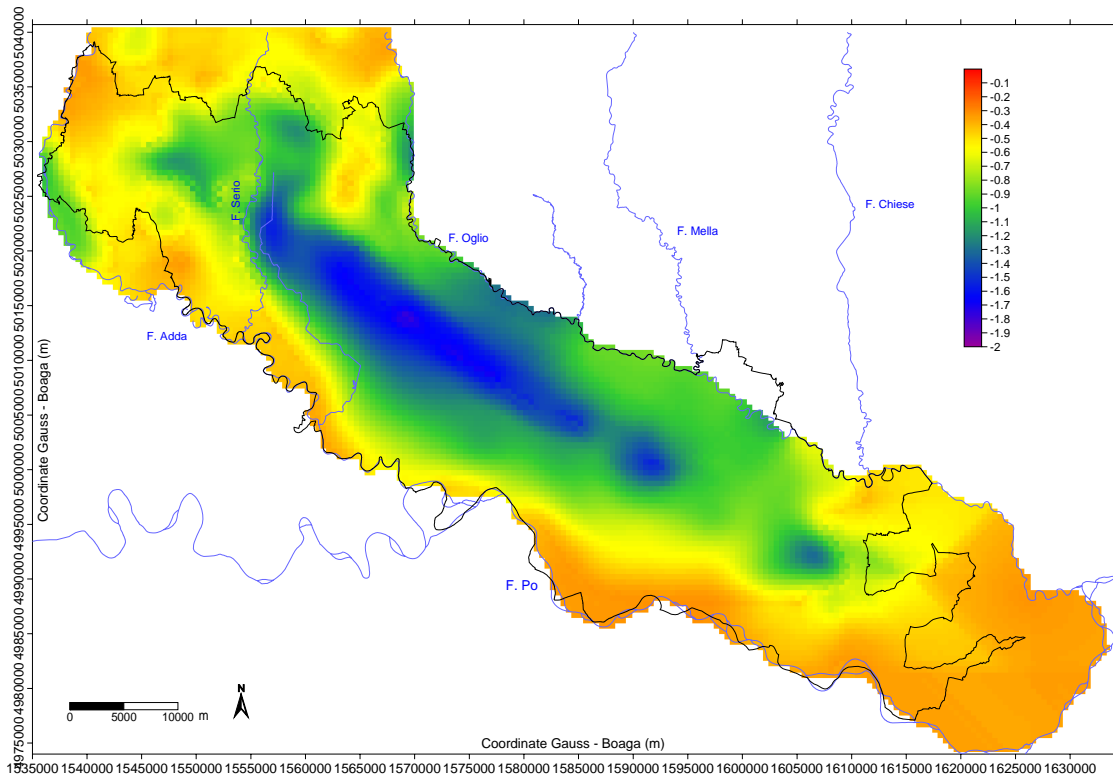


Figura 98. Logaritmo decimale di $T^{(0)}$, campo di trasmissività (in m^2/s) utilizzato per inizializzare il CMM.

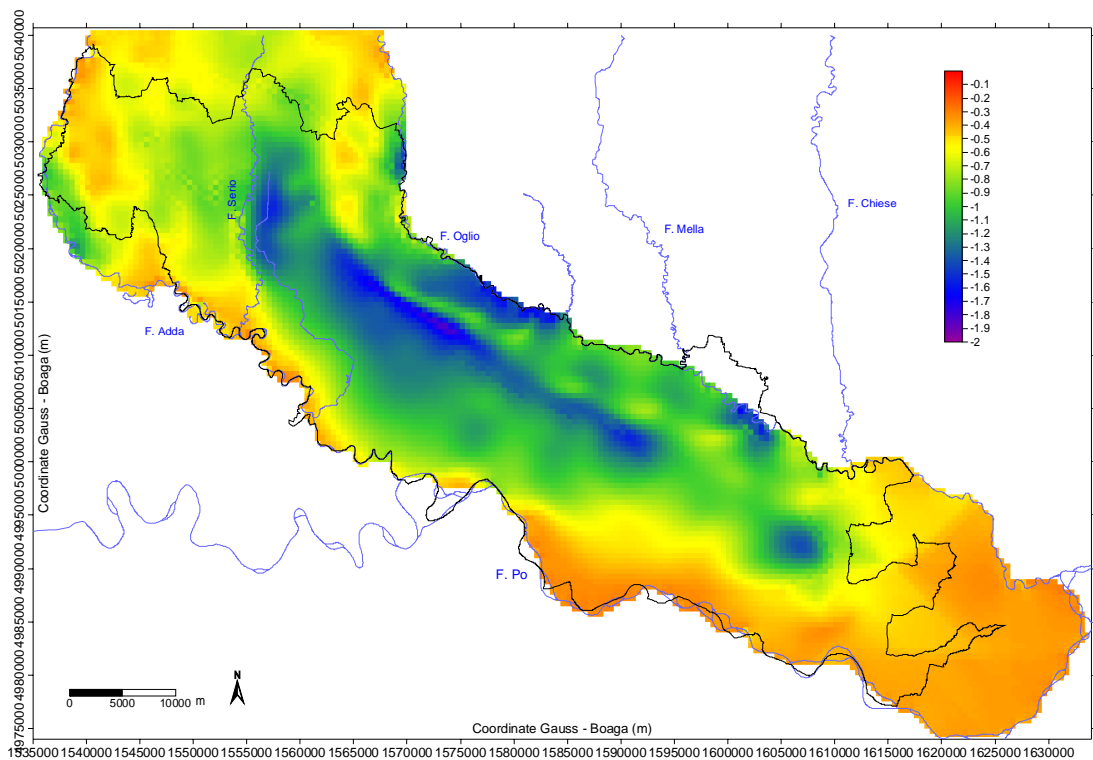


Figura 99. Logaritmo decimale del campo di trasmissività (in m^2/s) ottenuto dopo la calibrazione.

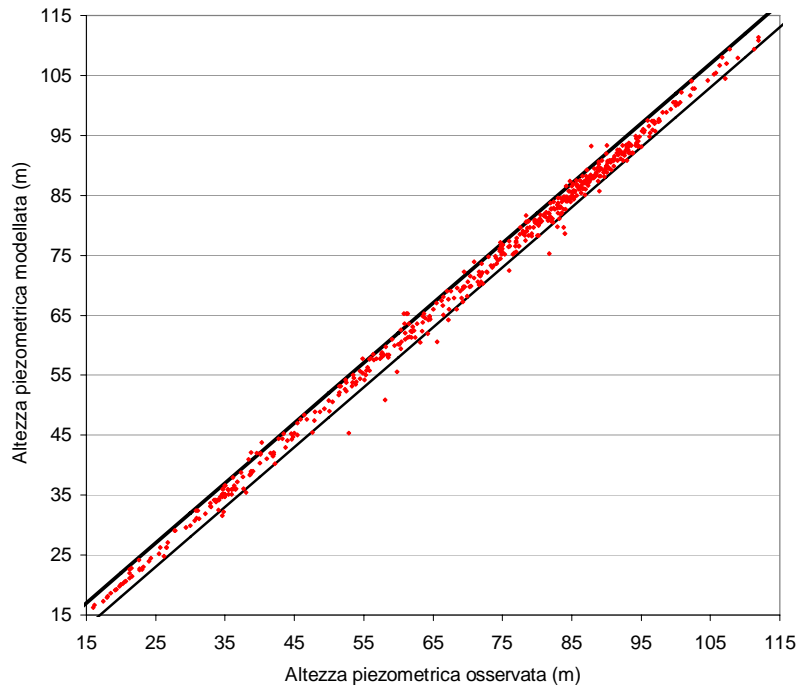


Figura 100. Confronto tra i dati osservativi (ascisse) e i valori di altezza piezometrica ottenuti da M²ME-CR (ordinata). Le rette delimitano i punti per cui il modulo della differenza tra osservazione e previsione del modello è inferiore a 2 m.

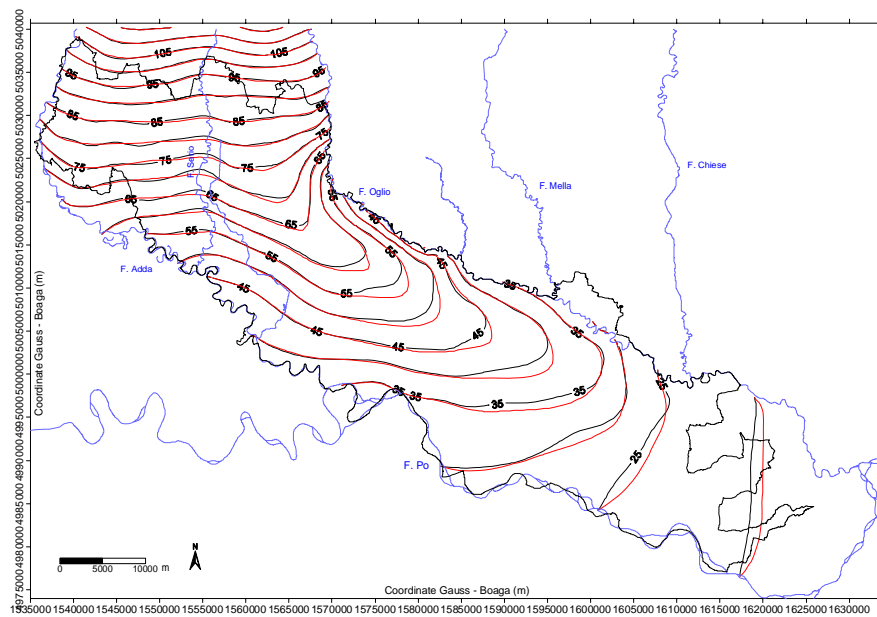


Figura 101. Confronto tra la piezometria di riferimento (linea nera) e quella ottenuta da M²ME-CR (linea rossa) con il campo di trasmissività ottenuto dopo la calibrazione e i relativi termini di sorgente. Equidistanza: 5 m.

La mappa di Figura 99 mostra una distribuzione di trasmissività dell’acquifero abbastanza regolare, delineando chiaramente i passaggi tra zone con trasmissività alta e bassa, senza che questa informazione sia stata inserita a priori nel processo di calibrazione, come invece

viene fatto spesso nelle procedure di calibrazione che utilizzano una zonazione del campo di trasmissività.

Nonostante la regolarità mostrata dalle variazioni della trasmissività, i valori coprono un intervallo che spazia su due ordini di grandezza. Si notano tre ampie zone con alti valori di trasmissività, due a nord lungo le valli dei fiumi Adda e Oglio e una a sud-est della confluenza del Chiese nell'Oglio. Nella parte centrale dell'acquifero le trasmissività identificate lungo il corso dell'Adda presentano valori maggiori di oltre un ordine di grandezza di quelle calcolate lungo il corso dell'Oglio. La parte centrale dell'acquifero, soprattutto lungo il corso del fiume Oglio è caratterizzata da valori di trasmissività bassi.

5.2.2.3.1 Analisi di sensibilità

È stata effettuata anche un'analisi di sensibilità di M²ME-CR, cioè si è studiata la variazione delle altezze piezometriche in seguito a variazioni nei termini di sorgente che sono stati stimati. In particolare è stato risolto il problema in avanti variando uno alla volta i termini di sorgente come indicato in Tabella 29. Come criterio per quantificare la variazione dei risultati abbiamo adottato la differenza assoluta media dell'altezza piezometrica calcolata in ogni prova rispetto a quella data dalla configurazione 6085 (R100, SM050, TD025, SR025, Ch100).

Tabella 29. Analisi di sensibilità del potenziale rispetto ad alcuni termini di sorgente. Δh rappresenta la differenza del potenziale calcolato rispetto alla configurazione 6085 (R100, SM050, TD025, SR025, Ch100).

Termine analizzato	Coefficiente utilizzato	$\Delta h _{medio}$ (m)
Fontanili	0.025	0.323
	0.1	0.148
Terrazzi	0.00625	0.324
	0.05	0.257
Serio	0.05	0.209
	0.1	0.197
Ricarica + Perdite canali	80%	0.771
	50%	1.990

Le variazioni sui risultati più significative appaiono causate dalla variazione dei termini di ricarica.

5.3 Il modello bistrato M²S-CR

Per tenere conto della struttura idrogeologica del sistema acquifero, con una approssimazione utile per lo studio del flusso idrico, è stato sviluppato anche un modello bistrato, costituito da un acquifero freatico, un acquitardo che presenta alcune discontinuità e un acquifero semi-confinato.

Questo modello è stato calibrato in condizioni stazionarie, anche se con una procedura meno completa e approfondita rispetto a quella descritta nel Paragrafo 5.2.2. Infatti le piezometrie di riferimento dei due acquiferi equivalenti non permettono di ricavare valori certi dei parametri fisici attraverso una procedura di calibrazione automatica, soprattutto per quanto riguarda il coefficiente di *leakage* dell'acquitardo, la porosità efficace dell'acquifero freatico e il coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero semi-confinato.

Con questo modello sono state eseguite anche alcune simulazioni in condizioni transitorie, i cui risultati sono difficilmente confrontabili con le piezometrie disponibili; queste simulazioni sono comunque interessanti perché mostrano le potenzialità dello strumento sviluppato, che potrà essere perfezionato a seguito di opportune campagne di misura mirate ad ottenere dati che siano utili anche per la calibrazione di un modello di flusso in un sistema acquifero multistrato in condizioni transitorie.

5.3.1 *Le caratteristiche di M²S-CR*

Richiamiamo qui le principali caratteristiche di M²S-CR, ricordando che le equazioni utilizzate da questo modello sono descritte nell'Appendice 9.5.

5.3.1.1 Schema idrogeologico

Come detto questo modello ipotizza che il sistema acquifero sia approssimabile con un acquifero freatico e uno semi-confinato collegati attraverso un acquitardo. Per la modellazione è necessario definire la base dell'acquifero freatico, che è stata ottenuta come la superficie BFE descritta nel Paragrafo 4.6.2. Le elaborazioni presentate nel Paragrafo 4.6 saranno anche utilizzate per la determinazione dei parametri fisici.

5.3.1.2 Condizioni al contorno

Sono state assegnate condizioni al contorno di Dirichlet lungo tutto il bordo del dominio. In particolare, siccome lungo i fiumi si ritrovano pacchi di sedimenti permeabili abbastanza spessi, allora lì il sistema acquifero è pressoché monostrato e in equilibrio idrostatico, così che la piezometria dell'acquifero freatico è la stessa dell'acquifero semi-confinato. In realtà questa approssimazione è discutibile lungo il corso del fiume Oglio, ma al momento non si è stati in grado di introdurre ipotesi differenti supportate da dati osservativi.

5.3.1.3 Termini di sorgente

Nell'acquifero freatico sono stati inseriti i termini di sorgente relativi a:

- estrazioni di acqua dai pozzi ad uso irriguo, agricolo, industriale;
- ricarica per infiltrazione dell'acqua piovana e di irrigazione;
- drenaggio del fiume Serio;
- drenaggio dai fontanili;
- drenaggio dai terrazzi geomorfologici;
- perdite dei canali.

Questi termini vengono modellati come descritto nel Paragrafo 5.2.1.4.

Nell'acquifero semi-confinato sono stati inseriti i termini di sorgente relativi ai prelievi acquedottistici.

5.3.2 *I parametri fisici di M²S-CR*

I parametri fisici che devono essere assegnati sono:

- conducibilità dell'acquifero freatico;
- trasmissività dell'acquifero semi-confinato;
- coefficiente di leakage dell'aquitardo;
- porosità dell'acquifero freatico;
- coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero semi-confinato.

Per quanto riguarda la conducibilità dell'acquifero freatico, questa è stata ottenuta a partire dalla trasmissività identificata per M²ME-CR (Figura 99), calcolando poi la conducibilità equivalente dell'acquifero freatico come il rapporto tra la trasmissività identificata e lo spessore saturo di ciascuna cella, ottenuto come differenza tra la piezometria di riferimento dell'acquifero freatico (Tavola 4) e BFE (Tavola 13).

5.3.2.1 Trasmissività equivalenti dell'acquifero semi-confinato da prove in pozzo e stratigrafie

I valori di conducibilità rappresentati nella Tavola 9 sono stati moltiplicati per gli spessori dei sedimenti permeabili rappresentati nella Tavola 16 ottenendo in questo modo una valutazione delle trasmissività equivalenti dell'acquifero semi-confinato (Tavola 17).

Una considerazione preliminare ed importante su questo elaborato è che i valori di trasmissività del semi-confinato risultano almeno un ordine di grandezza più bassi dei valori di trasmissività del sovrastante acquifero freatico calcolati mediante la soluzione del problema inverso. Un'altra considerazione importante è che le trasmissività dell'acquifero semi-confinato sono state interpretate da prova di portata eseguite su pozzi e non con misure in piezometri circostanti; quindi i risultati sono significativi alla scala del pozzo o comunque per volumi di acquifero le cui lunghezze caratteristiche sono dello stesso ordine dello spessore degli intervalli permeabili filtrati in verticale e di poche decine di metri in direzione orizzontale.

I valori calcolati sono poi stati interpolati utilizzando il kriging e regolarizzati su una maglia quadrata di 500 m di lato assumendo che i valori di trasmissività fossero rappresentativi di volumi di roccia corrispondenti ad aree di 250000 m² quindi come se fossero trasmissività equivalenti; questa operazione è fisicamente poco giustificata e quindi criticabile.

Al contrario le trasmissività dell'acquifero freatico sono state calcolate mediante la soluzione di un problema inverso direttamente alla scala del modello usando valori di piezometria, che essendo una funzione regolare è più facilmente interpolabile, e quindi effettivamente rappresentativa di maglie di lato pari a 500 m.

Comunque l'elaborato ha condotto ad una zonazione dell'acquifero ed è utilizzabile per un confronto, almeno qualitativo, tra le trasmissività delle varie zone e gli spessori dei sedimenti permeabili del semi-confinato della Tavola 16 e per un confronto coi valori di trasmissività equivalenti del sovrastante acquifero freatico calcolati con tecniche diverse.

A nord-ovest i valori di trasmissività sono compresi tra 0.01 e 0.02 m²/s eccetto che per una vasta area attorno a Dovera dove le trasmissività hanno valori più che doppi. A nord-est, ed in parte lungo il corso del Serio, le trasmissività presentano valori minimi anche più bassi di 0.005 m²/s. Lungo il corso dell'Adda sino alla sua confluenza nel Po, a Cremona, le trasmissività presentano valori attorno ai 0.05 m²/s quindi cinque o più volte maggiori delle trasmissività lungo tutto il corso dell'Oglio sino alla sua confluenza nel Po a sud. Attorno alla città di Cremona, per una vasta area si riscontrano valori di trasmissività compresi tra 0.06 e 0.1 m²/s.

5.3.2.2 Coefficiente di leakage

Il coefficiente di leakage è stato differenziato in modo da tenere conto del diverso comportamento idrodinamico dell'acquifero nell'area in esame, soprattutto in relazione alla potenza e alla continuità laterale di questo corpo idrogeologico equivalente. In particolare, si è considerato che dove il sistema acquifero presenta differenze considerevoli tra le altezze piezometriche dell'acquifero freatico e di quello semi-confinato, l'acquifero è abbastanza efficiente da non permettere ai due sistemi di raggiungere una situazione di

equilibrio idrostatico. Invece dove la differenza è piccola, allora l'acquitarzo non crea una separazione molto forte. Basandosi su questa osservazione l'acquitarzo viene suddiviso in due zone nelle quali si assume che la conducibilità dei sedimenti che compongono l'acquitarzo assumano valori differenti. In particolare il coefficiente di leakage è stato assegnato inizialmente attraverso la formula seguente:

$$(5.3.1) \quad \sigma = \begin{cases} \kappa K_0 \Delta x^2 / (50 f_f) & \text{se } |h^{(F)} - h^{(C)}| \leq 2 \\ K_0 \Delta x^2 / (50 f_f) & \text{se } |h^{(F)} - h^{(C)}| > 2 \end{cases}$$

dove f_f è la frazione di sedimenti poco permeabili presenti tra BFE e BFE-50 m rappresentata in Tavola 15.

Questa espressione è stata scelta sulla base del seguente ragionamento. La componente del flusso attraverso l'acquitarzo che viene considerata è solo quella verticale. Ipotizzando che in prima approssimazione il sistema sia costituito da una stratificazione di livelli a conducibilità alta (ghiaie e sabbie grossolane o medie) e bassa (sabbie fini, limi e argille), allora il flusso avviene in serie attraverso questi strati. Utilizziamo la notazione seguente:

- K_s è la conducibilità equivalente dell'acquitarzo;
- K_f è la conducibilità media dei sedimenti fini a bassa conducibilità;
- K_g è la conducibilità media dei sedimenti grossolani ad alta conducibilità;
- f_f è la frazione dei sedimenti fini a bassa conducibilità compresi tra BFE e BFE-50 m.

Allora $K_s^{-1} = (f_f K_f^{-1} + (1 - f_f) K_g^{-1}) / 2$, da cui, tenuto conto che $K_f \ll K_g$, mentre f_f e $(1 - f_f)$ hanno lo stesso ordine di grandezza, si ricava $K_s = 2 K_f f_f^{-1}$. In altre parole la conducibilità media dell'acquitarzo dovrebbe essere proporzionale alla conducibilità dei sedimenti fini e inversamente proporzionale alla frazione di sedimenti fini che compongono l'acquitarzo. Abbiamo però tenuto conto che dove l'acquitarzo è meno efficace nella separazione tra i due acquiferi, cioè dove lo spessore dei sedimenti fini nei 50 m sottostanti BFE è minore, è probabile che la struttura idrogeologica sia costituita da lenti argilloso-limose di basso spessore e con bassa continuità laterale e quindi il valore di K_s ottenuto con questo schema potrebbe essere sottostimato. Al contrario, i livelli limoso-argillosi nelle zone in cui l'acquitarzo separa meglio i livelli acquiferi dovrebbero avere una discreta continuità laterale. Per questo il valore di K_s è stato differenziato, a seconda che i due acquiferi siano ben separati, $K_s = K_0$ se $|h^{(F)} - h^{(C)}| > 2$, o ben collegati, $K_s = \kappa K_0$ se $|h^{(F)} - h^{(C)}| \leq 2$.

I valori di K_0 e κ sono stati scelti come quelli che rendono minimi gli errori sulle piezometrie degli acquiferi freatico e semi-confinato. In particolare sono stati fissati $K_0 = 10^{-8}$ m/s e $\kappa = 25$.

Successivamente i valori di σ sono stati filtrati per ragioni fisiche e matematiche:

- evitare una variazione artificiosa alla scala considerata al passaggio dalle zone in cui gli acquiferi freatico e semi-confinato sono ben separati a quelle in cui hanno un contatto idraulico migliore;
- limitare i problemi di convergenza dell'algoritmo di calcolo della soluzione.

5.3.2.3 Calibrazione della trasmissività equivalente dell'acquifero semi-confinato

La trasmissività equivalente dell'acquifero semi-confinato ricavata dai risultati delle prove di portata e dall'analisi delle stratigrafie, come descritto nel Paragrafo 5.3.2.1, fornisce già

un discreto accordo tra le piezometrie di riferimento e quelle del modello. Si è comunque applicato anche in questo caso il CMM (Paragrafo 5.2.2.1) per la calibrazione della trasmissività equivalente dell'acquifero semi-confinato. Utilizzando il campo rappresentato in Tavola 17 come trasmissività iniziale, una sola iterazione del CMM è stata sufficiente per ridurre l'errore medio sui potenziali da 0.85 m a 0.63 m. Il logaritmo decimale della trasmissività identificata è rappresentato in Figura 102. Si notano i valori particolarmente elevati nella zona di Cremona e a sud-est della città; questa è la zona dove sono anche perforati molti pozzi "profondi" per acqua ad uso potabile. Il resto del dominio presenta invece trasmissività generalmente inferiori a 10^{-2} m²/s.

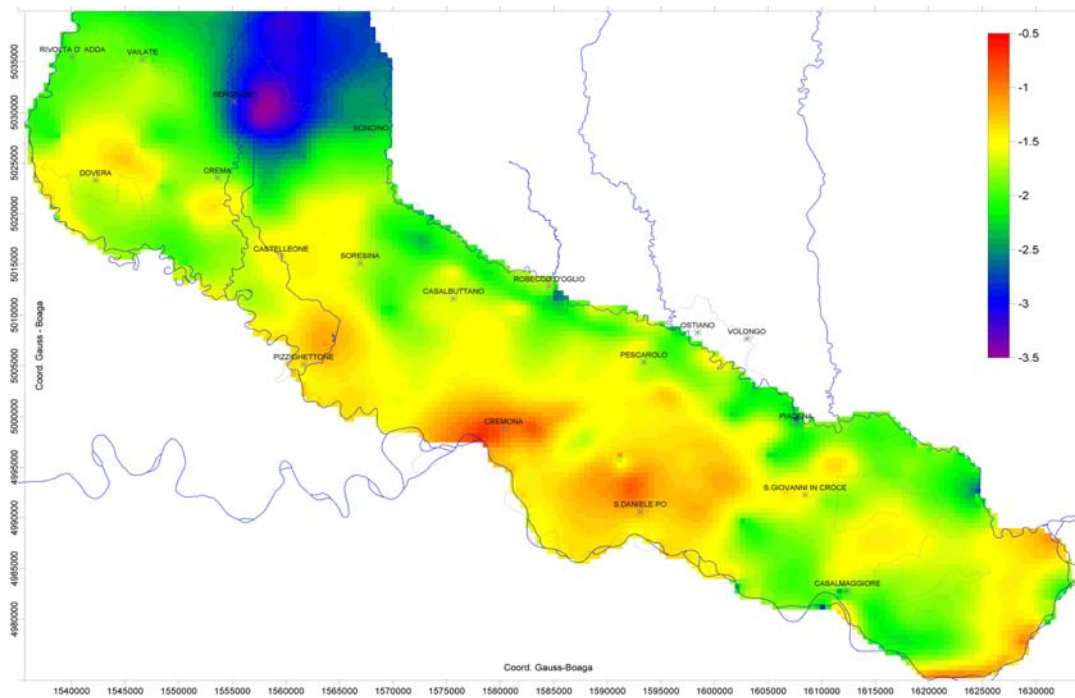


Figura 102. Campo di LogT per l'acquifero semi-confinato identificata con l'applicazione del CMM.

5.3.2.4 Porosità efficace dell'acquifero freatico e coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero semi-confinato

Non essendo disponibili dati su campo, tanto meno alla scala del modello, non è stato possibile assegnare campi eterogenei di porosità efficace per l'acquifero freatico e di coefficiente di immagazzinamento per l'acquifero semi-confinato. Pertanto sono stati scelti valori tratti dalla letteratura, rispettivamente 0.2 e 0.002, che hanno comunque permesso di ottenere primi risultati abbastanza ragionevoli.

5.3.3 Risultati di M²S-CR

I risultati delle simulazioni effettuate con M²S-CR vengono presentati separatamente per lo studio delle condizioni stazionarie o, per meglio dire, pseudo-stazionarie e transitorie. In particolare in questo Paragrafo confrontiamo le previsioni del modello e le osservazioni, come primo passo verso una calibrazione completa e approfondita, che al momento non è permessa dai dati, soprattutto per il caso transitorio.

5.3.3.1 Risultati in condizioni stazionarie

La Figura 103 e la Figura 104 mostrano il confronto tra le piezometrie osservate e modellate rispettivamente per l'acquifero freatico e l'acquifero semi-confinato.

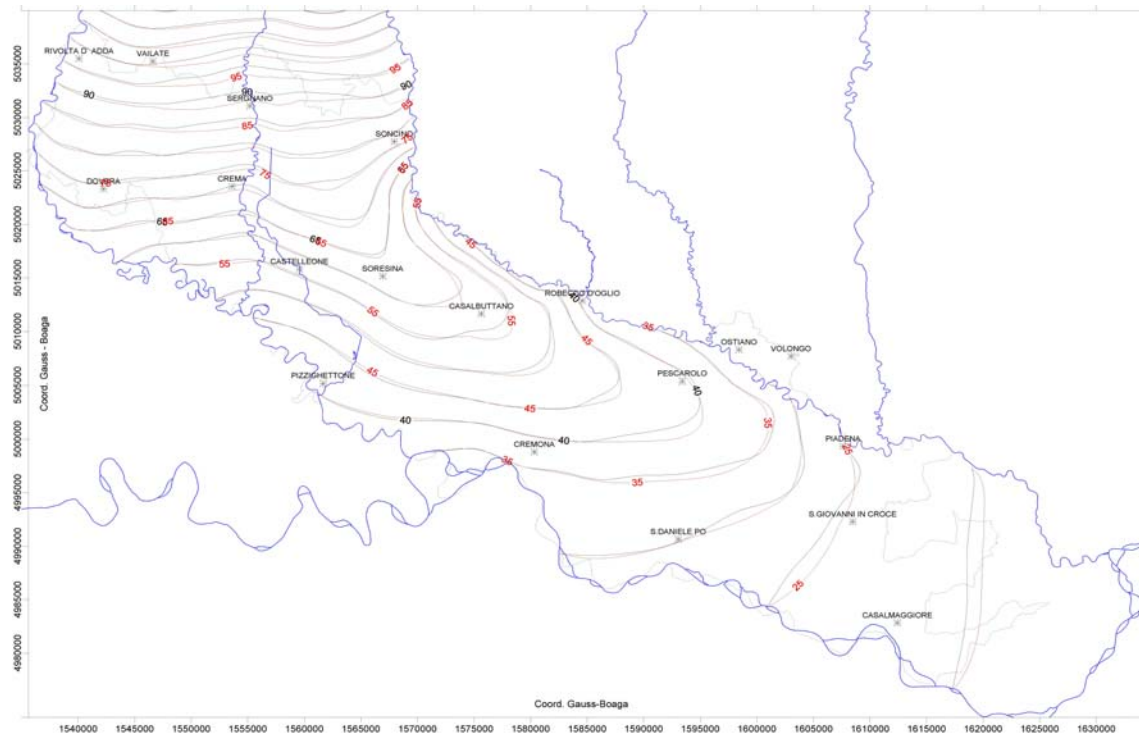


Figura 103. Curve di livello dell'altezza freatica di riferimento (linee nere) e di quella ottenuta dopo l'applicazione del CMM (linee rosse). (Equidistanza: 5 m).

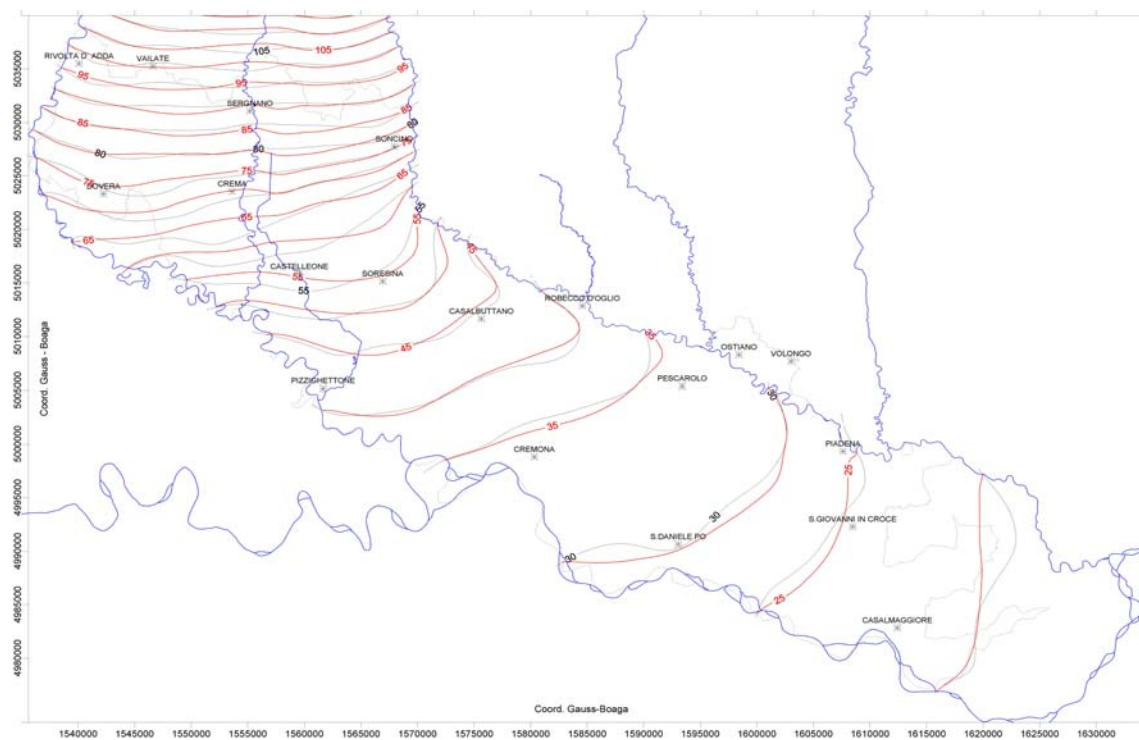


Figura 104. Curve di livello della piezometria dell'acquifero semi-confinato di riferimento (linee nere) e di quella ottenuta dopo l'applicazione del CMM (linee rosse). (Equidistanza: 5 m).

L'accordo per l'acquifero freatico è molto vicino a quello osservato già in precedenza per M²ME-CR, con errori piuttosto contenuti. Per l'acquifero semi-confinato gli errori restano un po' più elevati, soprattutto nella zona a sud di Crema.

5.3.3.2 Risultati in condizioni transitorie

Per un modello in condizioni transitorie è necessario assegnare condizioni iniziali. In questo caso non è facile realizzare una carta piezometrica ad un certo istante, pertanto si è scelta una strategia che permettesse di tenere conto, almeno in forma approssimata, l'andamento temporale del flusso e rendere i risultati meno dipendenti dalla condizione iniziale. A questo scopo è stato scelto come campo di potenziale iniziale quello ottenuto dalla modellazione in condizioni stazionarie ed è stata avviata la simulazione per il 2001, cioè assegnando i termini di sorgente relativi a questo anno. Alla fine il risultato finale è stato utilizzato come dato iniziale per la vera e propria modellazione in transitorio dal gennaio 2001 al dicembre 2003.

I risultati vengono qui presentati con alcuni grafici che mostrano l'andamento del potenziale in alcune celle del dominio modellato con M²S-CR (linee continue) e le osservazioni (rappresentate dai punti) eseguite in piezometri localizzati nella medesima cella. I risultati migliori si ottengono per i piezometri del Consorzio Vacchelli. A titolo di esempio vengono riportati i risultati dei piezometri gestiti da questo consorzio e identificati con i numeri 2 (Figura 105), 7 (Figura 106) e 18 (Figura 107).

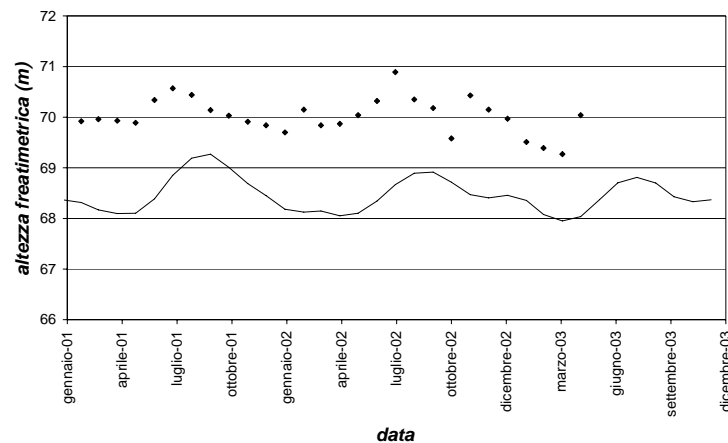


Figura 105. Andamento della piezometria osservata (punti) e modellata (linea) nel piezometro n. 2 del Consorzio Vacchelli.

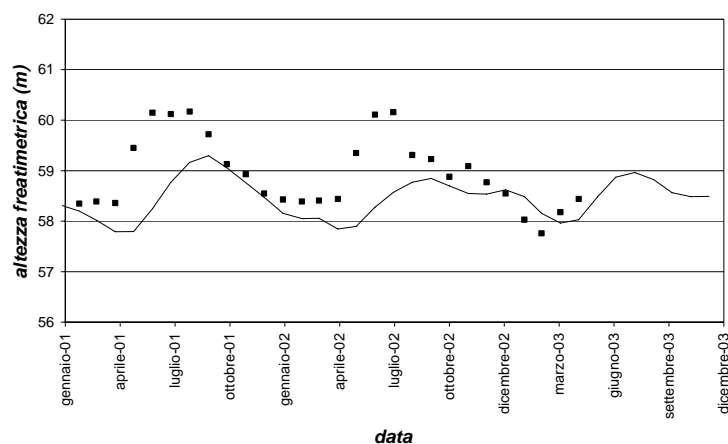


Figura 106. Andamento della piezometria osservata (punti) e modellata (linea) nel piezometro n. 7 del Consorzio Vacchelli.

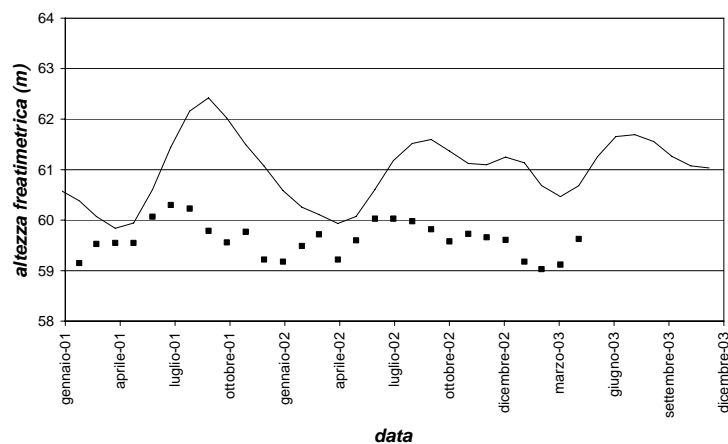


Figura 107. Andamento della piezometria osservata (punti) e modellata (linea) nel piezometro n. 18 del Consorzio Vacchelli.

Soprattutto per i primi due l'andamento temporale della altezza freaticometrica è riprodotto abbastanza bene, con una discreta correlazione tra le osservazioni e le previsioni del modello. Le differenze tra i valori assoluti, che sono anche dell'ordine di un paio di metri sono ragionevoli considerando che i piezometri non sono ubicati al centro delle celle, che il modello è stato calibrato con potenziali di riferimento in condizioni pseudo-stazionarie, ottenuti da interpolazione e filtraggio dei dati osservativi, ecc.

Nel caso di alcuni piezometri monitorati dal Consorzio della Media Pianura Bergamasca non si notano dalle osservazioni andamenti temporali particolari e in questo caso le oscillazioni previste dal modello sono anch'esse molto contenute (si veda l'esempio in Figura 108).

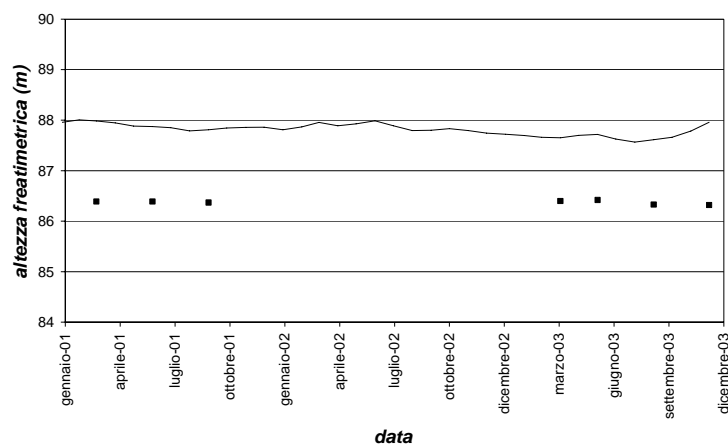


Figura 108. Andamento della piezometria osservata (punti) e modellata (linea) nel piezometro n. 574 del Consorzio della Media Pianura Bergamasca.

Infine per quanto riguarda alcuni piezometri del consorzio Dugali l'accordo è meno soddisfacente, come mostrato a titolo di esempio in Figura 109. Per questo piezometro l'escursione prevista dal modello è coerente con quella osservata e così pure i valori medi del potenziale, ma gli andamenti temporali delle osservazioni e del modello risultano talora in controfase.

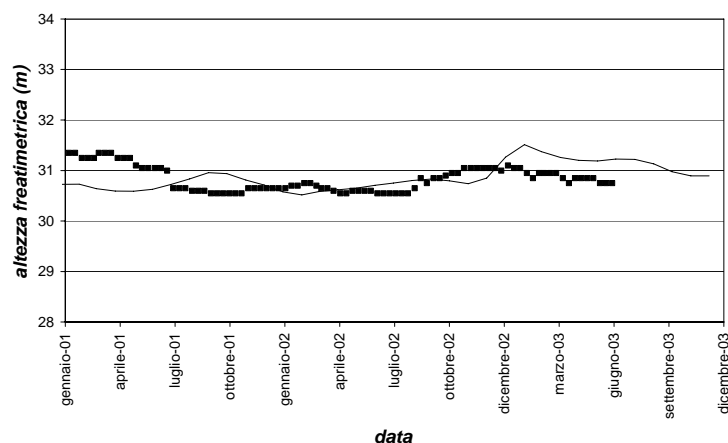


Figura 109. Andamento della piezometria osservata (punti) e modellata (linea) nel piezometro n. 16 del Consorzio Dugali.

Allo stato attuale delle conoscenze si può ritenere che i risultati del modello in condizioni transitorie siano soddisfacenti, quanto meno coerenti con le informazioni e le osservazioni disponibili.

6 Risultati

Da un lato la ricarica dell'acquifero freatico è stata determinata con il modello di bilancio idrologico del suolo tenendo conto di tutti i dati disponibili sul sistema irriguo, sull'attività agricola della zona e sulle caratteristiche dei suoli. Dall'altro lato i termini di sorgente e il campo di trasmissività ottenuto con la calibrazione (Figura 99) permettono al modello M²ME-CR di riprodurre fedelmente il potenziale di riferimento. Questo garantisce una certa affidabilità ai risultati ottenuti con il modello costituito dai due sotto-modelli bilancio idrologico e M²ME-CR, che è stato quindi utilizzato per effettuare diverse simulazioni, corrispondenti alla situazione attuale del sistema acquifero e ad alcuni ipotetici scenari. Questo è un primo esempio di applicazione di questo strumento per il supporto alle decisioni di carattere amministrativo e politico.

6.1 Stime del bilancio idrico

6.1.1 Risultati di M²ME-CR

Innanzitutto si è proceduto al calcolo dei termini di bilancio del sistema acquifero con il modello M²ME-CR, le cui stime sono riportate nella Tabella 30.

Tabella 30. Termini del bilancio idrico stimati con M²ME-CR

<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Portata entrante dal bordo settentrionale del modello	21.35	
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Adda		20.34
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Oglio		22.61
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Po		10.75
Drenaggio del fiume Serio		3.20
Drenaggio dei fontanili		10.78
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		3.77
Prelievi per usi industriali e agricoli		11.13
Prelievi per uso acquedottistico		3.25
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	64,48	

La Figura 110 mostra la posizione dei fontanili e dei terrazzi che si ritiene siano attivi, cioè forniscano una portata media annua diversa da zero, in base ai risultati del modello. Assieme alla Tabella 30, questa figura permette di evidenziare due fatti.

- (1) La portata drenata dai fontanili proviene per circa metà da quelli del sistema Adda-Serio e per metà da quelli del sistema Serio-Oglio. Questo risultato è in contraddizione con le misure osservative della portata delle rogge fontanilizie lungo i transetti Adda-Serio e Serio-Oglio, solo se si considera la portata media nei due transetti; se invece se ne considerano le portate minime nel corso dell'anno, cioè quelle relative ai periodi invernali, quando lo scorrimento superficiale è trascurabile, allora il risultato del modello è in accordo con l'osservazione che stima rispettivamente 7 m³/s per il transetto Adda-Serio e 5 m³/s per il transetto Serio-Oglio.
- (2) I termini di sorgente che corrispondono al drenaggio dei terrazzi risultano attivi per la maggior parte in alcune celle disposte lungo il fiume Serio, poi lungo il terrazzo

principale dell'Adda, lungo il fiume Oglio e infine lungo il terrazzo che separa il livello fondamentale della pianura dai sedimenti olocenici recenti nella zona sud-orientale del dominio ad est della città di Cremona.

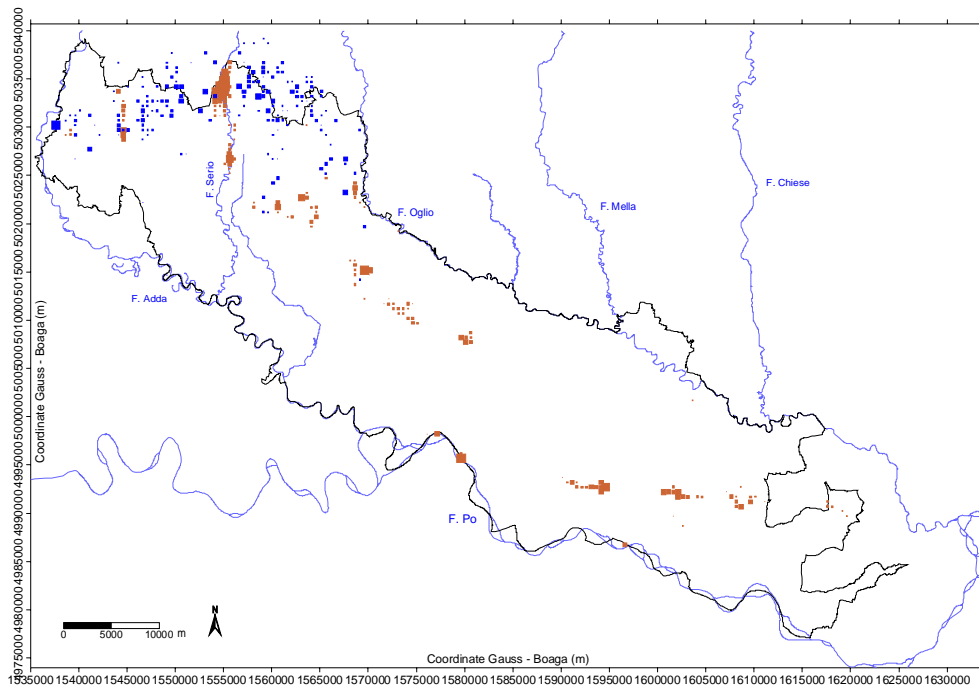


Figura 110. Posizione dei fontanili (blu) e dei terrazzi (marrone) attivi in base ai risultati del modello. La dimensione dei punti è proporzionale alla portata estratta.

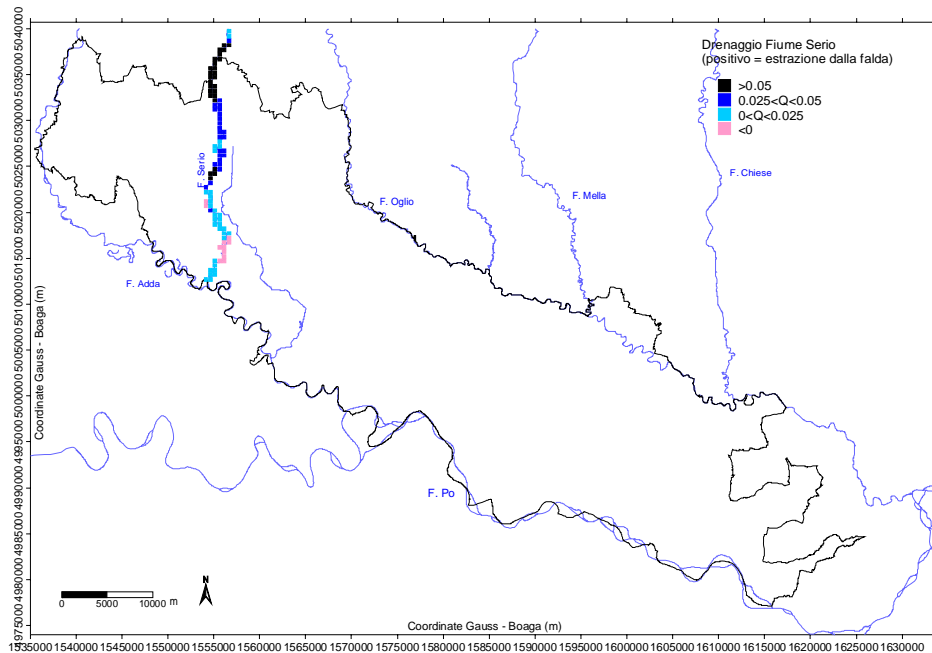


Figura 111. Drenaggio del fiume Serio stimato dal modello.

La Figura 111 mostra come il drenaggio da parte del fiume Serio sia particolarmente intenso al confine tra le province di Cremona e Bergamo, mentre va riducendosi lungo il

corso del fiume verso sud, fino ad arrivare in alcune zone ristrette poco a monte della confluenza nel fiume Adda, a una debole alimentazione dell'acquifero.

6.1.2 Risultati di M²S-CR

Analizzando la Tabella 31, in cui si riportano i risultati per l'acquifero freatico, e la Tabella 32, in cui si riportano i risultati per l'acquifero semi-confinato, si nota che i termini relativi al bilancio idrico per l'acquifero freatico non sono sostanzialmente modificati rispetto a quelli ottenuti con M²ME-CR. Le portate in gioco nell'acquifero semi-confinato sono molto più basse di quelle dell'acquifero semi-confinato. La somma delle portate entranti per l'acquifero freatico (dal bordo settentrionale e per la ricarica) è superiore a 80 m³/s, mentre è di solo 6 m³/s per l'acquifero semi-confinato e di questo la gran parte è dovuta al leakage dall'acquifero freatico.

Tabella 31. Termini del bilancio idrico stimati con M²S-CR per l'acquifero freatico

Termine del bilancio	Portate (m³/s)	
	<i>In entrata</i>	<i>In uscita</i>
Portata entrante dal bordo settentrionale del modello	21.77	
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Adda		20.05
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Oglio		21.48
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Po		10.29
Drenaggio del fiume Serio		3.18
Drenaggio dei fontanili		10.12
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		3.30
Prelievi per usi industriali e agricoli		10.76
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	63,11	
Scambio di leakage		5.79

Tabella 32. Termini del bilancio idrico stimati con M²S-CR per l'acquifero semi-confinato.

Termine del bilancio	Portate (m³/s)	
	<i>In entrata</i>	<i>In uscita</i>
Portata entrante dal bordo settentrionale del modello	0.28	
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Adda		1.12
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Oglio		0.85
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Po		0.93
Prelievi per uso acquedottistico		3.12
Scambio di leakage	5.79	

Il flusso attraverso l'acquitardo (Figura 112) ha valori particolarmente elevati nelle zone di transizione tra l'area in cui i due acquiferi sono meglio accoppiati e quella in cui invece la separazione è più netta.

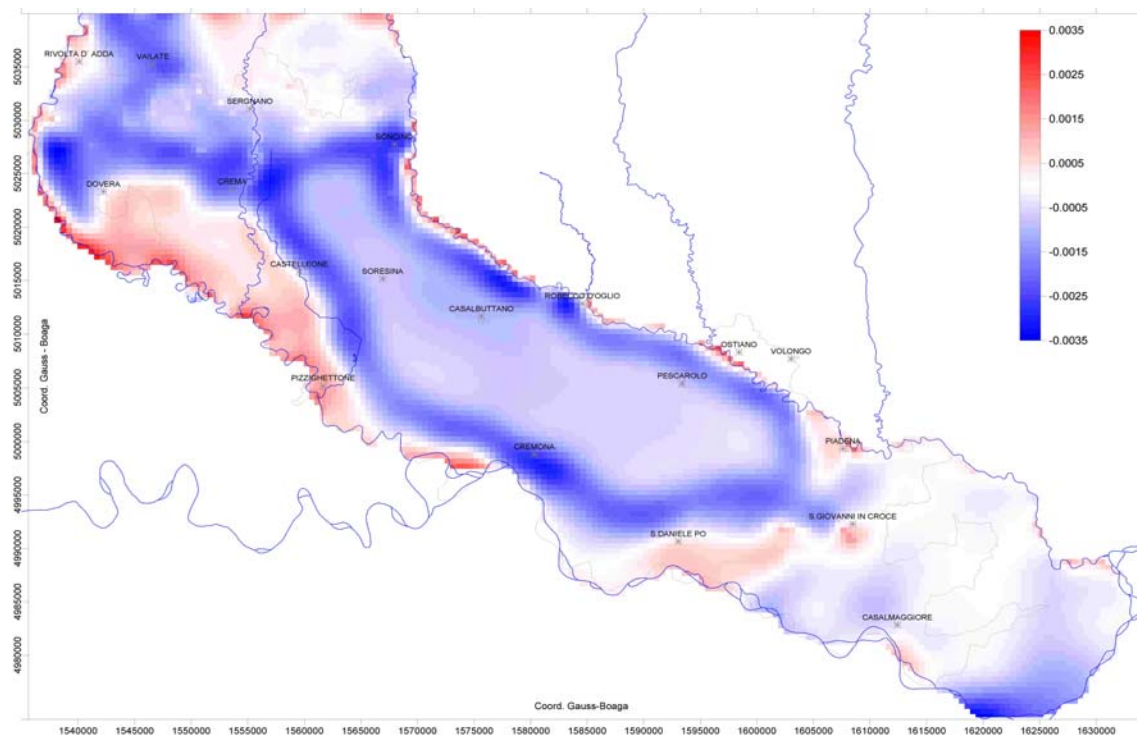


Figura 112. Termine di leakage (positivo quando diretto dall'acquifero semi-confinato all'acquifero freatico) in m^3/s per cella.

6.2 Analisi dei risultati per scenari

Sono stati considerati tre tipi di scenari.

Il primo riguarda l'analisi degli effetti che una riduzione del flusso entrante da monte nel sistema acquifero può provocare. Dal punto di vista pratico, questo scenario permette di prevedere quali effetti possano avere sul sistema acquifero della provincia di Cremona modifiche del bilancio idrico per il bacino idrografico a monte. In particolare viene considerata una diminuzione del flusso entrante da monte, che potrebbe dipendere dalla diminuzione della ricarica dell'acquifero freatico nella provincia di Bergamo per effetto di variazioni di uso del suolo o per diverse pratiche agricole e irrigue oppure da un aumento dei prelievi di acque sotterranee.

Gli altri scenari considerati sono invece relativi alle due ipotesi di riassetto dei sistemi irrigui descritte nel Paragrafo 3.3.2.

6.2.1 Variazione del flusso entrante da monte

M²ME-CR è stato modificato in questo caso, in modo da assegnare sul bordo settentrionale una condizione al contorno di flusso imposto (condizioni di Neumann). La prima prova è stata effettuata calcolando il flusso entrante da nord per la configurazione già analizzata durante la calibrazione. È stato quindi simulato con il modello modificato il flusso e si sono ottenuti gli stessi risultati precedenti, garantendo così la correttezza delle modifiche introdotte nel codice di calcolo. La portata di ogni cella del bordo settentrionale è stata quindi ridotta proporzionalmente in modo tale da avere una portata totale assegnata.

Tabella 33. Termini del bilancio idrico corrispondenti a diversi flussi entranti dal bordo settentrionale.

Termine del bilancio	Portate (m ³ /s)			
	Prova di riferimento		Prova modificata	
	Entrata	Uscita	Entrata	Uscita
Portata entrante dal bordo settentrionale del modello	21.35		15.00	
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Adda		20.34		19.16
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Oglio		22.61		21.21
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Po		10.75		10.75
Drenaggio del fiume Serio		3.20		2.48
Drenaggio dei fontanili		10.78		8.02
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		3.77		3.49
Prelievi per usi industriali e agricoli		11.13		11.13
Prelievi per uso acquedottistico		3.25		3.25
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	64,48		64,48	

La riduzione da oltre 20 a 15 m³/s del flusso di alimentazione da monte produce una diminuzione del drenaggio totale operato dai fontanili, dai terrazzi e dal fiume Serio. In particolare la riduzione della portata estratta dai fontanili e del drenaggio netto del fiume Serio è circa del 25%; invece la riduzione della portata estratta dai terrazzi geomorfologici è più contenuta (circa 8%).

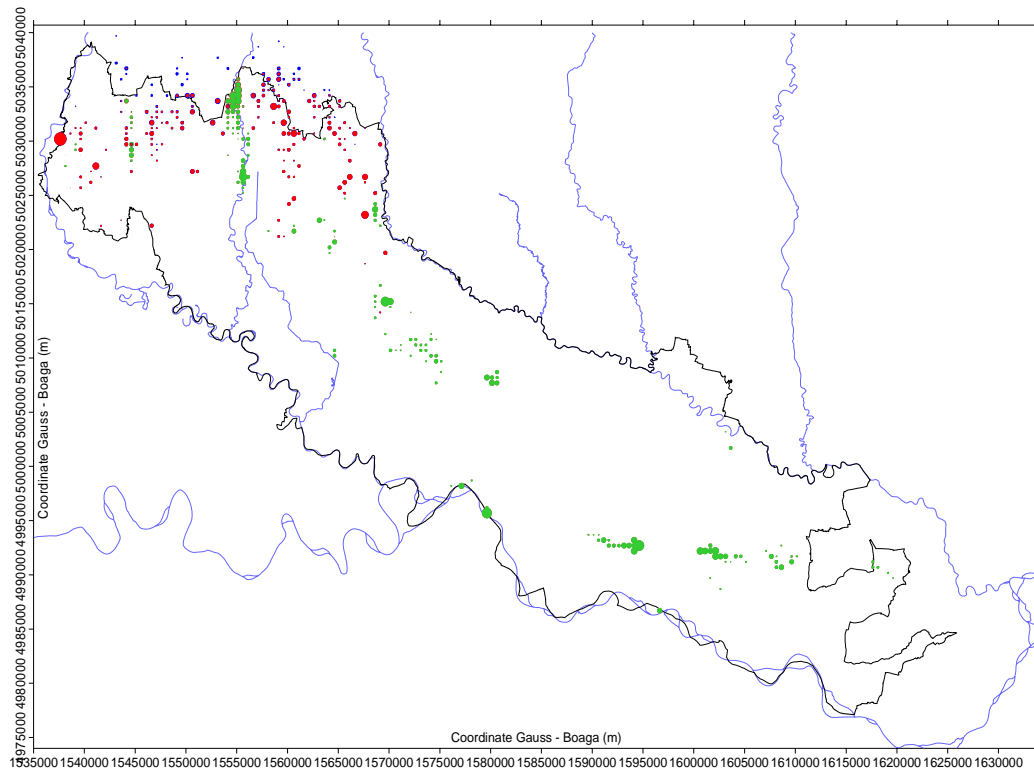


Figura 113. Posizione dei fontanili attivi in base ai risultati del modello nella prova originale (punti blu) e in quella con una portata da monte ridotta a 15 m³/s (punti rossi).

La Figura 113 mostra la posizione dei fontanili che il modello prevede siano attivi nelle due prove. I punti rossi mostrano fontanili che sono attivi in entrambe le simulazioni: i fontanili che appaiono come punti blu sono quelli che, in base alle previsioni del modello, risulterebbero inattivi, cioè non più produttivi, in seguito ad una diminuzione del flusso da monte. Si osserva che questi fontanili sono quelli più settentrionali e produrrebbero un ulteriore spostamento della fascia dei fontanili verso sud, accentuando il fenomeno già evidenziato dalla tavola 5 di Maione *et al.* (1991).

6.2.2 Variazione della ricarica dovuta all'irrigazione

Il modello è stato utilizzato anche per fornire stime degli effetti prodotti da variazioni della ricarica dovute a modifiche del sistema irriguo. Gli scenari considerati sono descritti nel Paragrafo 3.3.2.

Anche in questo caso è stato utilizzato M²ME-CR nella configurazione con una condizione di flusso imposto a monte. Questa scelta è legata al fatto che una condizione di Neumann è meno vincolante sulla piezometria di quanto non lo sia una condizione di Dirichlet (potenziale assegnato).

La Tabella 34 elenca i termini del bilancio idrico per questi due scenari. Si nota che la riduzione della ricarica rispetto alla configurazione di riferimento (Tabella 30) da oltre 60 m³/s a circa 20 m³/s produce una consistente riduzione dei termini di drenaggio del fiume Serio, dei fontanili e dei terrazzi geomorfologici.

Tabella 34. Termini del bilancio idrico corrispondenti ai due scenari corrispondenti a variazioni della ricarica dovuta all'irrigazione.

Termini del bilancio	Portate (m ³ /s)			
	Scenario 1		Scenario 2	
	Entrata	Uscita	Entrata	Uscita
Portata entrante dal bordo settentrionale del modello	21.35		21.35	
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Adda		13.15		12.39
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Oglio		11.54		10.74
Portata uscente dal bordo del modello lungo il fiume Po		4.80		4.13
Drenaggio del fiume Serio		1.62		1.48
Drenaggio dei fontanili		5.23		4.84
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		1.38		1.26
Prelievi per usi industriali e agricoli		2.00		2.00
Prelievi per uso acquedottistico		3.25		3.25
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	21.62		18.76	

La Figura 114 mostra, analogamente a quanto fatto in precedenza con la Figura 113, il gran numero di fontanili che non sono più attivi nello scenario 2. Chiaramente questo scenario è drastico e si riferisce cioè a una situazione estrema, difficilmente realizzabile.

Questo è dimostrato anche dalla Figura 115, dove è riportata la differenza tra la piezometria modellata per la configurazione di riferimento e quella per lo scenario 2: tutta la zona che corrisponde alla fascia centrale del modello presenta un abbassamento per lo scenario 2 che raggiunge addirittura i 14 metri. In queste condizioni il modello mostrato equivalente che è basato sull'ipotesi che lo spessore dell'acquifero freatico non dipenda dalla quota della tavola d'acqua non è più affidabile, ma la riduzione della trasmissività sarebbe ancora maggiore e quindi gli effetti reali ancora più dirompenti. Questo dimostra la non sostenibilità di uno scenario come quello proposto.

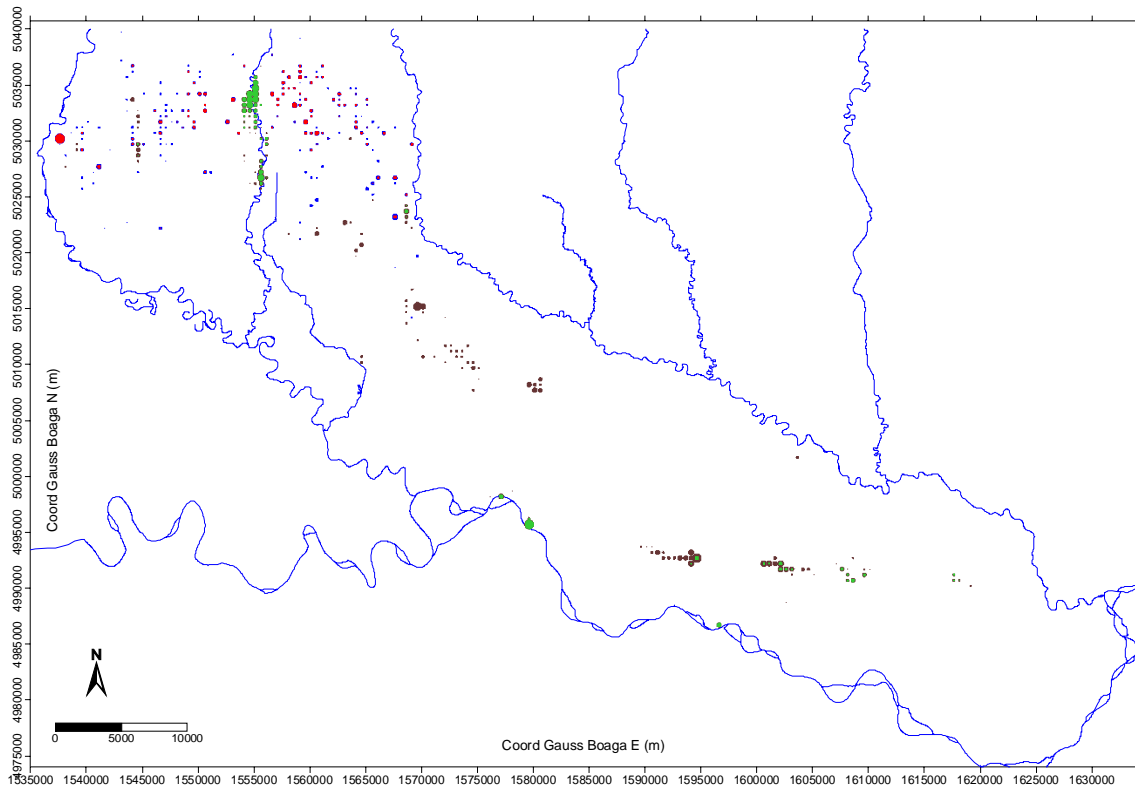


Figura 114. Posizione dei fontanili e dei terrazzi attivi in base ai risultati del modello nella situazione di riferimento (punti blu – fontanili; punti marroni - terrazzi) e per lo scenario 2 (punti rossi – fontanili; punti verdi - terrazzi).

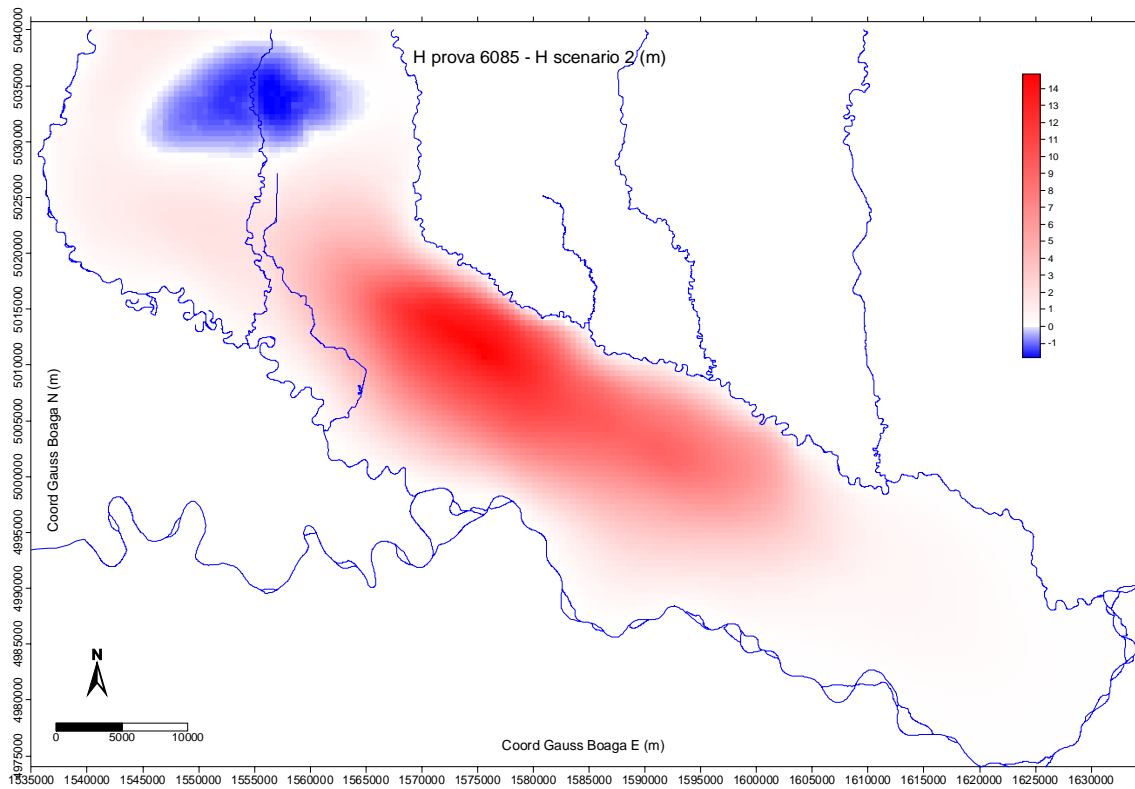


Figura 115. Differenza tra l'altezza piezometrica modellata per la condizione di riferimento e quella dello scenario 2.

Sottolineiamo che risultati analoghi a quelli mostrati in Figura 114 e Figura 115 si ottengono anche per lo scenario 1 e che gli effetti sarebbero ancora più evidenti se si prevedesse un analogo intervento nella zona a monte dell'area studiata, con l'effetto di ridurre la portata entrante nel sistema acquifero per filtrazione attraverso il bordo settentrionale del modello.

6.3 Caratterizzazione e zonazione dell'acquifero

Il sistema acquifero è stato "caratterizzato" nel senso che si è identificata una tripletta di campi (piezometria di riferimento, sorgenti e trasmissività), tra loro fisicamente consistenti in condizioni pseudo-stazionarie, nel senso che onorano l'equazione di bilancio discreta.

I valori di trasmissività equivalente identificati costituiscono una delle tante soluzioni possibili, poiché il problema inverso risolto non presenta soluzione unica in quanto sottodeterminato. Soltanto l'utilizzo del modello diretto e del collegato inverso per la gestione dell'acquifero potrà migliorare la qualità delle previsioni del modello. Peraltro i diversi campi di trasmissività identificati con le prove selezionate presentano caratteristiche qualitative simili.

La caratterizzazione dell'acquifero ha permesso di giungere ad alcune conclusioni rilevanti che non erano state messe in luce dagli studi modellistici precedenti, e cioè:

- a) il flusso avviene principalmente nei sedimenti più superficiali, in quello che è stato descritto come acquifero freatico equivalente, con uno spessore che si aggira sui 30-50 metri;
- b) l'alimentazione è prevalentemente costituita da portate artificiali, prelevate dai fiumi al contorno e utilizzate per una pratica irrigua massiccia che fornisce una grande ricarica all'acquifero freatico. Tale ricarica è risultata preponderante rispetto alla ricarica naturale da infiltrazione per pioggia e al flusso entrante dal lato nord dell'acquifero. Come risultato più evidente la piezometria media nella zona centrale si trova oltre una decina di metri sopra le condizioni al contorno dell'acquifero costituite dai livelli idrometrici dei fiumi e questo fatto mantiene attiva la cintura dei fontanili e le canalette dei terrazzi alluvionali;
- c) localmente l'acquifero è bistrato anche se le portate di transito del semi-confinato sono molto più basse di quelle del freatico, circa 1/10. Tuttavia lo studio dell'acquifero semi-confinato assume importanza per i prelievi di acqua ad uso potabile poiché di qualità superiore alle acque del freatico a diretto contatto con una massiccia pratica irrigua e quindi di qualità inferiore;
- d) la caratterizzazione dell'acquifero ha permesso una sua suddivisione in zone con valori di trasmissività pressoché omogenei. Il successivo Paragrafo 6.3.1 riporta una descrizione di queste zone.

6.3.1 Descrizione delle zone

Le zone individuate sono state delimitate nella Tavola 18 e sono elencate di seguito; come si nota la denominazione delle diverse zone richiama i principali fiumi dell'area e ne individua così la posizione geografica almeno in modo qualitativo.

<i>Codice</i>	<i>Nome</i>	<i>Area (km²)</i>	<i>LogT (m²/s)</i>	
			<i>Media</i>	<i>Deviazione standard</i>
Aa	Adda	293	-0.56	0.11
Ab	Adda bordo	34	-0.88	0.11
Cc	Centrale canalizzata	210	-1.31	0.15
Cs	Centrale	349	-0.96	0.14
Ob	Oglio bordo	41	-1.34	0.18
On	Oglio nord	92	-0.62	0.13
Os	Oglio sud	231	-1.00	0.15
Po	Po	684	-0.45	0.12
Se	Serio est	116	-1.11	0.19
Sn	Serio nord	127	-0.63	0.08
Sw	Serio ovest	134	-0.81	0.08

Tabella 35. Zonazione dell'acquifero.

Per ogni zona riportiamo nel seguito:

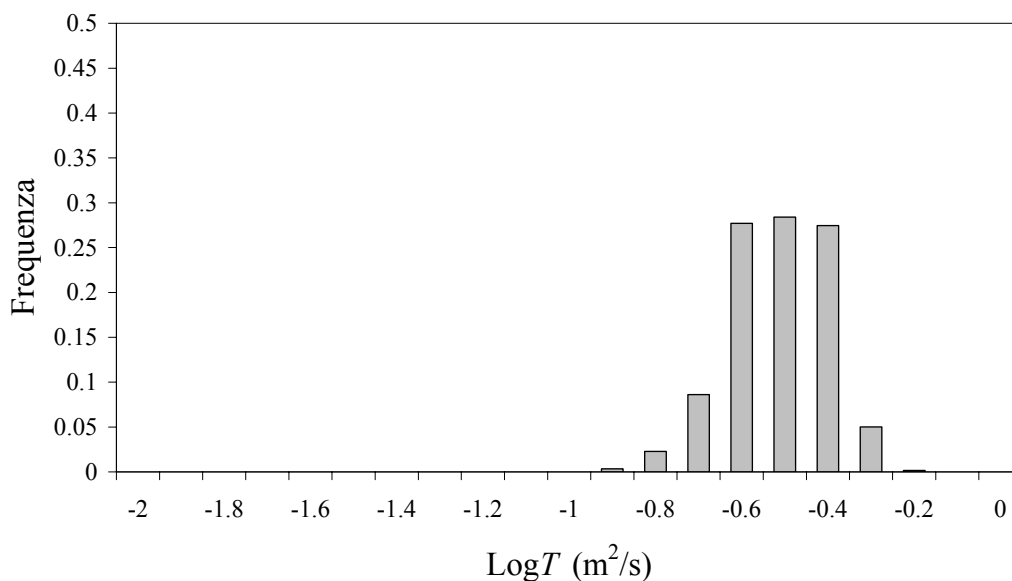
- 1) l'istogramma dei valori di trasmissività;
- 2) il bilancio idrico.

Osserviamo che le due zone Ab e Ob presentano caratteristiche particolari. Infatti si tratta di due aree dove le trasmissività identificate potrebbero essere influenzate dalle condizioni al contorno scelte o dalle incertezze sui termini di sorgente; pertanto si è preferito non assimilare queste aree alle altre, la cui caratterizzazione è più affidabile.

6.3.1.1 Zona Aa

Questa zona ha una ampiezza di quasi 300 km² e si estende lungo il corso del fiume Adda. L'istogramma dei valori di trasmissività identificata mostra una distribuzione approssimativamente lognormale, con valore medio attorno a 0.32 m²/s.

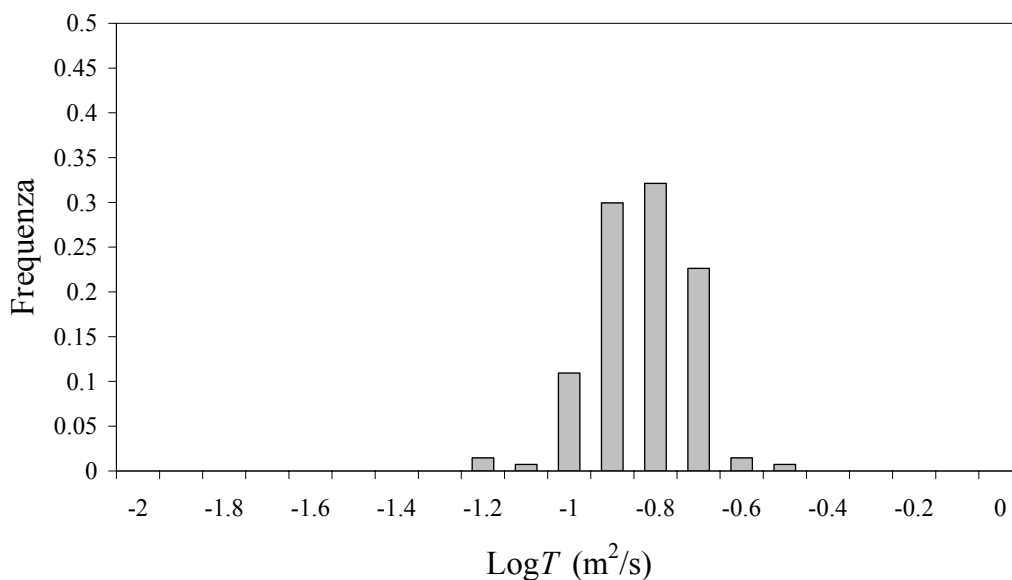
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	10,82	
Drenaggio del fiume Serio		0.17
Drenaggio dei fontanili		2.13
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.23
Prelievi per usi industriali e agricoli		1.91
Prelievi per uso acquedottistico		0.35
Portata attraverso il bordo settentrionale del modello	3.60	
Portata attraverso il bordo del modello lungo il fiume Adda		16.49
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Ab		3.15
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Cs	3.73	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Se	0.75	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Sn	2.21	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Sw	3.40	



6.3.1.2 Zona Ab

Questa zona si estende per circa 34 km² lungo il corso del fiume Adda nella porzione settentrionale del dominio. Questa zona è in parte compresa nella provincia di Lodi e per essa vi sono maggiori incertezze sulle stime dei prelievi e di altri termini di sorgente. Pertanto si ritiene che i risultati siano meno affidabili. L'istogramma di $\text{Log}T$ mostra un andamento non perfettamente simmetrico, con oltre il 90% dei valori di T compresi tra 0.1 e 0.2 m²/s.

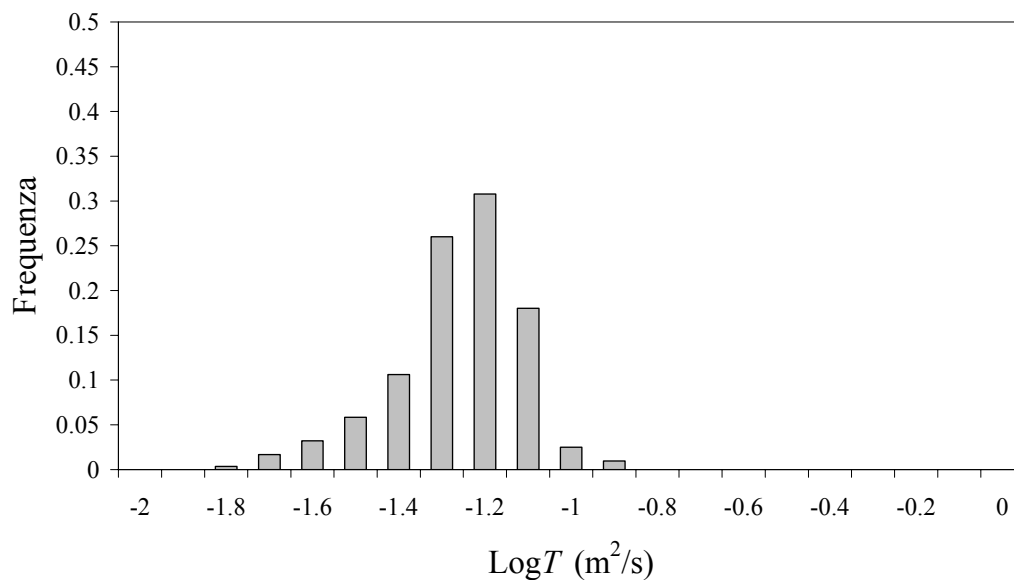
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	0,81	
Drenaggio dei fontanili		0.00
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.00
Prelievi per usi industriali e agricoli		0.45
Prelievi per uso acquedottistico		0.03
Portata attraverso il bordo del modello lungo il fiume Adda		3.47
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Aa	3.15	



6.3.1.3 Zona Cc

Questa zona di circa 210 km² si trova nella porzione centrale del dominio in corrispondenza del fascio dei principali canali di distribuzione irrigua. La distribuzione di $\text{Log}T$ non è simmetrica ed ha una coda verso valori bassi, con una moda attorno a 0.06 m²/s.

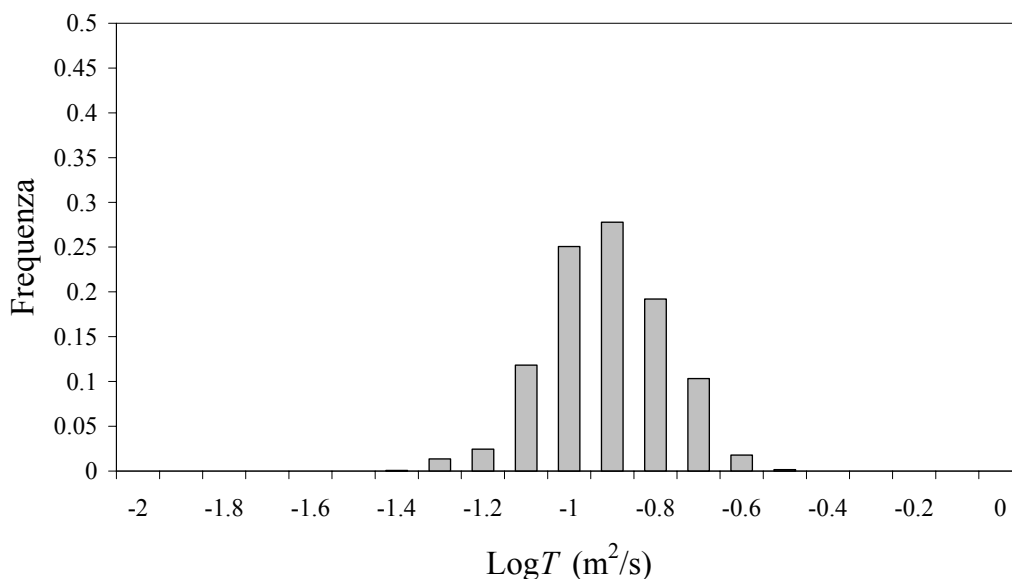
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	8,65	
Drenaggio dei fontanili		0.03
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.72
Prelievi per usi industriali e agricoli		0.94
Prelievi per uso acquedottistico		0.30
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Cs		5.10
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona On	0.27	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Os		2.08
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Se	0.22	



6.3.1.4 Zona Cs

Questa zona di circa 350 km² si trova nella porzione centrale del dominio a sud-ovest della precedente zona Cc. La trasmissività identificata segue approssimativamente una distribuzione lognormale, con media attorno a 0.12 m²/s.

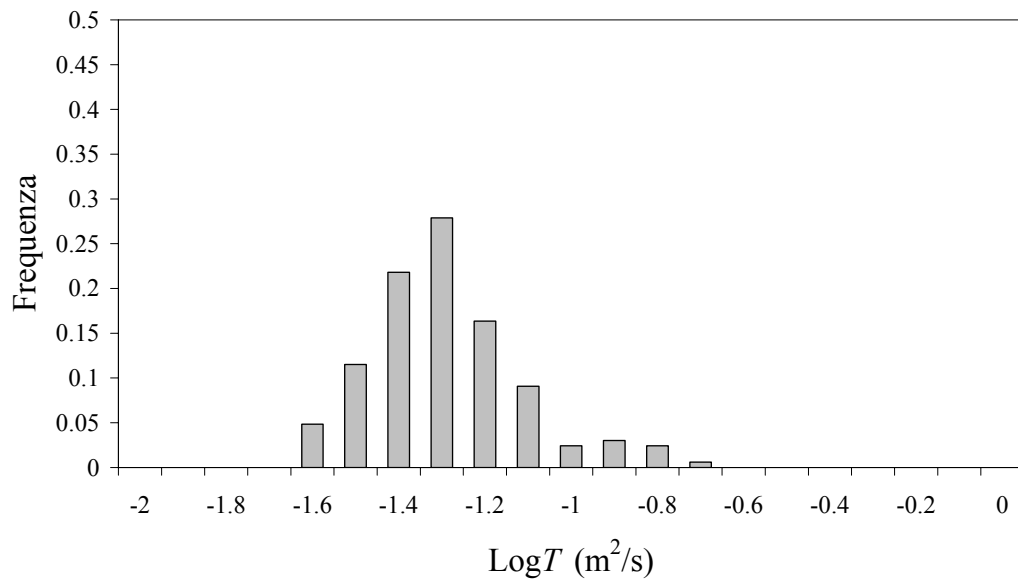
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	9,64	
Drenaggio dei fontanili		0.00
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.61
Prelievi per usi industriali e agricoli		1.30
Prelievi per uso acquedottistico		0.68
Portata attraverso il bordo del modello lungo il fiume Adda		0.30
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Aa		3.73
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Cc	5.10	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Os		0.36
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Po		8.10
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Se	0.35	



6.3.1.5 Zona Ob

Questa zona si estende per circa 41 km² lungo il corso del fiume Oglio, in una zona dove i valori di trasmissività possono essere influenzati dalle condizioni al contorno fissate per il modello in avanti.

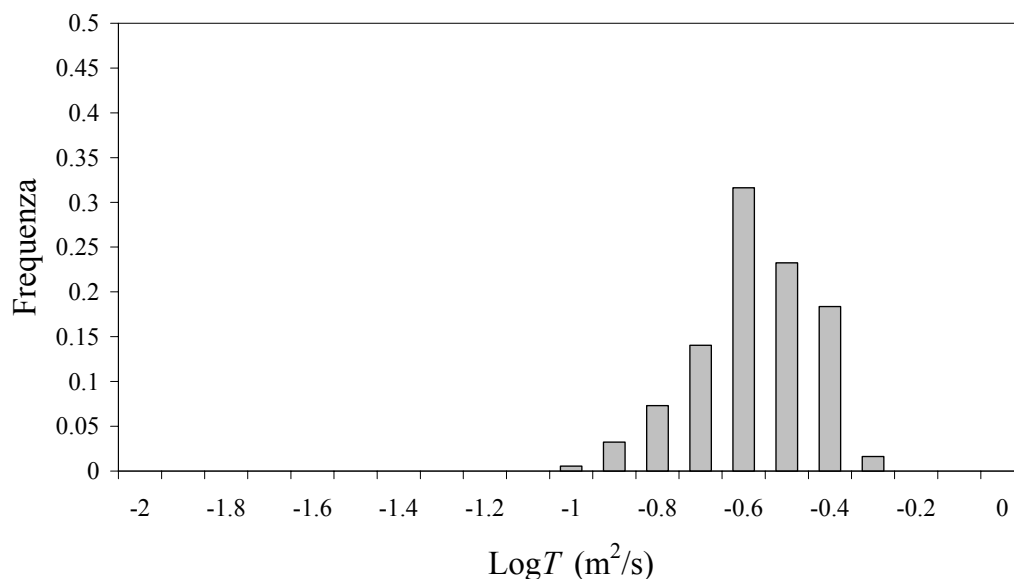
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	0,99	
Drenaggio dei fontanili		0.00
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.00
Prelievi per usi industriali e agricoli		0.21
Prelievi per uso acquedottistico		0.05
Portata attraverso il bordo del modello lungo il fiume Oglio		3.78
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Os	3.06	



6.3.1.6 Zona On

Questa zona di circa 90 km² è localizzata lungo la porzione settentrionale del corso del fiume Oglio nell'area modellata. La distribuzione di $\text{Log}T$ non è simmetrica e presenta valori generalmente piuttosto alti, con oltre il 90% dei valori di T superiori a 0.25 m²/s.

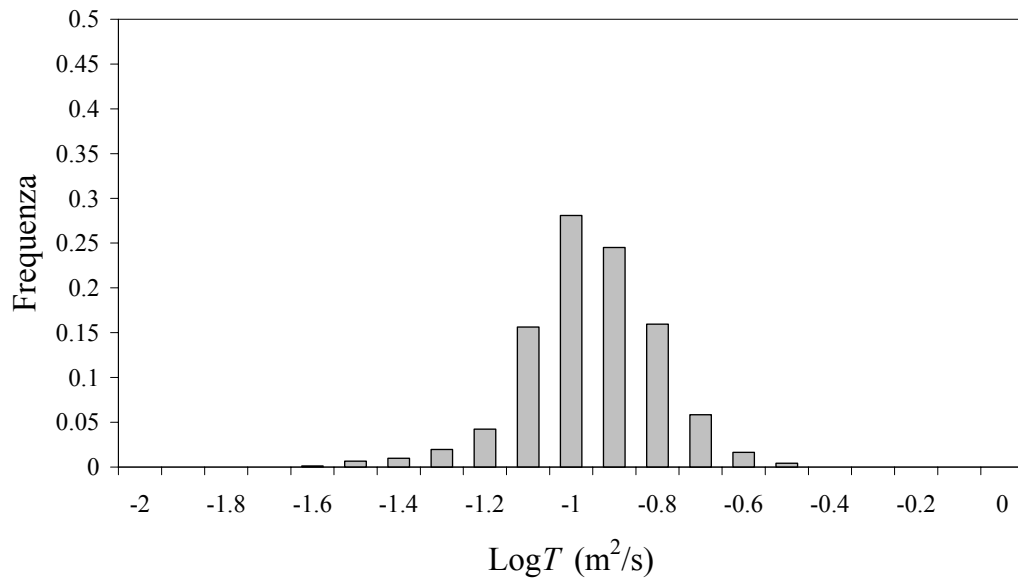
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	3,14	
Drenaggio dei fontanili		1.65
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.11
Prelievi per usi industriali e agricoli		0.16
Prelievi per uso acquedottistico		0.09
Portata attraverso il bordo settentrionale del modello	2.26	
Portata attraverso il bordo del modello lungo il fiume Oglio		2.39
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Cc		0.27
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Os		5.43
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Se	0.64	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Sn	4.06	



6.3.1.7 Zona Os

Questa zona si estende per circa 230 km² lungo la porzione meridionale del corso del fiume Oglio, fino alla confluenza nel Po. La distribuzione dei valori di T è approssimativamente lognormale con una media corrispondente a un valore di T pari a 0.1 m²/s.

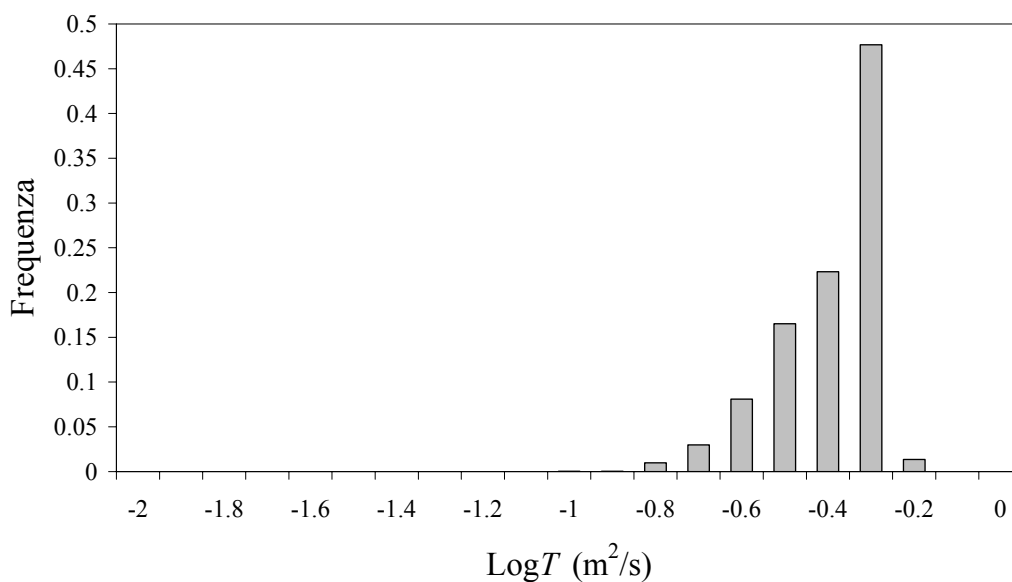
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	10,45	
Drenaggio dei fontanili		0.61
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.14
Prelievi per usi industriali e agricoli		1.09
Prelievi per uso acquedottistico		0.26
Portata attraverso il bordo del modello lungo il fiume Oglio		12.56
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Cc	2.08	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Cs	0.36	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Ob		3.06
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona On	5.43	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Po		0.63



6.3.1.8 Zona Po

Questa zona di oltre 680 km² comprende tutta la porzione meridionale dell'area modellata, includendo la città di Cremona e il territorio delimitato dagli ampi meandri e anse del Po tra Cremona stessa e Sabbioneta. Le trasmissività identificate risultano molto elevate, per giustificare i bassi gradienti presenti in questa zona.

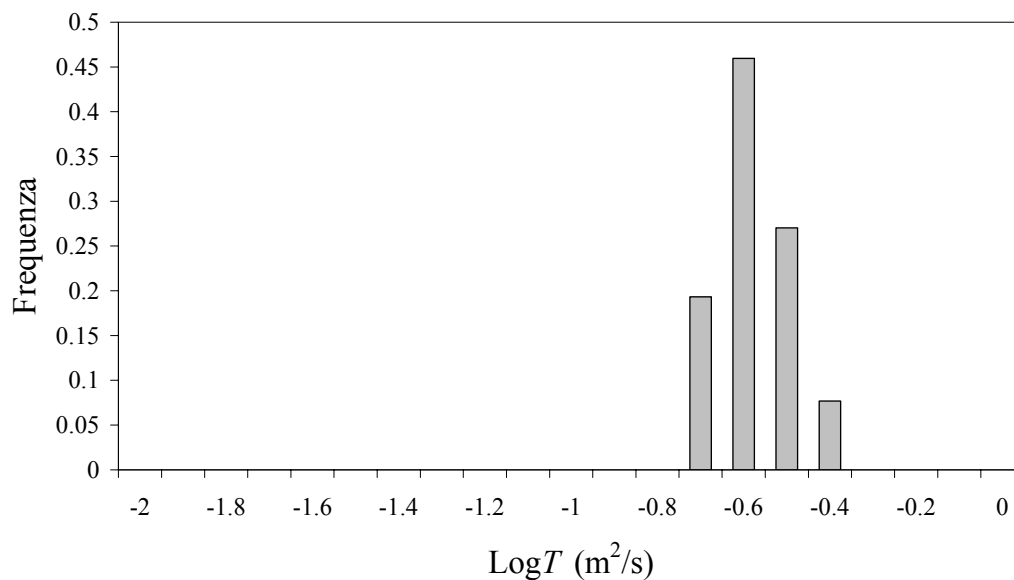
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	9,20	
Drenaggio dei fontanili		0.00
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.71
Prelievi per usi industriali e agricoli		1.81
Prelievi per uso acquedottistico		0.75
Portata attraverso il bordo del modello lungo il fiume Oglio		3.87
Portata attraverso il bordo del modello lungo il fiume Po		10.75
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Cs	8.10	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Os	0.63	



6.3.1.9 Zona Sn

Questa zona corrisponde alla porzione settentrionale del bacino idrografico del fiume Serio all'interno dell'area di studio. Le trasmissività identificate variano in un intervallo molto ristretto, attorno a un valore medio pari a circa $0.25 \text{ m}^2/\text{s}$.

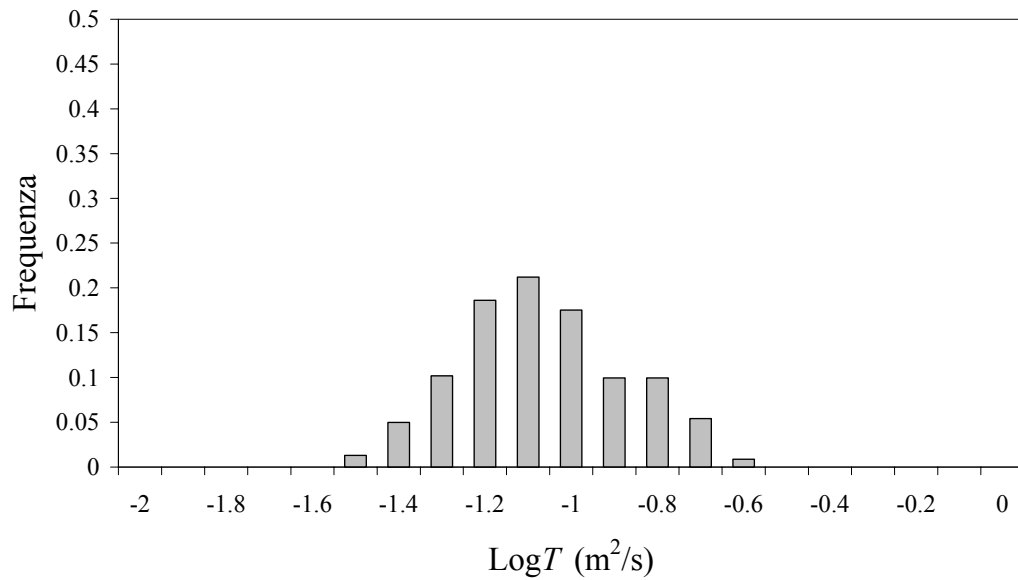
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	3,45	
Drenaggio del fiume Serio		1.08
Drenaggio dei fontanili		1.97
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.52
Prelievi per usi industriali e agricoli		1.75
Prelievi per uso acquedottistico		0.10
Portata attraverso il bordo settentrionale del modello	15.49	
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Aa		2.21
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona On		4.06
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Sw		7.28



6.3.1.10 Zona Se

Questa zona corrisponde alla sponda destra del bacino idrografico del Serio e mostra una distribuzione approssimativamente lognormale della trasmissività identificata con un valore medio attorno a $0.08 \text{ m}^2/\text{s}$.

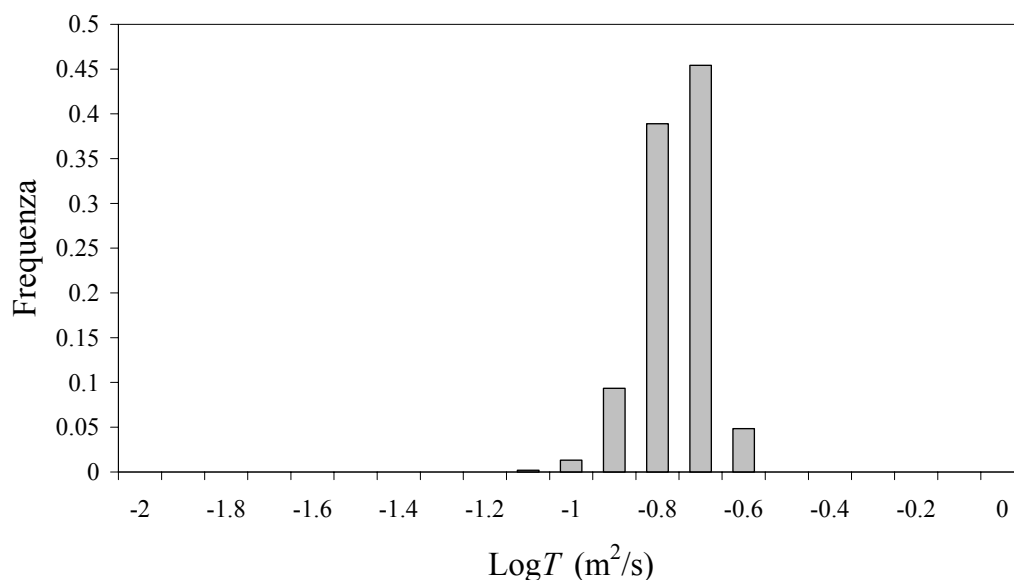
<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	3,34	
Drenaggio del fiume Serio		0.80
Drenaggio dei fontanili		1.68
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.37
Prelievi per usi industriali e agricoli		0.53
Prelievi per uso acquedottistico		0.27
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Aa		0.75
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Cc		0.22
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Cs		0.35
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona On		0.64
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Sw	2.28	



6.3.1.11 Zona Sw

Questa zona corrisponde alla sponda sinistra del bacino idrografico del Serio e mostra variazioni di trasmissività molto contenute attorno a un valore medio di circa 0.18 m²/s.

<i>Termine del bilancio</i>	<i>Portate (m³/s)</i>	
	<i>Entrata</i>	<i>Uscita</i>
Ricarica per infiltrazione delle acque piovane e irrigue e perdite dei canali	3,98	
Drenaggio del fiume Serio		1.16
Drenaggio dei fontanili		2.70
Drenaggio dei terrazzi geomorfologici		0.36
Prelievi per usi industriali e agricoli		1.00
Prelievi per uso acquedottistico		0.37
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Aa		3.40
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Se		2.28
Portata attraverso il bordo di separazione con la zona Sn	7.28	



6.3.2 Caratterizzazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee

Il PTUA prevede una suddivisione del sistema acquifero basata puramente su un criterio geografico-amministrativo, cioè raggruppando alcuni comuni in settori che non hanno un legame con le caratteristiche geomorfologiche, geologiche e ideologiche del territorio. Nel nostro lavoro la suddivisione in aree è stata basata sulla carta delle trasmissività identificate per M²ME-CR ed ha una buona corrispondenza anche con il reticolo idrografico principale e con gli elementi geomorfologici. Nel PTUA per ciascun settore viene proposta una caratterizzazione dello stato quantitativo basata sul rapporto tra i prelievi e la ricarica. Questo criterio punta a evidenziare i settori in cui il prelievo di acque sotterranee è molto intenso.

Anche in questo lavoro sono stati calcolati degli indici di sfruttamento delle zone delineate in 6.3.1 analoghi a quello ricordato. Si è però voluto tenere conto che nell'area esaminata i prelievi di acque sotterranee avvengono sia attraverso i pozzi per acqua, sia attraverso i fontanili. Per questo sono stati calcolati i rapporti prelievo/ricarica tenendo conto o solo del

prelievo attraverso pozzi per acqua o della somma dei prelievi effettuati attraverso i pozzi e i fontanili.

I risultati sono riportati in Tabella 36 e mostrano che le zone più sfruttate sono: Ab, Sn e Sw, se si considerano solo i prelievi da pozzo; Sn, Sw, Se, Ab e On, se si considerano sia i prelievi da pozzo che dai fontanili. Ricordiamo che questi indici devono essere considerati con attenzione perché possono essere influenzati dalle incertezze sulle stime dei singoli termini che compongono il bilancio idrico.

<i>Codici</i>	<i>Prelievi da pozzo/Ricarica</i>		<i>(Prelievi da pozzo + fontanili)/Ricarica</i>	
	<i>Rapporto</i>	<i>Graduatoria</i>	<i>Rapporto</i>	<i>Graduatoria</i>
Aa	0.21	7	0.41	6
Ab	0.60	1	0.60	5
Cc	0.14	9	0.15	11
Cs	0.20	8	0.20	9
Ob	0.26	5	0.26	8
On	0.08	11	0.60	4
Os	0.13	10	0.19	10
Po	0.28	4	0.28	7
Se	0.24	6	0.74	3
Sn	0.53	2	1.10	1
Sw	0.34	3	1.02	2

Tabella 36. Indici di sfruttamento delle zone

Le indicazioni della Tabella 36 sono molto importanti per diverse ragioni.

La definizione di una politica di sfruttamento delle risorse idriche deve considerare la complessità dei processi che caratterizzano la Provincia di Cremona e il suo sistema agricolo. Il miglioramento delle tecniche di irrigazione può migliorare l'efficienza del sistema, riducendo così - da un lato - la richiesta di acqua da parte del comparto agricolo, ma anche - dall'altro lato - la ricarica all'acquifero. Inoltre occorre ricordare che i pozzi utilizzati per uso irriguo sono in generale direttamente collegati ai canali di irrigazione che permettono l'irrigazione dei fondi agricoli nelle prossimità del pozzo stesso; la porzione dell'acqua dispersa sui terreni che percola nel sottosuolo rialimenta la falda nelle vicinanze del pozzo stesso. Invece l'acqua raccolta attraverso i fontanili può essere usata in alcuni casi con una strategia analoga a quella appena descritta, mentre in altri casi viene convogliata nelle rogge fontanilizie e immessa nella rete irrigua per essere utilizzata anche a grande distanza dalla sorgente. Quest'ultimo processo si verifica anche per le derivazioni superficiali, che vengono utilizzate normalmente a grande distanza dai punti di prelievo. Il fabbisogno irriguo può quindi essere soddisfatto con almeno tre fonti: derivazioni dai fiumi, prelievi da falda attraverso i fontanili e prelievi da falda attraverso i pozzi per acqua. Queste osservazioni aiutano a comprendere l'importanza dei risultati di Tabella 36 e l'attenzione che si deve porre nella quantificazione dei diversi termini che intervengono nel calcolo di questi indici di sfruttamento.

La definizione di una politica di sfruttamento del sistema acquifero deve tenere conto di questi risultati e in particolare del fatto che i fontanili non sono solo una importante risorsa per il comparto agricolo, ma costituiscono anche risorse ambientali pregiate, per le loro peculiarità geomorfologiche e biologiche.

7 Prospettive

In questo Capitolo vengono fornite alcune indicazioni per i possibili futuri sviluppi del lavoro.

7.1 Progettazione di una rete di monitoraggio

La rete di stazioni di misura per la raccolta di dati osservativi piezometrici, idrometrici e pluviometrici, rappresentata in Tavola 19 è stata progettata con lo scopo di raccogliere dati osservativi sistematici nello spazio e nel tempo sull'acquifero alla scala delle strutture a trasmissività equivalente omogenea (5-7 km) identificate con la calibrazione del modello.

Viene quindi proposta una rete di capisaldi piezometrici, idrometrici e pluviometrici a maglie larghe ed irregolari, adattata alle strutture idrogeologiche identificate, che tuttavia serve anche come base su cui riagganciare, interpolare e validare eventuali rilievi piezometrici o idrometrici a scala di dettaglio già eseguiti o di futura realizzazione per studi locali (su aree dell'ordine di 1-10 km²). La rete infatti è stata progettata per uno studio regionale dell'acquifero cremonese, ma è anche adatta come riferimento per integrare eventuali studi per problemi che interessano aree ristrette dell'acquifero, come la caratterizzazione tridimensionale di un sito contaminato, i rapporti falda-fiume, i rapporti tra portata idrica di un fontanile e portata di un pozzo di presa agricolo operante nelle sue vicinanze, o ancora tra portata di un fontanile e tipo di coltura e quindi volumi degli adacquamenti nella zona di competenza del fontanile stesso.

Le misure piezometriche ed idrometriche dovranno essere eseguite in modo automatico, mediante sensori permanenti che raccolgono e memorizzano il dato. Nella fase iniziale, al fine di valutare la scelta della posizione specifica del punto di misura, si può prevedere una frequenza di campionamento oraria. Questo permetterà di evidenziare eventuali disturbi, ad esempio dovuti al funzionamento di pozzi nelle vicinanze.

I dati raccolti da questa rete di stazioni di misura dovranno essere raccolti da un unico Ente gestore che dovrà validarli, interpretarli e metterli a disposizione degli altri operatori pubblici e privati interessati alla gestione della risorsa o a problematiche ingegneristiche o ambientali collegate.

I dati osservativi raccolti saranno essenzialmente di cinque tipi, e cioè: 1) dati piezometrici negli acquiferi freatico e semi-confinato; 2) dati idrometrici di misura di livello sui fiumi e canali artificiali; 3) misura della portata di canali e fiumi; 4) dati meteorologici completi; 5) dati agricoli.

Nella Tavola 19 sono state ubicate le posizioni dei piezometri da perforare ed equipaggiare per la misura automatica del livello freatico. Nella zona Cc, dove il sistema acquifero è sicuramente multistrato, sono stati posizionati cinque piezometri multilivello con almeno tre sensori di rilevazione di pressione a tre diverse profondità per valutare la componente verticale del gradiente idraulico.

I piezometri dovranno essere ubicati nell'acquifero freatico con degli *arrays* in ogni zona a trasmissività equivalente omogenea distribuiti sui vertici e talvolta anche a metà dei lati di triangoli equilateri, in modo da poter valutare il gradiente idraulico nello stesso punto dell'acquifero anche a due scale spaziali diverse. La posizioni delle stazioni di misura potranno essere anche variate se nel raggio di 500-1000 m già esistono pozzi utilizzabili o idrometri da rimettere in funzione. Sono stati posizionati una ottantina di piezometri per la misura dell'altezza freatica, cinque piezometri multilivello con almeno tre sensori a profondità diverse, di cui uno nel freatico, nella parte centrale dell'acquifero per valutare la componente verticale del gradiente idraulico.

Sul fiume Adda sono posizionati quattro idrometri già esistenti di cui si dovrà garantire il pieno funzionamento. Sul fiume Serio sono posizionati due idrometri, sul fiume Oglio sono posizionati quattro idrometri di cui uno di nuova installazione. Sul Po quattro idrometri di cui uno di nuova installazione nella parte sud del corso del fiume.

Nel territorio provinciale ricadono tre delle stazioni agro-meteorologiche utilizzate nello studio (Capralba, Rivolta d'Adda e Persico Dosimo); esse costituiscono una buona base di rilevamento, che può essere integrata con un'ulteriore stazione posta nella zona meridionale del territorio.

7.2 Proposte per indagini su campo

7.2.1 Fontanili

Anche in assenza di un completo monitoraggio delle portate dei fontanili, il modello sviluppato fornisce indicazioni su quali fontanili dovrebbero essere mediamente attivi nel corso dell'anno. Una indagine su campo con l'obiettivo di verificare la corrispondenza tra queste indicazioni e la realtà sarebbe quindi molto utile per validare i risultati del modello o per procedere a modifiche o miglioramenti, al fine di riprodurre meglio le osservazioni reali.

7.2.2 Terrazzi geomorfologici

I modelli realizzati forniscono una stima di quali terrazzi morfologici dovrebbero essere attivi e in grado di fornire una portata media annua significativa. Si può pertanto organizzare una indagine su campo al fine di verificare queste previsioni del modello ed eventualmente procedere ad un affinamento del modello.

7.2.3 Rapporti tra irrigazione e ricarica della falda

La realizzazione della rete di monitoraggio delineata nel Paragrafo 7.1 facilita la realizzazione attività di monitoraggio a scala di maggior dettaglio. Di particolare interesse è la raccolta di dati osservativi sulle portate circolanti nelle reti irrigue e su quelle effettivamente erogate su campo, che può essere realizzata all'interno di uno o più degli *array* di piezometri di cui si compone la rete di monitoraggio. In queste aree, di superficie dell'ordine di 10 km², è opportuno prevedere l'installazione di una stazione meteorologica in posizione il più possibile baricentrica, unitamente al monitoraggio in continuo di livello e portata dei canali irrigui di alimentazione, nonché al controllo delle portate erogate su campo in aziende campione. I dati raccolti in questo modo sono utili per la verifica del modello idrologico del suolo e del sistema irriguo e consentono di verificarne le prestazioni ed eventualmente migliorarne la parametrizzazione.

7.2.4 Datazioni

È opportuno prevedere una estesa campagna di prelievi di campioni d'acqua da diverse profondità al fine di eseguire datazioni radiometriche, basate sia sull'attività degli isotopi radioattivi (C¹⁴ e H³), sia sull'analisi dei rapporti di massa tra isotopi stabili.

8 Bibliografia

Relazioni precedenti

Relazione finale della fase preliminare (luglio 2004), Studio delle acque di superficie e di falda nella Provincia di Cremona – Stato delle conoscenze.

Relazione iniziale della I fase (febbraio 2005), Realizzazione di un modello preliminare del flusso idrico nel sistema acquifero della Provincia di Cremona – Relazione illustrativa della definizione dei confini dell'area di studio.

Relazione intermedia della I fase (settembre 2005). Realizzazione di un modello preliminare del flusso idrico nel sistema acquifero della Provincia di Cremona.

Relazione finale della I fase (febbraio 2006), Realizzazione di un modello preliminare del flusso idrico nel sistema acquifero della provincia di Cremona.

Relazione preliminare della II fase (aprile 2006), Relazione illustrativa della definizione delle scale spaziale e temporale del modello di simulazione.

Relazione intermedia della II fase (novembre 2006).

Altre pubblicazioni

Associazione Irrigazione Est Sesia (1979). *Le acque sotterranee della pianura irrigua Novarese-Lomellina. Studi e ricerche per la realizzazione di un modello gestionale*, Rapporto tecnico.

Autorità di Bacino del Fiume Po (2003). *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica*, Rapporto tecnico.

Autorità di Bacino del Fiume Po, Attività di studio e di ricerca a supporto della redazione del Piano di Bacino, Sottoprogetto S.P. 4.1 (1998) *Uso del suolo e agricoltura, ATT. 4.16: Uso irriguo delle acque, Consorzi di Bonifica ed Irrigui, censimento delle derivazioni e delle reti sottese, quantificazione dei prelievi su scala comprensoriale*.

Baldoni R., Giardini L. (a cura di) (1982) *Coltivazioni erbacee*, Patron Ed., Bologna.

Baratelli F. (2006) *Identificazione dei parametri di un acquifero sintetico col metodo del modello del confronto*, Elaborato Finale, Laurea triennale in Fisica, Università degli Studi di Milano.

Bear J. (1979) *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, New York.

Beatrizotti G., Hansen J.W., Spocci R. (1983) Optimierung der benötigten daten für ein numerisches Modell der Grundwasserbewirtschaftung im Lockergestein. *Gas Wasser Abwasser*, 63, 469-476.

- Benoit N., Pasquier P., Marcotte D., Nastev M. (2005). Conditional stochastic inverse modelling of the Châteauguay river aquifers, in *ModelCARE 2005, Pre-published proceedings*, 515-521.
- Beretta G.P., Francani V., Fumagalli L. (1992). *Studio Idrogeologico della Provincia di Cremona*, Pitagora Editrice Bologna.
- Braden H. (1985) Ein Energiehaushalts und Verdunstungsmodell for Wasswr und Stoffhaushaltsunter-suchungen landwirtschaftlich genutzer Einzugsgebiete. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 42, pp. 294-299.
- Bruni E., Medigliani M. (2006) *Dinamiche idrologiche ed idrogeologiche del bacino idrografico dell'Adda, tra Gera d'Adda ed il fiume Serio. Analisi dei fenomeni, dell'attuale gestione delle acque territoriali, dei dati e dei presidi di monitoraggio esistenti. Prime verifiche in aree campione. Proposta di indicatori territoriali significativi*. Tesi di: Master universitario interfacoltà di II° livello in gestione delle risorse fisiche Ingegneria del suolo e delle acque. Facoltà di Architettura e Società Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale. In collaborazione con il CIC, relatore Dott.Ing. Stefano Loffi.
- Borgarello M., Catenacci G., Cavicchioli C., Parini S. (1993) *Indagini sulla deposizione secca*, Rapporto CISE-SAA-93-042, CISE, Milano.
- Brooks R.H. and Corey A.T. (1964) *Hydraulic properties of porous media*, Hydrology paper no.3, Colorado State University, Fort Collins.
- CAI, Catasto delle Acque Irrigue della Provincia di Cremona, a cura di B.Loffi (1986) Cremona.
- Calzolari C., Ungaro F., Busono E., Sanchiz P.S. (2000) *Dinamica degli orizzonti superficiali e stima della conducibilità satura*. C.N.R. IGES, Rapporto n. 8.1.
- Carle, S. F. (1999) *T-PROGS: Transition Probability Geostatistical Software version 2.1*, University of California, Davis.
- Campbell G.S., Donatelli M. (1998) *A simple model to estimate global solar radiation*. Proc. 5th Congress of the European Society for Agronomy, Nitra, Slovakia, II, pp. 133-134.
- Carrera J. (1988). State of art of the inverse problem applied to the flow and solute transport equations, in *Groundwater flow and quality modeling*, (a cura di E. Custodio *et al.*), Reidel, Dordrecht, 549-583.
- Carrera J., Alcolea A., Medina A., Hidalgo J., Slooten L.J. (2005). Inverse problems in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 13, 206-222.

- Carsel R.F., Parrish R.S. (1988) Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755-769.
- Cavagna di Gualdana (1952). *Risorgenze ed emungimenti del Fiume Ticino*. Relazione al IV congresso regionale dell'Associazione Idrotecnica Italiana, Milano.
- CIGR, Handbook of Agricultural Engineering – Volume I. *Land and water Engineering*, ASAE, 1999.
- D'Auria, G., Zavagno, F. (2005). *Censimento dei fontanili della Provincia di Cremona*, Provincia di Cremona.
- Deutsch, C. V., Journel, A. J. (1992). *Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, New York.
- DG Risorse idriche e Servizi di pubblica utilità (2001). *Acque sotterranee in Lombardia - gestione sostenibile di una risorsa strategica*, Regione Lombardia.
- Donatelli M., Bellocchi G, Fontana, F. (2003). RadEst 3: a software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. *Agric. For. Meteorol.* 18, 363-367.
- Donatelli M. (1995) *Sistemi nella gestione integrata delle colture - Appunti dalle lezioni*. Pubblicazione speciale dell'Istituto Sperimentale Agronomico, ISA-Sezione di Modena, Modena.
- Facchi A., B. Ortuani, D. Maggi, C. Gandolfi (2004). Coupled SVAT-groundwater model for water resources simulation in irrigated alluvial plains. *Environmental Modelling and Software*, 19, 1053-1063.
- FAO, Irrigation and drainage Paper 56, Allen R., Pereira L. S., Raes D., Smith M. (1998) *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*.
- Fassò C. (1992) *Sistemazione collinare e regimazione del ciclo idrologico*, in Speciale Collina, «Agricoltura», pp. 11-30.
- Fleckenstein, J. H., Niswonger, R. G., Fogg, G. E. (2006). River-Aquifer Interactions, Geologic Heterogeneity, an Low-Flow Management, *Ground Water*, 44, 837-852.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*, Prentice Hall, Inc.
- Gandolfi C., Ortuani B., Facchi A. (2004) *Bilancio e risparmio idrico in agricoltura per rinnovo delle concessioni*, D.G.R. 31 maggio 2002 N. 7/9182, Piano per la ricerca e sviluppo 2002, Scheda di Progetto N. 470.
- Gandolfi C., Facchi A., Ortuani B., Agostani D., Varola L., Rienzner M., Ferrari D. (2006a) *Documento D4: Rapporto sul modello del sistema irriguo*. Progetto TwoLe-B (2005-2007), Fondazione Cariplo.

- Gandolfi C., Facchi A., Ortuani B., Maggi. D. (2004) *Coupling surface and groundwater processes for water resources simulation in irrigated alluvial basins*, atti di iEMSs 2004: The International Environmental Modelling and Software Society Conference, Osnabrück (Germany), vol. II, pp. 1069-1074.
- Gandolfi C., Rienzner M., Ortuani B. (2006b) *Documento D5: Rapporto sul modello falda-fontanili*. Progetto TwoLe-B (2005-2007), Fondazione Cariplo.
- Gandolfi C., Sali G., Facchi A., Ortuani B., Bulgheroni C., Rienzner M., Tediosi A., Casati D., Ferrari D. (2007) *Governo dell'acqua in Lombardia verso gli standard europei: definizione e validazione tecnico scientifica delle azioni prioritarie previste dal Piano di Bacino Idrografico*. Progetto IReR 2006B040.
- Ginn T.R., Cushman J.H. (1990). Inverse methods for subsurface flow: a critical review of stochastic techniques. *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, 4, 1-26.
- Giudici M. (2001). Development, calibration and validation of physical models, in *Geographic Information Systems & Environmental Modeling* (a cura di K. C. Clarke, B. O. Parks e M. C. Krane), 100-121, Prentice-Hall, Upper Saddle River (NJ).
- Giudici M., Miceli A., Bersezio R., Felletti F., Zembo I. (2003). Valutazione del bilancio idrologico nell'Alta Val d'Agri e impostazione di un modello matematico di flusso delle acque sotterranee, in *Le risorse idriche sotterranee della Alta Val d'Agri* (a cura di A. Colella), 367-383, Collana Editoriale di Studi e Ricerche dell'Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata, n. 3, Potenza.
- Giudici M., Vassena C. (2007). Spectral analysis of the balance equation of ground water hydrology. *Transp. Porous Media*, DOI:10.1007/s11242-007-9142-3.
- Giunta della Regione Lombardia (2006). D.G.R. 29 marzo 2006, n. 8/2244. Approvazione del programma di tutela e uso delle acque, ai sensi dell'articolo 44 del d.lgs. 152/99 e dell'articolo 55 della l.r. 26/2003. *B.U. Regione Lombardia*, 2° supplemento straordinario al n. 15, 13 aprile 2006.
- Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. (2000). *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-water model - User Guide to Modularization concepts and the Ground-water Flow Process*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-92.
- Hill M.C. (1990). *Preconditioned conjugate-gradient 2 (PCG2). A computer program for solving ground-water flow equations*. US Geological Survey, Denver, Colorado.
- Huygen J.C., van Dam J.C., Kroes J.G., Wesseling J.G. (1997) *SWAP 2.0: input and output manual*, Technical document, WAU and DLO-Staring Centrum, Wageningen.

- ISTAT, V° Censimento Agricoltura (2003) – www.istat.it.
- Jeffrey D.W. (1970) A note on the use of ignition loss as a means for the approximate estimation of soil bulk density. In *Journal of Ecology*, n° 58, pp. 297-299.
- Lozej A., Ficini I., Radaelli A., Silvestri D. (1998). *Studio sull'andamento delle unità acquifere della provincia di Cremona mediante l'utilizzo di dati geoelettrici*. Relazione Tecnica, Università degli Studi di Milano.
- Maione U., Paoletti A., Ghezzi G. (1991). *Studio di gestione delle acque di superficie e di falda nel territorio compreso tra i fiumi Adda e Oglio e delimitato dalle Prealpi e dalla linea settentrionale di affioramento dei fontanili*. Relazione di sintesi, Consorzio di bonifica della media pianura bergamasca.
- McDonald M.G., Harbaugh A.W. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, chapter A1.
- Pasquier P., Marcotte D. (2006). Steady- and transient-state inversion in hydrogeology by successive flux estimation. *Adv Wat Res* 29, 1934–52.
- Pasquier P. (2005). *Résolution du problème inverse en hydrogéologie par une estimation successive des flux*. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal.
- Pasquier P., Marcotte D. (2004). Solving the groundwater inverse problem by successive flux estimation, in *Proceedings of the fifth GeoEnv conference*.
- Ponzini G., Crosta G. (1988). The comparison model method: a new arithmetic approach to the discrete inverse problem of groundwater hydrology, 1, One-dimensional flow. *Transp. Porous Media*, 3, 415-436.
- Ponzini G., Crosta G., Giudici M. (1989). Identification of thermal conductivities by temperature gradient profiles: one-dimensional steady state flow. *Geophysics*, 54, 643-653.
- Ponzini G., Giudici M., Vassena C. (2007). Comments on “Steady- and transient-state inversion in hydrogeology by successive flux estimation” by P. Pasquier and D. Marcotte, *Adv. Water Res.*, doi:10.1016/j.advwatres.2007.03.002.
- Ponzini G., Lozej A. (1982). Identification of aquifer transmissivities: the comparison model method. *Water Resour. Res.*, 18, 597-622.
- Ramesh S.V.T., Chandramouli V. (2005) Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. In *Journal of Hydrology* 312, pp. 191-206.
- Regione Lombardia (2004). *Programma di Tutela e Uso delle Acque*.

- Regione Lombardia, ENI Divisione AGIP (2002) *Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia* (a cura di C. Carcano & A. Piccin), S.EL:CA., Firenze.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L. (1982) Estimation of soil water retention from soil properties. In *ASCE Journal of Irrigation and Drainage*, 108(IR2), pp. 166-171.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L. (1983) *A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters*. Proceeding of ASAE Conference on Advances in Infiltration, Chicago, IL, pp. 102-112.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., Miller N. (1983) Green-Ampt infiltration parameters from soils data. In *Journal of the Hydraulics Division*, Proc. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 109, no. 1.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L. (1985) Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. *Watershed management in the Eighties*, ASCE, pp. 293-299.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L. (1989) Estimation of soil retention and hydraulic properties, in *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling*, Morel-Seytoux, Arles (France), Kluwer, Dordrecht (the Netherlands), p275-300, 1989.
- Rienzner M. (2006). *Utilizzo di metodi statistici per il completamento di serie meteorologiche*. Rapporto Interno, Istituto di Idraulica Agraria.
- Sagar B., Yakowitz S., Duckstein L. (1975). A direct method for the identification of the parameters of dynamic nonhomogeneous aquifers. *Water Resour. Res.*, 11, 563-570.
- Scarascia S., Ponzini G. (1972). An approximate solution for the inverse problem in hydraulics. *L'Energia Elettrica*, 49, 518-531.
- Stockle C. O., Nelson R. L. (1986) *Cropsyst User's manual (Version 2.0)*. Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA, USA.
- Ungaro F., Calzolari C. (2000) *Integration of GIS derived soil information with geostatistical estimation of pedotransfer functions inputs for soil modelling applications*. In Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Amsterdam, 12-14 July 2000, 663-670.
- USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service) (1972) *National Engineering Handbook*, Part 630 Hydrology, Section 4, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service) (1986) *Hydrology for Small Watersheds*, Technical Release No. 55, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

- Valota G., Giudici M., Parravicini G., Ponzini G., Romano E. (2002). Is the forward problem of ground water hydrology always well posed?. *Ground Water*, 40, 500-508
- Van Genuchten, M. T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 44, pp. 892-898.
- Von Hoyningen-Hune J. (1983) *Die Interception des Niederschlags in landwirtschaftlichen Beständen*. Schriftenreihe des DVWK 57, pp. 1-53.
- Wei – T.C. – McGuinness – J.L. (1973) *Reciprocal distance squared method, a computer technique for estimating area precipitation*. Technical Report ARS-Nc-8. US Agricultural Research Services, North Central Region, Ohio.
- World Commission on Environment and Development (1987). *Our common future*, United Nations.
- Yeh W.-G. W. (1986). Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem. *Water Resour. Res.*, 22, 95-108.

9 Appendici

9.1 Modulo di bilancio idrologico del suolo

Il modello di simulazione prevede la suddivisione del territorio analizzato in unità (celle) sufficientemente omogenee per le caratteristiche pedologiche, di uso del suolo e meteorologiche, nonché per le pratiche irrigue utilizzate. Per ogni cella viene quindi individuato il volume di controllo che si estende dalla superficie del suolo alla profondità esplorata dagli apparati radicali della vegetazione e ad esso si applica il bilancio idrologico. Con riferimento ad una generica cella e suddividendo il relativo volume di controllo in due zone (Figura 116), una superficiale - sede dei processi di scorrimento superficiale, infiltrazione ed evaporazione - ed una sottostante - sede dei processi di traspirazione e percolazione profonda - il bilancio idrologico è rappresentato dalla coppia di equazioni:

$$(9.1.1a) \quad [P - I + Q_i - Q_u - E + Q_g - Q_e]_t = \Delta V_1 / \Delta t$$

$$(9.1.1b) \quad [Q_e - T - Q_s]_t = \Delta V_2 / \Delta t$$

I simboli utilizzati hanno il seguente significato

P = precipitazione

I = aliquota della precipitazione intercettata dalla superficie fogliare della vegetazione ed evaporata

Q_i = flusso superficiale in ingresso

Q_u = flusso superficiale in uscita

Q_e = flusso dallo strato evaporativo a quello traspirativo;

Q_s = flusso di percolazione dallo strato traspirativo;

Q_g = flusso di scambio acque sotterranee-superficiali;

E = evaporazione dagli specchi d'acqua e dallo strato areato del terreno

T = traspirazione dalla vegetazione

ΔV_1 = variazione del volume d'acqua immagazzinato nello strato evaporativo;

ΔV_2 = variazione del volume d'acqua immagazzinato nello strato traspirativo;

Δt = intervallo di tempo.

Se si suppone che il deflusso superficiale Q_u uscente da una cella venga raccolto dalla rete di drenaggio superficiale e non alimenti direttamente un'altra cella, il flusso in ingresso Q_i nella Eq. (9.1.1a) è costituito esclusivamente dall'apporto irriguo. Questa ipotesi è accettabile, date le caratteristiche delle reti di bonifica lombarde, così come lo è, almeno in prima approssimazione, quella di trascurare il termine Q_g , che a scala di cella include essenzialmente i flussi di risalita capillare, il cui contributo può essere significativo solo in zone con falda molto superficiale e terreni a tessitura fine.

Nei paragrafi seguenti sono descritte le procedure per il calcolo dei termini di evaporazione, E , traspirazione, T , dei flussi, Q_u , Q_e e Q_s e dell'intercettazione I .

L'applicazione del modello ad un determinato territorio consente di calcolare l'andamento nel tempo in ognuna delle celle di tutte le grandezze che compaiono nell'equazione di bilancio (9.1.1a, 9.1.1b), e quindi di determinare sia i consumi e gli eventuali deficit idrici delle colture, sia i flussi di ricarica verso la falda, tenendo conto della variabilità spaziale delle condizioni meteorologiche, dei suoli, dei metodi e delle pratiche irrigue.

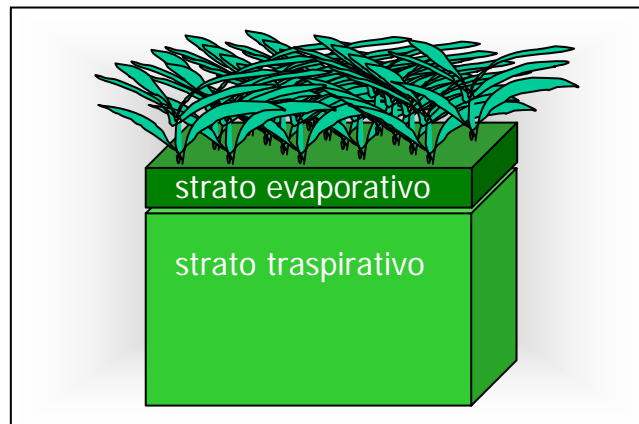


Figura 116. Volumi di controllo per l'applicazione del bilancio idrologico

9.1.1 Evapotraspirazione di riferimento

I termini di evaporazione e traspirazione vengono determinati secondo l'approccio descritto in FAO (1998), che prende le mosse dal calcolo della evapotraspirazione di una coltura di riferimento⁸ (Figura 117) in condizioni standard⁹, detta *evapotraspirazione di riferimento* ET_0 . Essa dipende solo da fattori climatici e viene calcolata con l'equazione di Penman-Monteith, che, inserendo i valori parametrici relativi alla coltura di riferimento, può essere scritta nella forma:

$$(9.1.2) \quad ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T + 273} \gamma u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

dove:

- ET_0 = evapotraspirazione di riferimento (mm/giorno)
- R_n = radiazione netta alla superficie della coltura (MJ/(m²giorno))
- T = temperatura media giornaliera dell'aria a 2 m dal suolo (°C)
- u_2 = velocità del vento a 2 m dal suolo (m/s)
- G = flusso di calore dal suolo (MJ/(m²giorno))
- $e_s - e_a$ = deficit di pressione di vapore dell'aria (kPa)
- Δ = pendenza della curva saturazione di vapore-temperatura (kPa/°C)
- γ = costante psicrometrica (kPa/°C)

ET_0 può essere calcolata per differenti intervalli temporali (orario, giornaliero, decadico, o mensile). La selezione dell'intervallo temporale dipende dallo scopo per cui viene calcolata ET_0 , dall'accuratezza richiesta, e dalla scala temporale cui sono disponibili i dati. Sulla base dell'analisi di questi fattori si è optato per l'utilizzo di un passo di tempo giornaliero.

⁸ La **coltura di riferimento** è una coltura erbacea, con altezza 0.12 m, resistenza superficiale 70 sm⁻¹, ed albedo 0.23 (Figura 3).

⁹ Le **condizioni standard** sono: coltivazione estensiva; altezza uniforme; la coltura ombreggia completamente il suolo; le condizioni di crescita sono ottimali, e la disponibilità d'acqua è adeguata (la traspirazione non è limitata dalla disponibilità idrica).

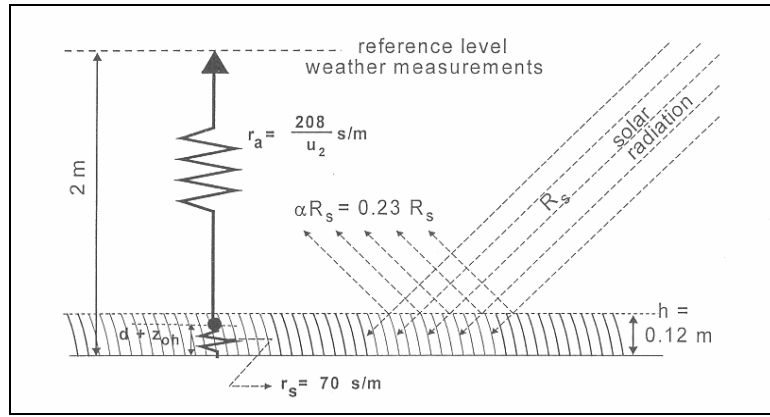


Figura 117. Caratteristiche della coltura di riferimento (FAO – Paper 56, 1998)

Per il calcolo dei termini che compaiono nell'Eq. (2) si adottano i seguenti criteri (FAO, 1998).

La pressione di vapore saturo è espressa in funzione della temperatura dell'aria:

$$(9.1.3) \quad e^0(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right]$$

Per calcolare la pressione di vapore saturo media giornaliera si calcola la media tra la pressione di vapore saturo calcolata in funzione della temperatura massima e minima giornaliera:

$$(9.1.4) \quad e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2}$$

L'uso della temperatura media giornaliera produrrebbe infatti una sottostima della pressione di vapore.

La pressione di vapore si calcola a partire dai valori dell'umidità giornaliera massima e minima:

$$(9.1.5) \quad e_a = \frac{e^0(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^0(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2}$$

Il valore di Δ è calcolato in funzione della temperatura:

$$(9.1.6) \quad \Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

dove la temperatura che compare nella formula è la media giornaliera.

Il valore di R_n è calcolato come differenza tra la radiazione netta a onda corta R_{ns} e la radiazione netta a onda lunga R_{nl} :

$$(9.1.7) \quad R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Il flusso G di calore dal suolo è stimato con la seguente espressione:

$$(9.1.8) \quad G = c_s \frac{T_i + T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z$$

Tuttavia, il valore di G può essere assunto uguale a zero nel caso di calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento su base giornaliera.

Il valore della costante psicrometrica γ si calcola applicando la seguente relazione:

$$(9.1.9) \quad \gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P$$

dove P è la pressione atmosferica, calcolata in funzione della quota z sul livello del mare mediante l'espressione

$$(9.1.10) \quad P = 101.3 * \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26}$$

Per calcolare ET_0 secondo l'equazione FAO Penman-Monteith (9.1.2), sono quindi necessarie misure giornaliere di radiazione solare, temperatura massima e minima, umidità dell'aria massima e minima, e velocità del vento.

9.1.2 Traspirazione potenziale

Secondo l'approccio descritto in FAO (1998), la traspirazione potenziale T_c di una coltura viene calcolata come una frazione - K_{cb} - della evapotraspirazione ET_0 di una coltura di riferimento in condizioni standard:

$$(9.1.11) \quad T_c = K_{cb} ET_0$$

Nel parametro colturale K_{cb} sono compresi i fattori legati al tipo di copertura del suolo, alle caratteristiche della specie colturale ed alla resistenza aerodinamica (Figura 118).

In particolare, K_{cb} dipende da:

altezza della coltura, che influenza la resistenza aerodinamica

albedo della superficie suolo-pianta, che influenza la radiazione solare netta, quindi l'energia disponibile per la traspirazione

proprietà di resistenza al flusso di vapore acqueo della pianta (numero e caratteristiche stomatiche, caratteristiche delle foglie, ecc...), che ne influenzano la resistenza superficiale.

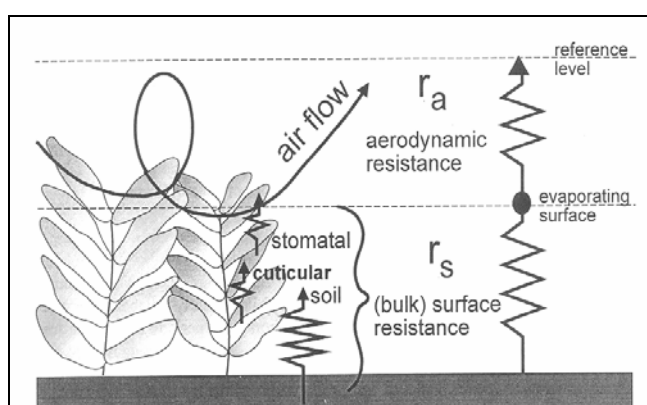


Figura 118. Rappresentazione semplificata delle resistenze superficiale ed aerodinamica al flusso di vapore acqueo (FAO, 1998)

Nel corso dello sviluppo della coltura cambiano le condizioni di copertura del suolo, l'altezza della pianta, e l'estensione di area fogliare; quindi, il valore del coefficiente K_{cb} cambia nelle diverse fasi del *ciclo vegetativo* della coltura. Il ciclo vegetativo di una coltura è suddiviso in quattro periodi (Figura 119):

- periodo iniziale;
- periodo di sviluppo;
- periodo intermedio, di maturazione;
- periodo finale.

Nel periodo iniziale, quando la copertura del suolo è pari al massimo al 10% della superficie del suolo, l'evaporazione è la componente principale del flusso di evapotraspirazione e il valore di K_{cb} è basso. Nel periodo di sviluppo della coltura aumenta la copertura del suolo, l'evaporazione diminuisce e la traspirazione risulta la componente predominante; il valore di K_{cb} cresce. Nel periodo intermedio, di maturazione, K_{cb} raggiunge il suo valore massimo. Nel periodo finale, a maturazione avvenuta, K_{cb} diminuisce progressivamente.

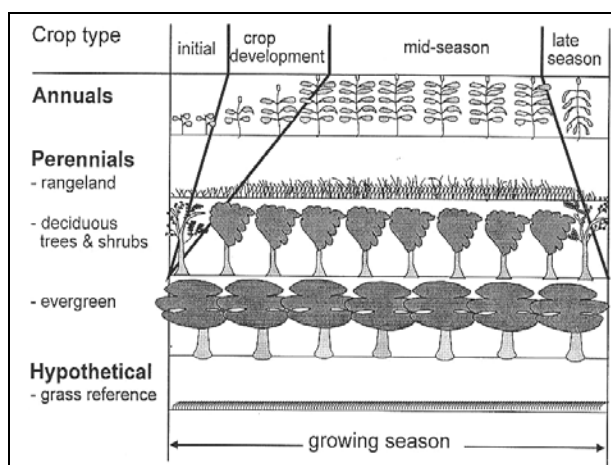


Figura 119. Periodi del ciclo vegetativo, per diversi tipi di colture (FAO-Paper 56, 1998)

Per calcolare K_{cb} è necessario: identificare le fasi di sviluppo della coltura, in cui risulta suddiviso il ciclo fenologico della coltura, determinarne la durata, calcolare i corrispondenti valori di K_{cb} (a partire da valori tabulati, corretti tenendo conto della frequenza degli apporti idrici e di condizioni climatiche particolari durante le fasi). L'andamento temporale del coefficiente culturale K_{cb} può essere quindi ottenuto con la costruzione grafica in Figura 120, rappresentata matematicamente dall'equazione:

$$(9.1.12) \quad K_{cb} = \begin{cases} K_{cb\ ini} & \text{se } 0 \leq t < T_{ini} \\ K_{cb\ ini} + \left(\frac{K_{cb\ mid} - K_{cb\ ini}}{T_{ini}} \right) t & \text{se } T_{ini} \leq t < T_{dev} \\ K_{cb\ mid} & \text{se } T_{dev} \leq t < T_{mid} \\ K_{cb\ mid} + \left(\frac{K_{cb\ end} - K_{cb\ mid}}{T_{end}} \right) t & \text{se } T_{mid} \leq t \leq T_{end} \end{cases}$$

dove:

T_{ini} , T_{dev} , T_{mid} , T_{end} sono la durata (in giorni) dei periodi, rispettivamente, iniziale, di sviluppo, intermedio e finale, del ciclo fenologico colturale;

t è il tempo trascorso dall'inizio del periodo iniziale (in giorni);

$K_{cb\ ini}$ è il valore iniziale del coefficiente;

$K_{cb\ mid}$ è il valore al termine del periodo intermedio;

$K_{cb\ end}$ è il valore al termine del periodo finale.

Per la scelta di tali valori si può fare riferimento al quaderno FAO (1998), che ne riporta i valori per diverse colture e condizioni ambientali, integrandoli e confrontandoli con i risultati di sperimentazioni e ricerche sito-specifiche, se disponibili.

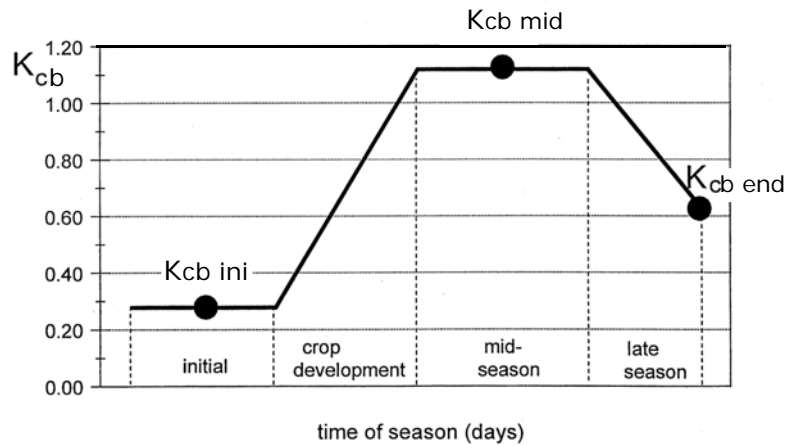


Figura 120. Andamento del coefficiente colturale K_c , nell'approccio con duplice coefficiente (FAO),

9.1.3 Traspirazione

La traspirazione effettiva assume valori minori di quello potenziale in presenza di contenuti idrici del suolo inadeguati. Numerose osservazioni sperimentali hanno evidenziato come vi sia un intervallo di valori del contenuto di umidità, all'interno del quale la traspirazione si mantiene al valore potenziale, o di poco inferiore, mentre decresce al di fuori di esso. Per esprimere la dipendenza della traspirazione dal contenuto idrico del suolo il metodo FAO (1998) utilizza un coefficiente di stress idrico, K_s , il cui valore varia tra zero ed uno in funzione del contenuto idrico. La traspirazione effettiva si ottiene semplicemente come prodotto della traspirazione potenziale e del coefficiente di stress:

$$(9.1.13) \quad T = K_s T_c$$

Il legame tra coefficiente di stress e contenuto idrico è approssimato mediante la spezzata rappresentata in Figura 121, la cui espressione matematica è la seguente:

$$(9.1.14) \quad K_s = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 \leq D_2 < RAW \\ K_s = \frac{TAW - D_2}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_2}{(1-p)TAW} & \text{se } RAW \leq D_2 < TAW \end{cases}$$

Per definire il significato delle variabili utilizzate è necessario introdurre le seguenti grandezze:

- contenuto idrico medio, θ_2 [-], nello strato traspirativo;
- contenuto di umidità nello strato traspirativo alla capacità di campo (in inglese, *field capacity*), $\theta_{c,2}$ [-], è il valore massimo del contenuto idrico una volta rimossa l'acqua gravitazionale;
- contenuto di umidità nel suolo al punto di appassimento (in inglese, *wilting point*), $\theta_{wp,2}$ [-], è il valore minimo del contenuto idrico che può essere ancora utilizzato dalla coltura;

- *contenuto di umidità nel suolo a saturazione*, $\theta_{SAT,2}$ [-], è il valore massimo del contenuto idrico; esso è pari alla porosità η_2 [-], definita come la percentuale di spazi vuoti rispetto al volume totale;

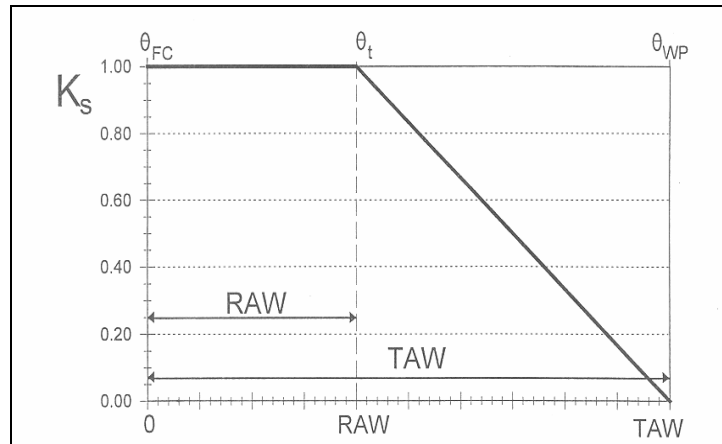


Figura 121. Andamenti del coefficiente di stress idrico K_s

TAW , RAW e D_2 sono quindi definite come:

- *acqua totale utilizzabile*, TAW [mm] (dall'inglese, *Total Available Water*), è il volume d'acqua che la coltura può estrarre dallo spessore radicato del suolo, si definisce a partire dai due parametri $\theta_{fc,2}$ e $\theta_{wp,2}$:

$$(9.1.15) \quad TAW = 1000 (\theta_{fc} - \theta_{wp}) Z_r$$

dove Z_r [m] è lo spessore radicato dello strato traspirativo;

- *acqua facilmente utilizzabile*, RAW [mm] (dall'inglese, *Readily Available Water*), è la soglia al di sotto della quale il contenuto di umidità del suolo non è ottimale per lo sviluppo della coltura. RAW [mm] è anche definito come la frazione di TAW che la coltura può estrarre dallo strato traspirativo senza alcuno stress idrico (ovvero, mantenendo $K_s = 1$) (Figura 122):

$$(9.1.16) \quad RAW = p TAW \quad 0 < p < 1$$

dove p è un parametro specifico della coltura considerata, dipendente dalla profondità dell'apparato radicale e dal valore di evapotraspirazione potenziale, ET_c (p decresce al crescere di ET_c). Tipici valori di riferimento di p , per differenti colture, sono tabulati in FAO (1998, tab. 22);

- *deficit idrico* D_2 , volume d'acqua necessario per portare il contenuto idrico medio, θ , nella zona traspirativa alla capacità di campo:

$$(9.1.17) \quad D_2 = 1000 (\theta_{fc} - \theta) Z_r$$

I parametri θ_{SAT} , θ_{fc} , e θ_{wp} dipendono dalle caratteristiche e dallo stato del suolo. Valori caratteristici per alcune classi tessiture si trovano tabulati in FAO (1998, tab. 19). Il parametro TAW dipende, oltre che dalle caratteristiche del suolo, dal tipo di coltura, tramite la profondità dell'apparato radicale, Z_r ; i valori massimi di Z_r , tipici per alcune colture, si trovano tabulati in FAO (1998, tab. 22).

In realtà, la capacità delle radici ad estrarre acqua dal terreno non dipende solo dal contenuto di umidità, come indica la condizione di stress idrico espressa in funzione di RAW (relazione (14)); essa dipende direttamente dall'energia potenziale dell'acqua, quindi,

anche dalle caratteristiche del suolo (potenziale matriciale e conducibilità idraulica). Per tenere conto di questo, il parametro p è funzione anche del tipo di suolo: i valori tabulati in FAO (1998) possono essere ridotti per suoli con tessitura fine, e maggiorati per suoli con tessitura grossolana.

9.1.4 Evaporazione

Il tasso di evaporazione E viene calcolato moltiplicando il coefficiente evaporativo K_e (determinato in funzione delle condizioni di umidità del suolo), e l'evapotraspirazione di riferimento ET_0 :

$$(9.1.18) \quad E = K_e ET_0$$

Il calcolo del coefficiente K_e è piuttosto articolato e si effettua a partire dalla seguente espressione:

$$(9.1.19) \quad K_e = \text{MIN}(K_r(K_{c \max} - K_{cb}), f_{ew}K_{c \max})$$

dove: K_{cb} è il coefficiente colturale basale; $K_{c \max}$ è il valore massimo della somma $K_{cb} + K_e$ che normalmente segue alla pioggia o all'irrigazione; K_r è un coefficiente adimensionale di riduzione (che è uguale a 1 in seguito alla pioggia o all'irrigazione e decresce fino a zero quando il suolo si asciuga; analogo a K_s per la traspirazione); f_{ew} è la frazione di suolo che è sia non coperta dalla vegetazione che bagnata, cioè è la frazione della superficie del suolo dalla quale proviene la maggior parte dell'evaporazione.

Il calcolo consiste nel:

determinare il limite superiore $K_{c \max}$, attraverso:

$$(9.1.20) \quad K_{c \max} = \text{MAX} \left\{ \left[1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right], K_{cb} + 0.05 \right\}$$

dove RH_{\min} e u_2 sono il valore minimo della umidità relativa (%) e la velocità del vento (m s^{-1}) misurate a 2 m di altezza dal suolo; h è l'altezza della pianta (m).

determinare il coefficiente K_r , secondo una metodologia che prevede una soglia di umidità del suolo al di sotto della quale l'acqua disponibile non è più in grado di supportare pienamente l'evaporazione (in maniera analoga alla metodologia adottata per la stima di K_s). Vengono dunque definiti TEW (Total Evaporable Water) (mm), ossia l'acqua evaporabile totale e REW (Readily Evaporable Water) (mm), ossia l'acqua immediatamente evaporabile, che è funzione delle caratteristiche del suolo (valori tabulati in funzione della tessitura) e rappresenta la massima altezza d'acqua che può evaporare senza restrizioni se non quelle energetiche. TEW può essere calcolato come segue:

$$(9.1.21) \quad TEW = 1000 \cdot (\theta_{fc,1} - 0.5\theta_{wp,1}) \cdot Z_e$$

nella quale Z_e è la profondità della zona di evaporazione (m).

L'andamento di K_r in relazione al valore del deficit D_1 (o del contenuto idrico θ_1) è illustrato in Figura 122 e calcolato come segue:

$$(9.1.22) \quad K_r = \begin{cases} K_r = 1 & \text{se } 0 \leq D_2 < REW \\ K_r = \frac{TEW - D_1}{TEW - REW} = \frac{TEW - D_1}{(1-p)TEW} & \text{se } REW \leq D_2 < TEW \end{cases}$$

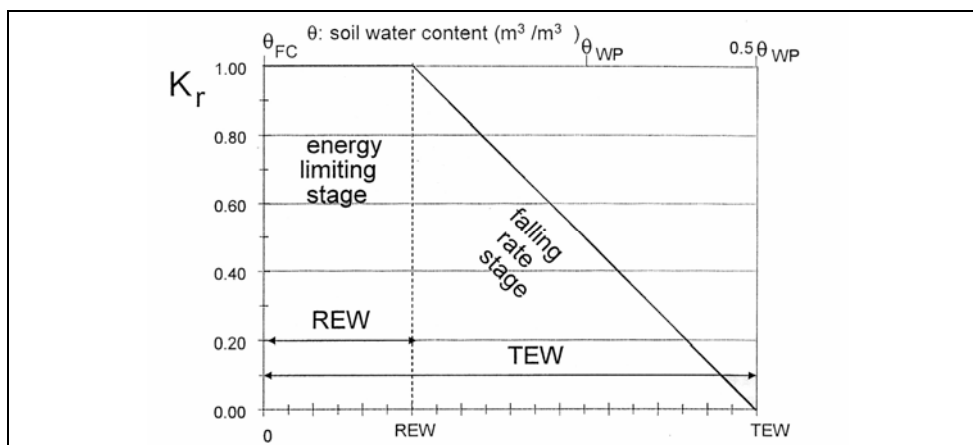


Figura 122. Coefficiente di riduzione K_r (da FAO-56, 1998)

determinare il coefficiente f_{ew} , a partire dal minimo tra il valore $(1-f_c)$ che misura il grado medio di terreno non coperto dalla vegetazione e il coefficiente f_w che dà il valore medio della frazione di suolo bagnata effettivamente durante la pioggia o l'irrigazione.

$$(9.1.23) \quad f_{ew} = \text{MIN}(1 - f_c, f_w)$$

Il coefficiente f_w dipende dal metodo di irrigazione adottato (per scorrimento è sempre uguale a 1) ed è sempre uguale a 1 durante la pioggia.

Il coefficiente f_c dipende, oltre che dal tipo di vegetazione, dallo stadio di crescita delle colture. In mancanza di misure dirette si può calcolare con l'espressione:

$$(9.1.24) \quad f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{c \min}}{K_{c \max} - K_{c \min}} \right)^{(1+0.5h)}$$

dove: K_{cb} è il coefficiente di base riferito alla fase di crescita; $K_{c \min}$ è il valore minimo di $K_{cb} + K_e$ per suolo nudo asciutto ($K_{c \min}$ può assumere valore compreso tra 0.15 e 0.20); $K_{c \max}$ è il valore massimo di $K_{cb} + K_e$, come da Equazione (19); h è l'altezza media delle piante (m).

9.1.5 Deflusso superficiale

La precipitazione, eventualmente dopo aver subito una parziale intercettazione da parte degli apparati fogliari della vegetazione, raggiunge il terreno. Questo apporto idrico può penetrare nel suolo (infiltrazione) o allontanarsi scorrendo sulla superficie (deflusso superficiale). Lo studio di questi due processi, fortemente interdipendenti, è uno degli argomenti classici dell'idrologia ed è documentato da un'enorme mole di pubblicazioni. Gli approcci più rigorosi sono piuttosto complessi ed ancora di difficile utilizzo nella pratica operativa. Sono altresì disponibili numerosi metodi, basati su una interpretazione semplificata dei processi, di più facile utilizzo (si veda, ad esempio, CIGR, 1999). Tra questi, certamente uno dei più diffusi e meglio documentati è il metodo del Curve Number del Soil Conservation Service degli Stati Uniti (USDA-SCS, 1972). Il metodo stima il deflusso superficiale in modo empirico, attraverso l'assegnazione di un parametro CN (Curve Number) in funzione dell'uso del suolo e delle caratteristiche del suolo.

L'equazione fondamentale del metodo è la seguente:

$$(9.1.25) \quad Q_u = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a - S)}$$

dove:

S è il volume idrico massimo immagazzinabile nel suolo; dipende dalle caratteristiche del suolo, dall'uso del suolo, dalla pendenza, e dal contenuto di umidità del suolo; esso è variabile nello spazio e nel tempo. È espresso in funzione del parametro CN :

$$(9.1.26) \quad S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

I_a è la perdita iniziale, corrisponde al volume di pioggia che deve cadere prima che si origini deflusso superficiale; il suo valore dipende dall'intercettazione della vegetazione, dall'immagazzinamento nelle piccole depressioni della superficie del suolo e dall'infiltrazione durante le prime fasi dell'evento di pioggia. È generalmente accettata l'ipotesi, sebbene abbia basi esclusivamente empiriche, che I_a sia una frazione di S ; in particolare si assume:

$$(9.1.27) \quad I_a = 0.2 S$$

Sostituendo le (26) e (27) nella (25) si ottiene

$$(9.1.28) \quad Q_u = \frac{\left[P - 5.08 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \right]^2}{\left[P + 20.32 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \right]}$$

Il parametro CN dipende da:

- uso del suolo,
- caratteristiche idrologiche del suolo,
- pendenza del terreno,
- condizioni di umidità.

I valori di CN di riferimento (CN_{II}^{tab}), per pendenze del 5%, e condizioni di umidità intermedie tra la capacità di campo e il punto di appassimento (*Antecedent Moisture condition II*), sono tabulati in USDA-SCS (1972), in funzione di quattro fattori che caratterizzano le condizioni locali del suolo: uso, lavorazione, classe e condizioni idrologiche. Per quanto riguarda la classificazione, i suoli sono classificati da SCS, secondo *quattro gruppi idrologici* - $A, B, C,$ e D - in funzione della capacità di infiltrazione e dell'intensità di trasmissione che li caratterizza.

Il valore CN_{II}^{tab} I viene corretto per pendenze i diverse dal 5%:

$$(9.1.29) \quad CN_{II}^{slo} = CN_{II}^{tab} + \frac{CN_{II}^{tab} \{1 - \exp[0,00673(100 - CN_{II}^{tab})]\}}{3} [1 - 2 \exp(-13.86 i)]$$

Un'ulteriore correzione viene introdotta per ovviare al fatto che i valori tabulati sono riferiti a condizioni colturali medie nella stagione vegetativa. Per tenere conto delle diverse fasi di sviluppo della coltura, si definisce l'andamento temporale di CN_{II} :

$$(9.1.30) \quad CN_{II} = \begin{cases} (CN_{II}^{slo})_{suolo\ nudo} \\ 2CN_{II}^{slo} - (CN_{II}^{slo})_{suolo\ nudo} \\ CN_{II}^{slo} \\ (CN_{II}^{slo})_{suolo\ nudo} \end{cases}$$

dove i termini a secondo membro valgono, nell'ordine:

- prima della semina;
- tra la semina ed il raccolto, od i tagli successivi;
- nel periodo di massimo sviluppo fino ad appena prima del raccolto;
- dopo il raccolto.

Infine, un'ultima correzione viene introdotta per tener conto del contenuto di umidità effettivo (SWAT website). Per condizioni di umidità corrispondenti a θ_{wp} e θ_{fc} , (*Antecedent Moisture Conditions I* e *III*, rispettivamente) il valore del CN si modifica nel modo seguente:

$$(9.1.31) \quad CN_I = CN_{II} - \frac{20(100 - CN_{II})}{(100 - CN_{II} + \exp[2.533 - 0.0636(100 - CN_{II})])}$$

$$(9.1.32) \quad CN_{III} = CN_{II} \exp[0.00673(100 - CN_{II})]$$

Il valore di CN corrispondente a contenuto di umidità generico è dato dall'espressione:

$$(9.1.33) \quad CN = \frac{100 CN_I}{(100 - CN_I)F + CN_I}$$

dove:

$$(9.1.34) \quad F = \frac{\exp(w_1 - w_2 V_1)}{V_1 + \exp(w_1 - w_2 V_1)}$$

A loro volta, i coefficienti di forma w_1 e w_2 sono forniti dalle espressioni:

$$(9.1.35) \quad w_1 = \ln \left[\frac{V_{1,fc}}{1 - S_{III} S_I^{-1}} - V_{1,fc} \right] + w_2 V_{1,fc}$$

$$(9.1.36) \quad w_2 = \frac{\ln \left[\frac{V_{1,fc}}{1 - S_{III} S_I^{-1}} - V_{1,fc} \right] - \ln \left[\frac{V_{1,sat}}{1 - 2.54 \cdot S_I^{-1}} - V_{1,sat} \right]}{V_{1,sat} - V_{1,fc}}$$

con:

S_{III} = valore minimo che il parametro di ritenzione può assumere nel giorno t , per $CN = CN_{III}$, [mm]

S_I = valore massimo che il parametro di ritenzione può assumere nel giorno t , per condizioni $CN = CN_I$, [mm]

$V_{1,fc}$, $V_{1,sat}$ = contenuti idrici dello strato evaporativo alla capacità di campo e a saturazione [mm]

$$V_{1,fc} = 1000(\theta_1 - \theta_{1,fc})Z \quad (9.1.37)$$

$$V_{1,sat} = 1000(\theta_1 - \theta_{1,sat})Z$$

Le correzioni per la pendenza e per il contenuto di umidità non si applicano, evidentemente, se la coltura è presente. Per questa coltura, inoltre, USDA-SCS (1972) non fornisce valori di riferimento del *CN*; tuttavia, si può ragionevolmente supporre che, durante l'intero periodo della sommersione, il contenuto di umidità del suolo sia costantemente alla saturazione e il tasso di infiltrazione sia pari alla capacità di infiltrazione, indipendentemente dal verificarsi o meno di apporti meteorici. Il *CN* viene quindi posto pari a quello di un suolo pressoché impermeabile.

9.1.6 Intercettazione

Per stimare l'aliquota di pioggia intercettata dall'apparato fogliare della vegetazione sono disponibili varie formule, che la esprimono in funzione di parametri caratteristici della copertura fogliare. Una delle formule più utilizzate (si veda, ad esempio, *Van Dam et al.*, 1997) è quella proposta da *Von Hoyningen-Hune* (1983) e *Braden* (1985):

$$(9.1.38) \quad I = a LAI \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{bP}{a LAI}} \right)$$

dove:

LAI = indice di area fogliare [-];

a = coefficiente empirico [L];

b = frazione di terreno coperto dalla vegetazione [-].

Dei tre parametri che compaiono nella (9.1.38) - *LAI*, *b* e *a* - i primi due sono fortemente correlati e generalmente è lecito assumere $b=LAI/3$. Per quanto riguarda *a*, esso è pressoché costante per le più comuni colture e si può assumere con buona approssimazione $a = 0.06$ cm.

Il valore di *LAI* dipende ovviamente dallo sviluppo colturale; in Figura 123 è rappresentato un tipico andamento temporale di *LAI*.

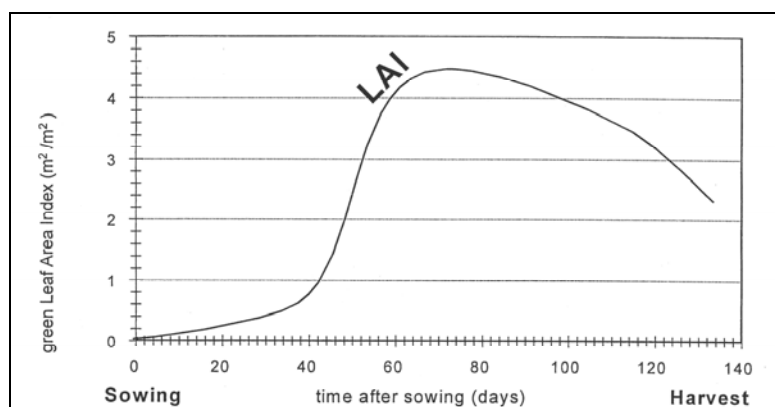


Figura 123. Tipico andamento del *LAI*, durante il ciclo vegetativo di una coltura; esempio relativo al mais (FAO – Paper 56, 1998).

9.1.7 Percolazione

La percolazione è qui intesa come il flusso idrico uscente dagli strati evaporativi, Q_e , e traspirativo, Q_s . In particolare, il flusso Q_s è destinato al rimpinguamento della falda, attraverso il processo di trasferimento nel suolo al di sotto dello spessore radicato. Come nel caso del deflusso superficiale e dell'infiltrazione, la descrizione rigorosa del processo di percolazione richiede formulazioni matematiche piuttosto complesse e, quantomeno nelle applicazioni a scala distrettuale, pone problemi di rappresentatività e di calibrazione delle formulazioni stesse tuttora aperti. Di conseguenza, è comune l'utilizzo di approcci semplificati, che, pur nei limiti di validità delle ipotesi su cui si basano, risultano di utilizzo assai più agevole. Nel caso dell'equazione di bilancio (1), l'applicazione in un contesto di pianificazione dell'allocazione delle risorse idriche a scala di bacino e l'uso di un passo di tempo giornaliero, sono fattori che giustificano la scelta di un semplice approccio, basato sull'ipotesi che la percolazione avvenga a tasso costante, pari alla conducibilità idraulica del suolo per le specifiche condizioni di umidità. Ad ogni passo di tempo giornaliero, i flussi di percolazione Q_e e Q_s [mm] sono quindi espressi dalle seguenti relazioni:

$$Q_e = 3600 \cdot 10(K_1(\theta_1)\Delta t)$$

(9.1.39)

$$Q_s = 3600 \cdot 10(K_2(\theta_2)\Delta t)$$

dove K_e e K_s [cm/ora] sono le conducibilità idrauliche degli strati, rispettivamente, evaporativo e traspirativo; la conducibilità idraulica dipende dal contenuto di umidità, espresso secondo Brooks and Corey (1964):

$$K_1(\theta_1) = K_{SAT,1} \left(\frac{\theta_1 - \theta_{r,1}}{\theta_{SAT,1} - \theta_{r,1}} \right)^n$$

(9.1.40)

$$K_2(\theta_2) = K_{SAT,2} \left(\frac{\theta_2 - \theta_{r,2}}{\theta_{SAT,2} - \theta_{r,2}} \right)^n$$

dove $K_{SAT,1}$ e $K_{SAT,2}$ sono le conducibilità a saturazione dei due strati, $\theta_{SAT,1}$ e $\theta_{SAT,2}$, $\theta_{r,1}$ e $\theta_{r,2}$ sono i contenuti di umidità, rispettivamente, a saturazione e residui, ed n è un fattore geometrico.

9.2 Modulo delle fasi fenologiche colturali

Il modulo di crescita colturale $Crop_Coeff$ permette di calcolare l'andamento dei principali coefficienti fenologici in funzione delle condizioni climatiche, considerando in particolare l'andamento delle temperature medie giornaliere registrate nel corso dell'anno.

Per ogni coltura, sono definiti la *temperatura minima per la semina*, la *temperatura base e massima per lo sviluppo colturale* e i parametri che ne governano il *fotoperiodismo* (ovvero, l'influenza delle ore di luce nel giorno sullo sviluppo della coltura) e la *vernalizzazione* (ovvero, la necessità di un periodo di basse temperature, in genere comprese tra 0 e 12 °C, per promuovere la successiva fioritura).

9.2.1 Determinazione del giorno di semina:

$Crop_Coeff$ posticipa la *data effettiva di semina*, rispetto alla data tipica definita per la coltura, fino a quando non è soddisfatta la condizione

$$(9.2.1) \quad \frac{\sum_{d=today}^{today+4} T_{mean(d)}}{5} \geq T_{req}$$

in cui $T_{mean(d)}$ è la temperatura media del giorno d e T_{req} è il parametro di minima richiesta termica per la semina della coltura.

Nel caso di due (o più) colture avvicendate, per evitare sovrapposizioni tra i periodi di vita qualora si verificassero maturazioni tardive, sono definite date limite per le colture, oltre le quali esse sono considerate raccolte.

9.2.2 Determinazione degli stadi di sviluppo fenologico:

Gli *stadi di sviluppo fenologico* delle colture sono determinati attraverso il metodo detto 'dei gradi giorno (GDD)' o 'delle sommatorie termiche' (Donatelli, 1995; Stockle & Nelson, 1996). Esso è basato sulla considerazione che il tasso di sviluppo delle specie vegetali è correlato alle temperature medie a cui sono soggette le colture nel corso della stagione di crescita.

In ogni giorno, si accumulano gradi giorno pari alla differenza tra la temperatura media giornaliera registrata (T_{ave}) e la temperatura di base ($T_{GDdaybase}$). Se la temperatura media è inferiore a quest'ultima, non è accumulato nella somma termica, mentre se la temperatura media supera la temperatura massima di crescita colturale (T_{cutoff}), si considerano accumulati i gradi giorno pari alla differenza tra la temperatura massima di crescita colturale e la temperatura di base (Figura 124):

$$(9.2.2) \quad GD_{day} = \begin{cases} 0 & \text{se } T_{ave} < T_{GDdaybase} \\ T_{ave} - T_{GDdaybase} & \text{se } T_{GDdaybase} \leq T_{ave} \leq T_{cutoff} \\ T_{cutoff} - T_{GDdaybase} & \text{se } T_{ave} > T_{cutoff} \end{cases}$$

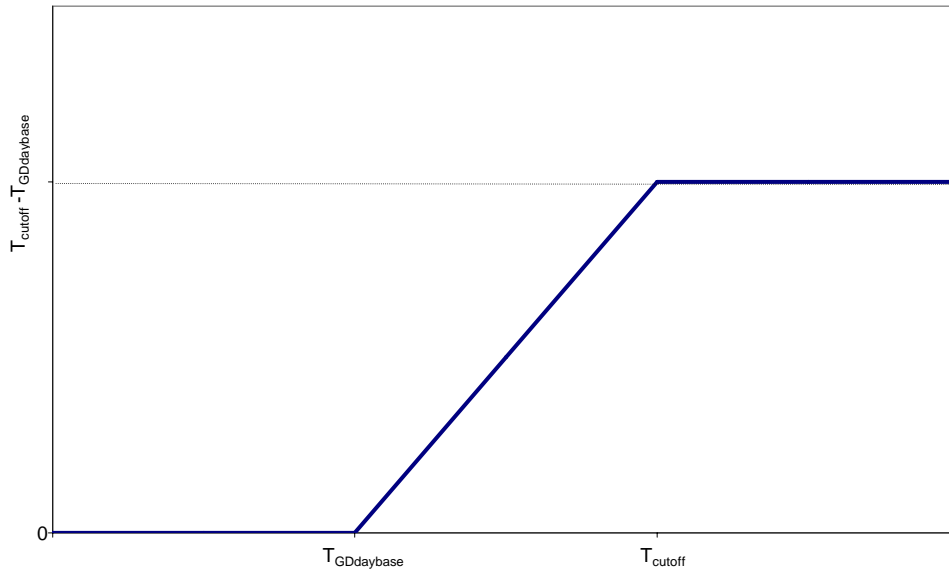


Figura 124. Andamento dei gradi giorno in funzione delle temperature medie giornaliere.

Per considerare l'influenza del fotoperiodo e della vernalizzazione, importanti in particolare per la modellizzazione dei cereali autunno-vernini, si introducono due coefficienti correttivi alla somma termica:

- *fattore fotoperiodo* (PF);
- *efficienza di vernalizzazione* (V_{eff}), ovvero *fattore di vernalizzazione* (VF).

Il fotoperiodo, ovvero le ore di luce del giorno, può avere un'influenza rilevante per lo sviluppo delle colture. In particolare, alcune specie rispondono quando il numero di ore di luce è superiore a una determinata soglia (piante longidiurne, quali avena, barbabietola, orzo invernale, frumento invernale, etc.), altre cominciano ad accumulare tempo fisiologico quando il numero delle ore di buio è inferiore a una certa soglia (piante brevidiurne, quali soia, mais, riso, etc.) e infine altre sono insensibili alla durata del giorno. La risposta al fotoperiodo è approssimata con relazioni lineari, definendo il *fattore fotoperiodo* (PF), compreso tra 0 e 1, in funzione della lunghezza del giorno ($daylength$), come descritto dalla relazione (9.2.3). Il valore di soglia $daylength_{if}$ rappresenta la lunghezza del giorno che inibisce completamente la fioritura, mentre il valore di soglia $daylength_{ins}$ rappresenta il valore oltre il quale si ha insensibilità al fotoperiodo.

Per le piante longidiurne, PF è uguale a 0 per durate del dì inferiori al valore $daylength_{if}$, PF è pari a 1 per durate del giorno superiori al valore $daylength_{ins}$, e infine assume valori intermedi per durate del giorno comprese tra i due valori (Figura 125):

$$(9.2.3) \quad PF = \begin{cases} 0 & \text{se } daylength < daylength_{if} \\ \frac{daylength - daylength_{if}}{daylength_{ins} - daylength_{if}} & \text{se } daylength_{if} \leq daylength \leq daylength_{ins} \\ 1 & \text{se } daylength > daylength_{ins} \end{cases}$$

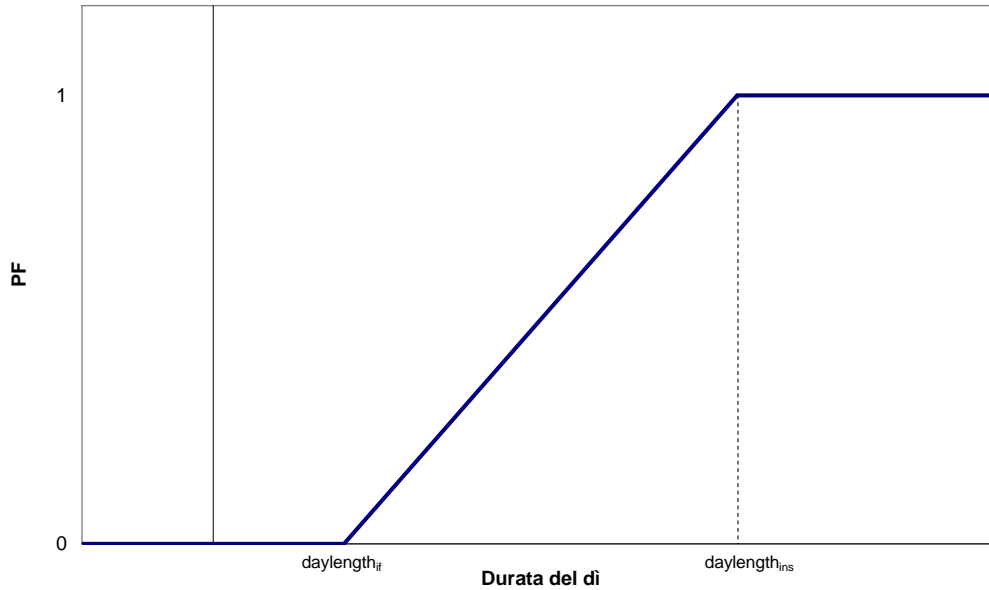


Figura 125. Risposta fotoperiodica delle specie longidiurne (da Donatelli, 1995).

Una logica opposta permette di interpretare la risposta delle piante brevidiurne, mentre per le specie non sensibili al fotoperiodo, PF è sempre uguale a 1.

La vernalizzazione delle colture considera l'effetto delle basse temperature affinché possa in seguito avvenire la fioritura; le colture invernali richiedono un periodo di esposizione a temperature tra 0 e 12°C di 10-60 giorni dalla germinazione perché la fase riproduttiva inizi. Una pianta che è stata vernalizzata, ovvero che ha risentito dell'effetto delle basse temperature nel corso del suo sviluppo vegetativo, diventa sensibile al fotoperiodo e quindi in grado di rispondere alle condizioni ambientali, fino a raggiungere piena maturazione; al contrario, una pianta non vernalizzata è insensibile al fotoperiodo e continua a restare nello stadio vegetativo per un tempo molto lungo.

La funzione che esprime l'efficienza di vernalizzazione (V_{eff}) considera tre parametri: la temperatura minima (T_{min}), la temperatura massima (T_{max}) per una vernalizzazione ottimale e un parametro A che definisce l'ampiezza dell'intervallo di temperature all'esterno del quale il fattore V_{eff} è uguale a 0.

Il parametro V_{eff} è quindi calcolato come funzione della temperatura media dell'aria registrata nel giorno (Figura 126):

$$(9.2.4) \quad V_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{se } T_{med} < T_{min} - A \\ 1 - \frac{T_{min} - T_{med}}{A} & \text{se } T_{min} - A \leq T_{med} < T_{min} \\ 1 & \text{se } T_{min} \leq T_{med} < T_{max} \\ 1 - \frac{T_{med} - T_{max}}{A} & \text{se } T_{max} \leq T_{med} < T_{max} + A \\ 0 & \text{se } T_{med} \geq T_{max} + A \end{cases}$$

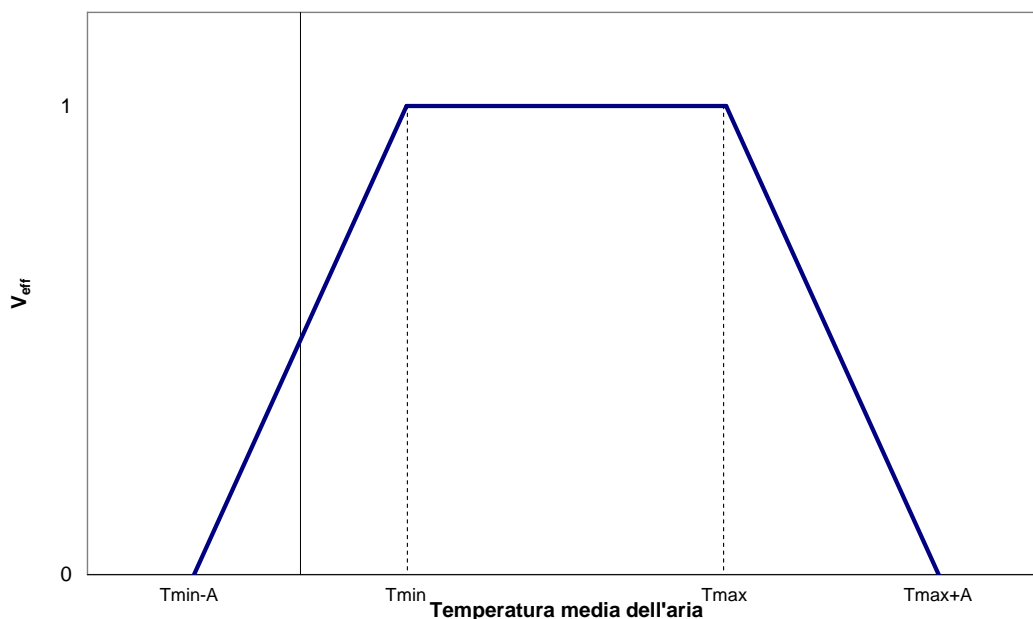


Figura 126. Risposta alla vernalizzazione (da Donatelli, 1995).

Si introduce inoltre il *fattore di vernalizzazione* VF , espresso in funzione della somma di V_{eff} a partire dalla data di semina, come descritto dalla relazione (9.2.5).

Esso è pari a 1 prima che la vernalizzazione abbia inizio e al termine della stessa; è pari al valore VF_{min} al raggiungimento della somma termica di soglia affinché la vernalizzazione inizi (V_{start}), per poi crescere fino al raggiungimento della soglia V_{end} :

$$(9.2.5) \quad VF = VF_{min} + \frac{(1 - VF_{min}) \left[\sum_{d=semina}^{oggi} V_{eff}(d) - V_{start} \right]}{V_{end} - V_{start}}$$

Per le colture non sensibili alla vernalizzazione, VF è posto pari a 1 lungo tutto il ciclo vegetativo.

La determinazione degli stadi di sviluppo fenologico dipende dalla sommatoria termica, calcolata secondo la seguente relazione:

$$(9.2.6) \quad GDD = \sum_{day=semina}^{oggi} GD_{day} \cdot \min(PF, VF)$$

La sommatoria termica GDD tiene conto delle relazioni tra tempo termico, fotoperiodo e vernalizzazione.

Il valore GDD nel giorno d è confrontato con i valori richiesti per il raggiungimento degli stadi di sviluppo colturale. I giorni in cui sono raggiunti tali valori determinano le durate dei corrispondenti stadi di sviluppo fenologico.

9.2.3 Esempio di applicazione

Con il seguente esempio applicativo si è inteso analizzare come le variazioni climatiche possano influenzare lo sviluppo di una coltura rappresentativa dell'area di analisi.

In particolare, per la simulazione si è utilizzata la serie di dati giornalieri registrati dall'ERSAF a Landriano (LO) nel decennio 1993-2002, che presenta una adeguata variabilità nelle temperature medie per osservare delle variazioni rilevanti nelle uscite del

modello. Infatti, le temperature medie dell'anno più freddo del decennio (1996) sono inferiori di quasi 2 °C rispetto a quelle dell'anno più caldo (2000).

Come coltura rappresentativa dell'area di studio si è considerato il mais da granella, che copre circa il 60% dell'area; esso è in genere seminato nella prima decade del mese di aprile e raccolto intorno alla prima decade del mese di settembre.

Possiamo osservare che in generale, all'aumentare delle temperature medie nel periodo vegetativo, la durata del ciclo fenologico diminuisce (Figura 127). Questo comportamento corrisponde a quello rilevato in natura, in quanto la crescita vegetale è promossa da temperature più elevate.

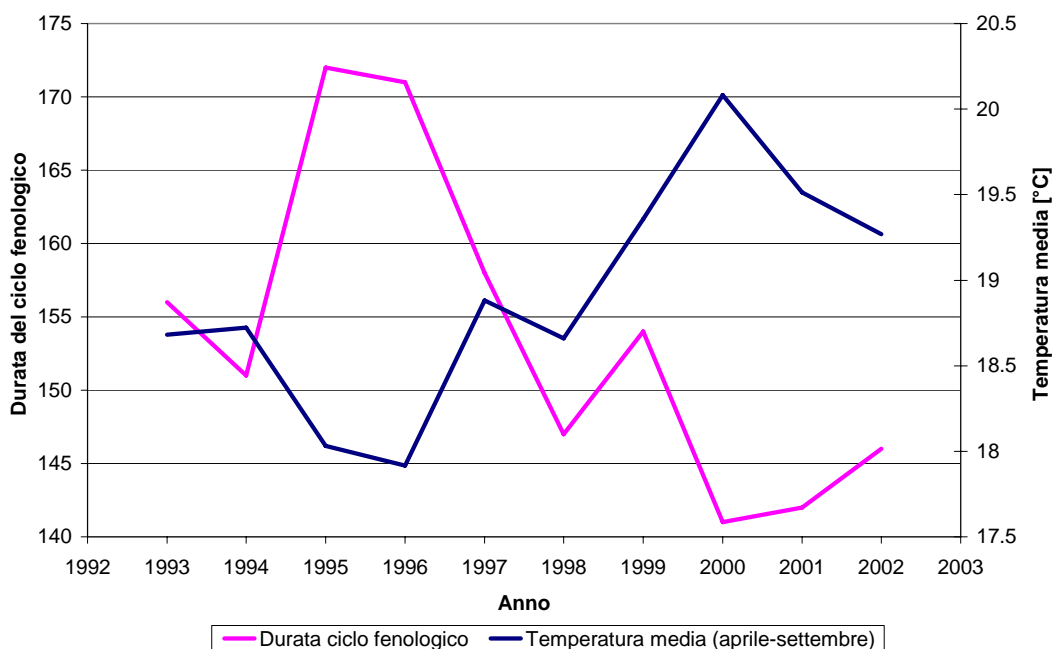


Figura 127. Correlazione tra durata del ciclo fenologico e temperatura media nei mesi di crescita per il mais 600; anni 1993-2002.

Possiamo osservare (Figura 129) come le date di semina siano posticipate di alcuni giorni solo negli anni con primavere piuttosto fredde (i.e. 1994, 1996 e 2002), sebbene le variazioni siano al massimo di una decina di giorni.

Il periodo di crescita iniziale (in blu in Figura 129) ha una durata media di circa 40 giorni, con una variazione massima del 20% circa.

Il periodo di sviluppo culturale (in rosso in Figura 129) ha una durata media di circa 62 giorni, con una variazione massima del 10% circa; questo periodo è il meno influenzato dalle variazioni di temperatura interannuali, comprese nei mesi di giugno e luglio tra i 20 e i 22 °C.

La durata della stagione intermedia (in verde in Figura 129), di media pari a circa 43 giorni, presenta una variazione massima del 16%, che corrisponde agli anni, i.e. il 1996, in cui la temperatura media nel mese di settembre è di molto inferiore a quella normalmente registrata, per cui il fabbisogno termico necessario è raggiunto più tardi durante il corso dell'anno.

La fenofase con variabilità più elevata è quella di fine crescita culturale (in azzurro in Figura 129), in cui la durata media è di circa 9 giorni, ma vi sono casi, i.e. il 1996, in cui, a causa anche del prolungarsi della crescita culturale dopo i primi di ottobre, le temperature medie inibiscono una adeguata maturazione. Viceversa, le estati più calde, i.e. quelle del 2000 e del 2001, promuovono la crescita culturale, per cui l'ultima fenofase dura soltanto pochi giorni.

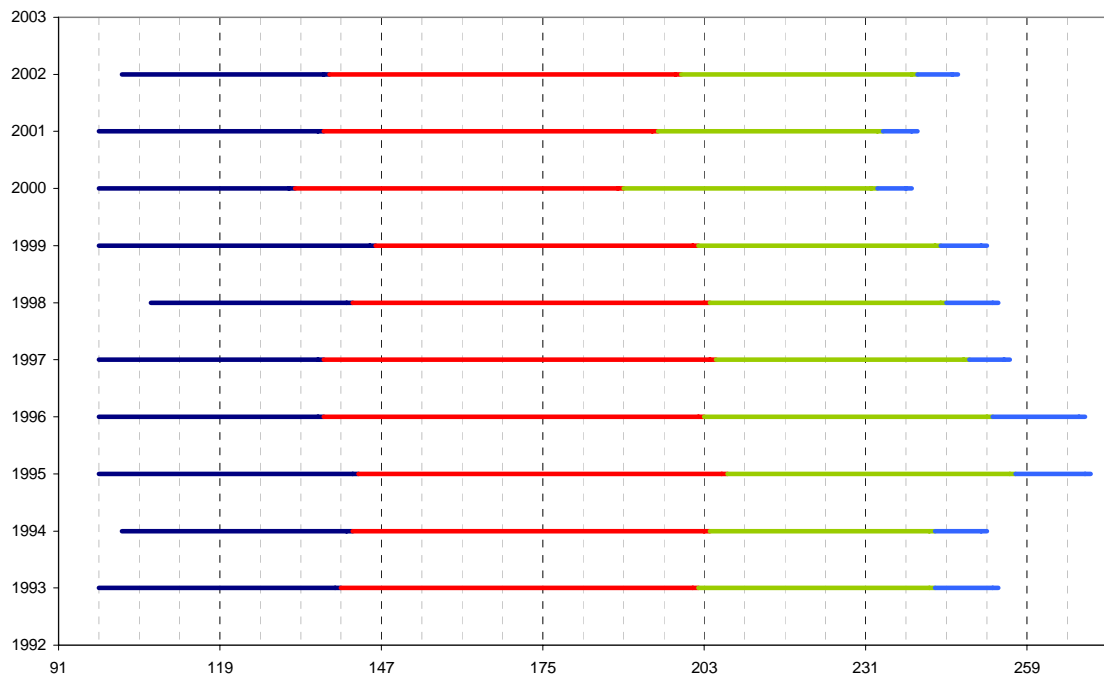


Figura 128. Durata delle fenofasi del mais negli anni di simulazione (1993-2002); ogni colore rappresenta la stessa fenofase durante i diversi anni

9.3 Indagini sul campo

9.3.1 Escursione sul territorio

Il 28 luglio 2006 è stata eseguita una escursione per visitare alcuni fontanili e altre strutture geomorfologiche di particolare interesse.

Vengono qui richiamate alcune osservazioni svolte nel corso della visita guidata dal dott. Massimo Cremonini Bianchi della Provincia di Cremona e alla quale hanno partecipato i prof. Mauro Giudici e Giansilvio Ponzini, le dott. Cinzia Durante, Bianca Ortuani e Chiara Vassena per l'Università degli Studi di Milano e la dott. Mara Pesaro della Provincia di Cremona.

L'ubicazione dei punti visitati è rappresentata nella Figura 129.

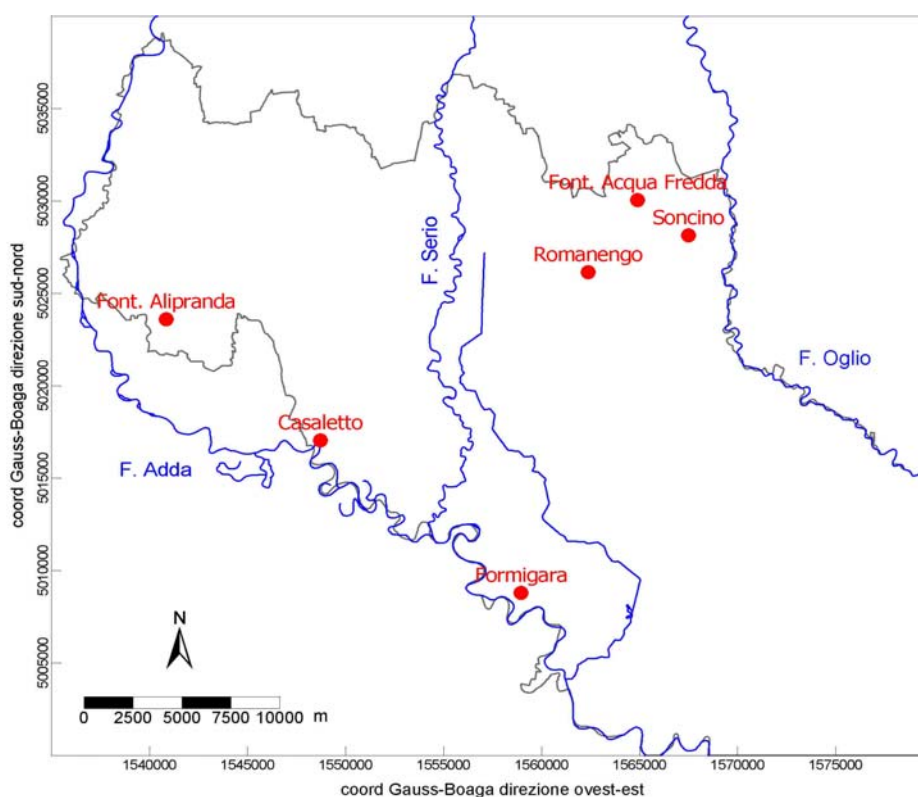


Figura 129. Mappa dei punti visitati nella escursione del 28 luglio 2006.

9.3.1.1 Fontanile del “piano basso” della pianura – Fontanile Alipranda (località Roncadello)

Il fontanile è censito con il n. 27 da D’Auria e Zavagno (2005); è situato a sud est della cascina Colombera, inserito in aree topograficamente depresse (alvei abbandonati) nel bacino del fiume Adda. Questo fontanile è costituito da una testa larga 2.4 m, lo scavo è profondo 3.3 m (Figura 130).



Figura 130. Fontanile di Alipranda; testa del fontanile.

Il canale di scolo del fontanile raccoglie dopo poche decine di metri la portata estratta da un altro fontanile (Figura 131). In questo punto sono molto ben evidenti gli “occhi” del fontanile (Figura 132).



Figura 131. Fontanile di Alipranda; secondo fontanile.



Figura 132. Fontanile di Alipranda; "occhi" del fontanile.

Nei pressi della testa del fontanile è stato ritrovato un tubo di drenaggio (Figura 133) del diametro di circa 20 cm e lunghezza di circa 5 m.



Figura 133. Fontanile di Alipranda; tubo di drenaggio.

9.3.1.2 Terrazzo secondario dell'Adda (località Casaletto)

In questa sosta è stato osservato un terrazzo secondario dell'Adda in località Casaletto (Figura 134), che ha una altezza di circa 8 m e che mostra ai piedi un piccolo canale di gronda, dove sono evidenti sulla vegetazione e sul suolo i segni di una consistente portata in occasione di eventi piovosi abbastanza intensi (Figura 135). Questa osservazione mostra

che questi canali possono essere sedi di importanti drenaggi, almeno in alcuni periodi dell'anno. Il modello preliminare realizzato, nel quale è stato introdotto un metodo piuttosto semplice per simulare questi termini di sorgente, permette di ipotizzare alcune zone in cui ci si aspetta un drenaggio più cospicuo, che andranno successivamente valutate anche con un rilievo geomorfologico, al fine di validare i risultati del modello ed eventualmente rivedere alcune caratteristiche.



Figura 134. Terrazzo dell'Adda.



Figura 135. Terrazzo dell'Adda – particolare del canale di gronda.

9.3.1.3 Canale di gronda ai piedi del terrazzo dell'Adda (località Formigara)

Questo canale di gronda (Figura 136) corre lungo il terrazzo principale dell'Adda, che presenta un'altezza di circa 20 m in una zona vicina alla confluenza del Serio nell'Adda. La torbidità dell'acqua, ben evidenziata dal particolare della Figura 137, indica che questo canale raccoglie non solo acque di falda, ma anche acque provenienti dai colti dei campi che si trovano nelle immediate vicinanze del canale. A poche centinaia di metri dal canale è stata visitata anche una cava abbandonata, in cui si può osservare l'emergenza di acqua di falda (Figura 138).



Figura 136. Canale di gronda ai piedi del terrazzo principale dell'Adda.

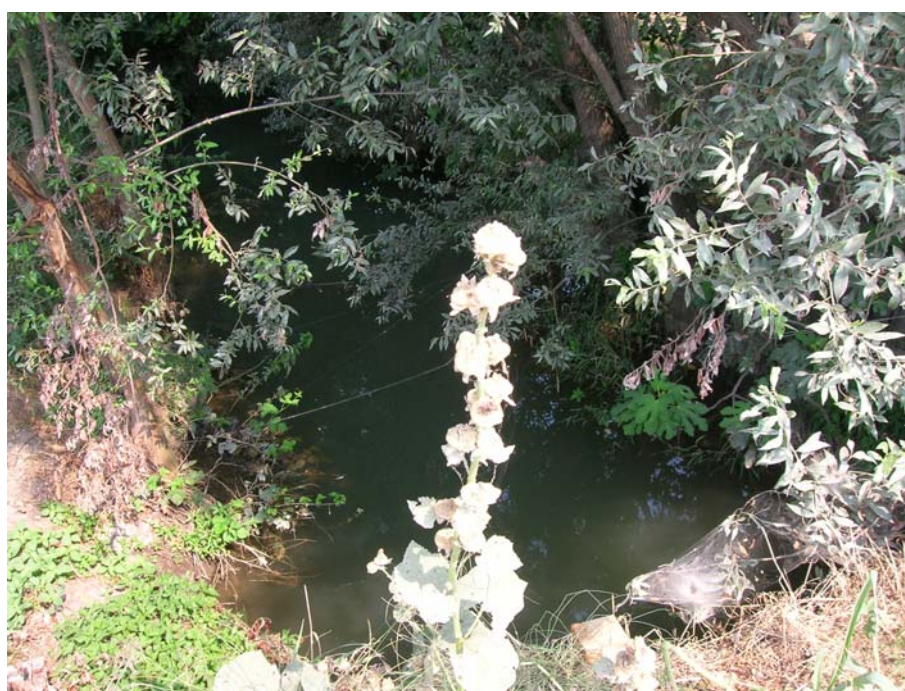


Figura 137. Canale di gronda ai piedi del terrazzo principale dell'Adda - particolare.



Figura 138. Cava in località Formigara.

9.3.1.4 Pianalto di Melotta

Questa struttura è particolarmente interessante dal punto di vista geologico e geomorfologico. Peraltro è da segnalare l'assenza di pozzi per acqua e la presenza di un unico canale, il Naviglio della Melotta, che, derivando acque dal fiume Oglio una dozzina di chilometri a nord di questa zona, raggiunge l'area e la attraversa lungo la "sommità" del pianalto con direzione nord-sud, per poi immettersi sul livello fondamentale della pianura a sud di questa struttura.

Le principali ipotesi geologiche suggerite per questa struttura sono due. La prima prevede che questa struttura sia un pianalto pleistocenico che si eleva dalle alluvioni glaciali (Wurm-Riss) con suoli di probabile origine loessica che si presentano parzialmente ferrettizzati. In questo caso ci si dovrebbe aspettare che le caratteristiche idrodinamiche dei sedimenti siano diverse da quelle delle zone circostanti, in particolare, ci si potrebbe aspettare una minore conducibilità idraulica e quindi questa struttura potrebbe costituire un "blocco" per la circolazione idrica sotterranea. La seconda prevede invece che si tratti di un esempio di tettonica recente, ovvero che i sedimenti, coevi di quelli delle zone circostanti, siano stati innalzati per processi tettonici profondi che sono arrivati a interessare le strutture più superficiali. In questo caso le caratteristiche idrodinamiche di questi sedimenti non dovrebbero essere molto diverse da quelle delle aree circostanti, anche se potrebbero cambiare spessori dei diversi livelli e profondità delle superfici di discontinuità. Non essendo disponibili dati piezometrici in questa area non è possibile discriminare sulla base di dati idraulici una delle due ipotesi.

9.3.1.5 Fontanile del "piano alto" della pianura (Acqua Fredda)

Questo fontanile, censito con il n. 187 da D'Auria e Zavagno (2005), presenta le tipiche caratteristiche dei fontanili posti nel piano alto della pianura, ovvero del livello fondamentale della pianura. Il fontanile è inserito in aree depresse (sede delle principali linee di flusso delle risorgive) nel bacino idrico del fiume Oglio. Si tratta di un fontanile profondo circa 3 m (Figura 139), con una testa di larghezza 3.5 m e senza tini (Figura 140).



Figura 139. Fontanile Acqua Fredda.



Figura 140. Fontanile Acqua Fredda – dettaglio della zona di risorgiva.

9.3.1.6 Sorgenti al piede dei terrazzi del Fiume Oglio

Infine sono state esaminate alcune sorgenti al piede dei terrazzi del fiume Oglio; in particolare la Figura 141 rappresenta una sorgente che drena in modo certo la falda acquifera e che non raccoglie, almeno nel periodo in cui è stata effettuata l'escursione, alcun colò di canali di irrigazione.



Figura 141. Sorgente al piede di un terrazzo del Fiume Oglio.

9.3.2 Prove di portata nel Comune di Treviglio

Per valutare correttamente il bilancio idrico del sistema acquifero è necessario vincolare con dati osservativi le stime dei flussi entranti nel dominio in studio dal bordo settentrionale. A questo scopo sono state analizzate le caratteristiche (profondità del pozzo e dei filtri, tipologia di utilizzo, sistema di pompaggio, colonna stratigrafica) di numerosi pozzi nei comuni della Provincia di Bergamo, immediatamente a ridosso della Provincia di Cremona per valutare i più adatti alla esecuzione di prove di portata. In questo modo intendevamo ottenere stime della trasmissività dell'acquifero con prove di campo.

Questa attività è stata svolta con la collaborazione dell'ing. Guido Chiesa, della società Cogeide S.p.A. e del Consorzio Irriguo della Media Pianura Bergamasca (CMPB). Dopo avere identificato una decina di pozzi che, sulla base delle indicazioni riportate negli archivi del CMPB, potevano essere adatti allo scopo, sono stati eseguiti due sopralluoghi durante i quali sono stati scelti per l'esecuzione delle prove due pozzi acquedottistici localizzati nel Comune di Treviglio. Non sono state effettuate prove su altri pozzi con utilizzo agricolo, perché ponevano problemi di tipo logistico-organizzativo, in qualche caso superabili solo con costi piuttosto elevati (necessità di richiedere un allacciamento temporaneo alla linea elettrica per eseguire le prove in periodi in cui non sia ancora avviata l'irrigazione; sistemazione dei canali per lo smaltimento delle portate estratte, spesso dell'ordine di 100 l/s, e per la misurazione di tali portate).

I pozzi scelti sono ubicati in via Terni e in via Acquedotto. Le caratteristiche principali dei due pozzi sono elencate nella Tabella 37. Le prove sono state eseguite tra il 28 novembre e il 5 dicembre 2006.

Tabella 37. Caratteristiche dei pozzi del comune di Treviglio in cui sono state eseguite le prove.

Pozzo	Via Terni	Via Acquedotto
Potenza (kW)	30	22
Avviamento	Diretto	Diretto/Con inverter
Portata massima	(m ³ /h)	130
	(l/s)	38
Prevalenza della pompa (m)	55	50
Livelli (soggiacenze in m dal p.c.) rilevati al collaudo del pozzo	statico	10.8
	dinamico	11.2
Profondità filtri (m)	45-54	35-45
Profondità pompa (m)	N/D	18

Il pozzo di via Terni è dotato di un timer che permette di impostare settimanalmente gli orari di accensione e spegnimento della pompa. In particolare la pompa viene accesa attorno alle 7:40 e viene spenta attorno alle 22:30. Questi orari non possono essere fissati con precisione, perché il timer è dotato di un sistema con marcatempo meccanici che non premettono una elevata precisione.

Il pozzo di via Acquedotto è invece dotato di un inverter che permette di variare la potenza della pompa e quindi la portata in modo tale da mantenere fissa la pressione dell'acqua nella rete di distribuzione. Pertanto quando si ha un forte consumo e una conseguente riduzione della pressione nella rete, il pozzo aumenta la propria portata.

Entrambi i pozzi sono dotati di un misuratore di portata. Il pozzo di via Acquedotto è stato attrezzato con un registratore di questo dato; invece per il pozzo di via Terni sono stati annotati i valori riportati dal contatore volumetrico per la portata e dal contatore delle ore di funzionamento, che erano pari a 114583 m³ e 4974.8 ore all'inizio della prova (ore 9:23 del 28/11/2006) e 127719 m³ e 5077 ore alla fine della prova (ore 10:09 del 05/12/2006). Si ottiene pertanto una portata media nei periodi di funzionamento pari a 128 m³/h=35.7 l/s. Il valore istantaneo della portata all'inizio della prova si è mantenuto per diversi minuti stabilmente pari a 126 m³/h, mentre quello letto alla fine della prova era pari a 131.5 m³/h.

Prima di iniziare le prove è stato misurato il livello statico in entrambi i pozzi con un sondino manuale; le soggiacenze misurate dalla bocca pozzo erano di 11.19 e 10.21 m rispettivamente per i pozzi di via Terni (Figura 142) e di via Acquedotto (Figura 143). Per il pozzo di via Acquedotto è stato misurato anche il livello dinamico con il pozzo in funzione con una portata di 63 m³/h=17.5 l/s, con una soggiacenza di 10.48 m.



Figura 142. Misurazione del livello statico nel pozzo di via Terni.



Figura 143. Pozzo di via Acquedotto. Si nota il cavo bianco fissato alla testa del pozzo con cui è stato calata la sonda.

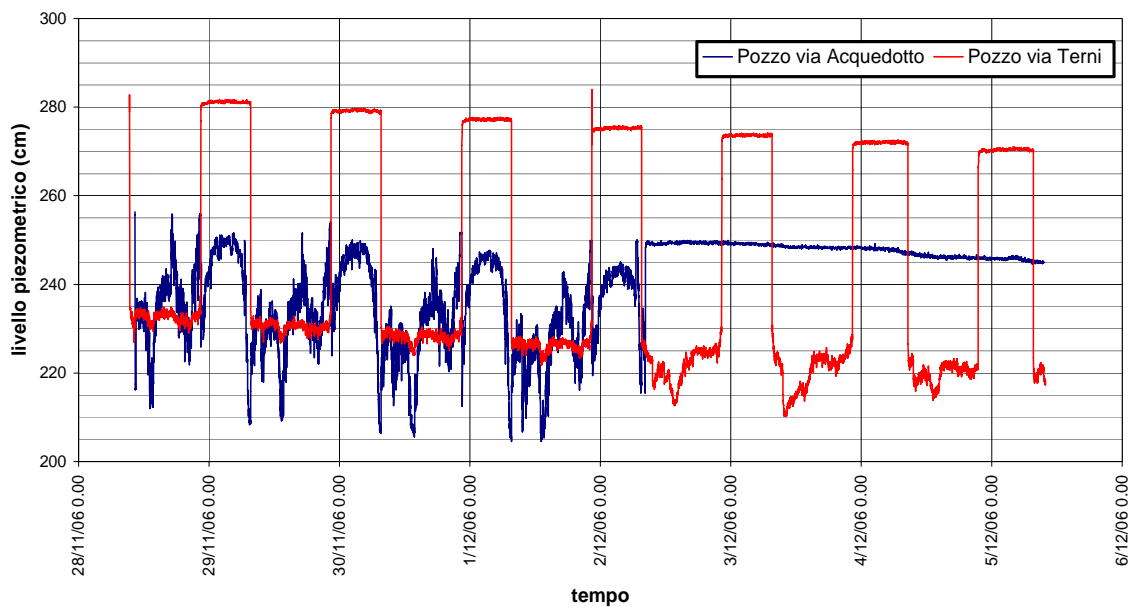


Figura 144. Andamento del livello piezometrico nel corso delle prove eseguite nei pozzi di Treviglio.

Nei due pozzi sono state calate sonde Mini-Diver prodotte da Eijelkamp, società del gruppo Schlumberger, per la misura della pressione (espressa come altezza in cm della colonna d'acqua equivalente) e della temperatura dell'acqua con risoluzione rispettivamente di 0.2 cm e di 0.01 °C. Una sonda Baro-Diver è stata installata presso il pozzo di via Terni per registrare le variazioni temporali della pressione atmosferica.

I risultati sono riportati in Figura 144 e mostrano in modo molto chiaro ed evidente l'andamento periodico nel pozzo di via Terni, legato all'accensione e spegnimento della pompa e una variabilità del livello più irregolare nel pozzo di via Acquedotto, legata al funzionamento automatico della pompa.

In particolare per quest'ultimo pozzo la Figura 144 mette bene in evidenza la correlazione inversa tra la portata estratta e la pressione dell'acqua nel pozzo. La Figura 145 mostra che il pozzo di via Acquedotto è rimasto spento dalle ore 9 del 2 dicembre fino al termine della prova. Per questo pozzo non sono state eseguite elaborazioni, a causa della irregolare variabilità della portata e quindi della pressione dell'acqua nel pozzo. Invece i dati del pozzo di via Terni sono stati usati per determinare una stima della trasmissività dell'acquifero. Notiamo infine che entrambi i pozzi mostrano una tendenza alla diminuzione della pressione piuttosto regolare nel corso della settimana della prova. Dai dati del pozzo di via Terni è stata stimata una diminuzione della pressione corrispondente a circa 1.8 cm/giorno, un valore che avrà una influenza trascurabile sulle elaborazioni successive e che indica o una lenta variazione temporale del livello della falda a larga scala, evidenziata anche dal comportamento del sensore installato nel pozzo di via Acquedotto, o una deriva strumentale.

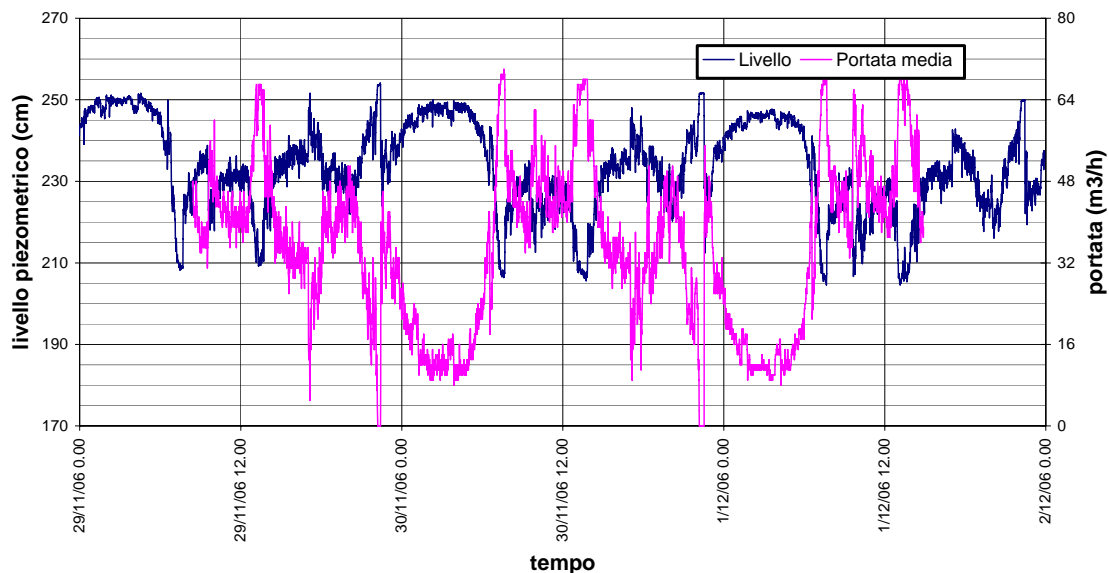


Figura 145. Confronto tra l'andamento della pressione dell'acqua nel pozzo di via Acquedotto (curva blu, asse a sinistra) e della portata media in un minuto della pompa (curva fucsia, asse a destra).

Per ogni episodio di accensione o spegnimento della pompa nel pozzo di via Terni è stata applicata la seguente procedura:

- (1) è stato identificato l'istante in cui la pompa è stata accesa o spenta, attraverso l'analisi dei dati di livello dell'acqua nel pozzo;

- (2) è stata calcolata la media del livello nei cinque minuti precedenti all'accensione/spegnimento della pompa;
- (3) è stato calcolato l'abbassamento o l'innalzamento del livello nei 15 minuti seguenti l'accensione o lo spegnimento della pompa.

In questo modo sono state ottenute sette curve di risalita e altrettante curve di abbassamento del livello nel pozzo che sono state interpretate con il metodo di Theis. Le curve di risalita e di abbassamento ottenute come media di queste sette curve sono rappresentate in Figura 146, dove l'asse delle ascisse riporta i tempi in scala logaritmica. L'ampiezza delle barre di errore è pari a due volte la deviazione standard dei dati; si noti in particolare il valore molto elevato della deviazione standard per la curva di risalita corrispondente a 1 minuto, dovuta al dato anomalo in corrispondenza della risalita del 1 dicembre 2006.

Il metodo di Theis è applicabile a rigore per un acquifero confinato, mentre in questa zona l'acquifero è freatico. Però le variazioni del livello della tavola d'acqua sono mediamente inferiori a 50 cm (Figura 146) nel corso dei 15 minuti delle prove di abbassamento e risalita e quindi trascurabili rispetto allo spessore dell'acquifero stesso che è di qualche decina di metri. La risposta del sistema è molto veloce e già dopo pochi minuti le curve di risalita e di abbassamento mostrano un andamento logaritmico nel tempo, per cui potrebbe essere applicato anche il metodo di Jacob. Le due tecniche portano a risultati molto simili e forniscono un valore di trasmissività pari a $0.14 \text{ m}^2/\text{s}$.

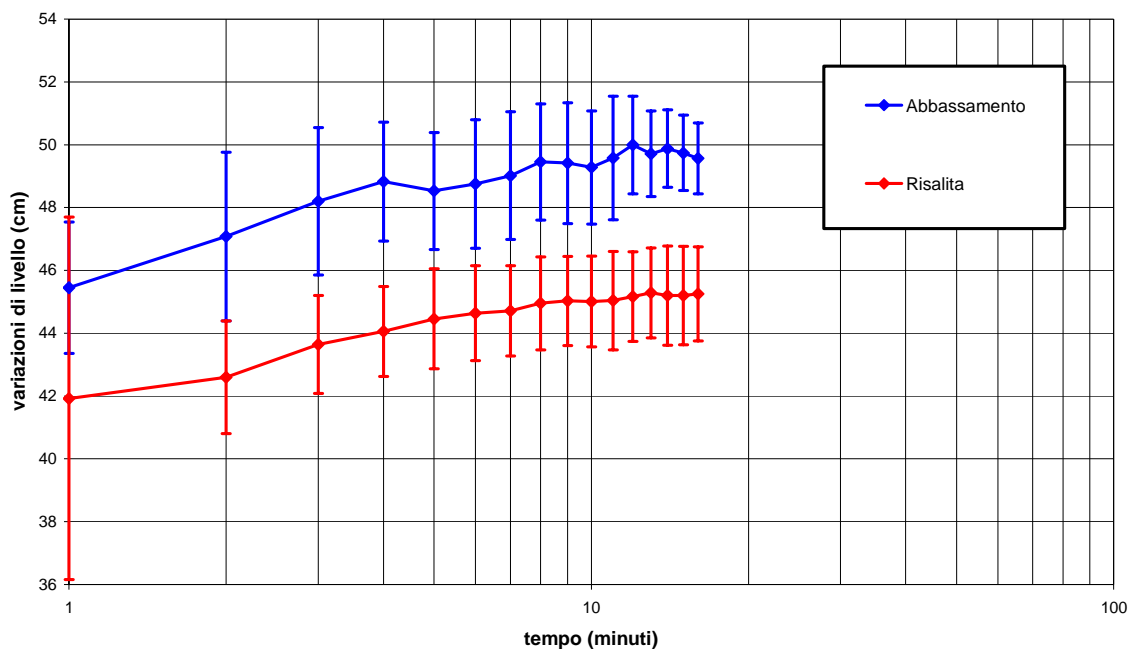


Figura 146. Curve di abbassamento (in blu) e risalita (in rosso) stimate per il pozzo di via Terni.

9.4 Elenco delle tavole allegate

- Tavola 1. Isoipse della superficie topografica (equidistanza 5 m).
- Tavola 2. Mappa dei terrazzi geomorfologici (da www.atlanteambientale.it).
- Tavola 3. (a) Curve isopiezometriche dell'acquifero freatico (stagione invernale; equidistanza 5 m). I dati usati per l'interpolazione sono riportati nella tabella C1(a) della relazione finale della prima fase. (b) Curve isopiezometriche dell'acquifero freatico (stagione estiva; equidistanza 5 m). I dati usati per l'interpolazione sono riportati nella tabella C1(b) della relazione finale della prima fase.
- Tavola 4. Piezometria di riferimento dell'acquifero freatico (condizione pseudo-stazionaria media del triennio 2001-2003; equidistanza 5 m).
- Tavola 5. Carta dei gradienti idraulici medi dell'acquifero freatico.
- Tavola 6. Carta delle soggiacenze dell'acquifero freatico.
- Tavola 7. (a) Curve isopiezometriche dell'acquifero semi-confinato (stagione invernale; equidistanza 5 m). I dati usati per l'interpolazione sono riportati nella tabella C2(a) della relazione finale della prima fase. (b) Curve isopiezometriche dell'acquifero semi-confinato (stagione estiva; equidistanza 5 m). I dati usati per l'interpolazione sono riportati nella tabella C2(b) della relazione finale della prima fase.
- Tavola 8. Trasmissività dell'acquifero semi-confinato ottenute da prove in pozzo.
- Tavola 9. Conducibilità idrauliche dei livelli permeabili filtrati dai pozzi per acqua.
- Tavola 10. Portate specifiche ottenute da prove in pozzo.
- Tavola 11. Distribuzione dei punti di prelievo idrico per uso acquedottistico gestiti da Padania Acque S.p.A..
- Tavola 12. (a) Profondità della base del modello rispetto al piano campagna. (b) Quota della base del modello.
- Tavola 13. Quota della base dell'acquifero freatico equivalente, coincidente con la superficie di separazione tra la porzione superficiale e quella profonda del sistema acquifero.
- Tavola 14. Spessore dei sedimenti permeabili del freatico.
- Tavola 15. Frazione di sedimenti poco permeabili nei primi 50 m sotto la base dell'acquifero freatico equivalente.
- Tavola 16. Spessore dei sedimenti permeabili dell'acquifero semi-confinato.
- Tavola 17. Trasmissività equivalenti dell'acquifero semi-confinato.
- Tavola 18. Zonazione del sistema acquifero.
- Tavola 19. Rete di monitoraggio.

9.5 Equazioni discrete dei modelli numerici di flusso

I modelli di flusso utilizzati per questo lavoro si basano su una discretizzazione conservativa alle differenze finite dell'equazione di bilancio in forma integrale. Questo approccio garantisce che il bilancio di massa sia automaticamente soddisfatto dal modello numerico, se la soluzione del sistema di equazioni algebriche del modello discreto è calcolata correttamente.

In questa appendice vengono richiamate in modo sintetico le equazioni che permettono di simulare il flusso idrico in un acquifero disperdente, con l'approssimazione di flusso quasi-3D e transitorio.

Il dominio viene discretizzato con un certo numero di blocchi, la cui base è quadrata e di lato pari al passo di discretizzazione, come rappresentato schematicamente in Figura 147. Al centro di ogni blocco viene considerato un nodo; i nodi e i blocchi possono essere individuati con opportuni indici. Nell'esempio di Figura 147 abbiamo utilizzato l'indice C per il blocco su cui viene valutato il bilancio di massa e gli indici N , E , S e W , per indicare i blocchi adiacenti nel medesimo acquifero e gli indici U e D per indicare i blocchi adiacenti rispettivamente negli acquiferi sovrastante e sottostante. Le zone in grigio della Figura 147 rappresentano gli acquitardi che collegano i diversi acquiferi.

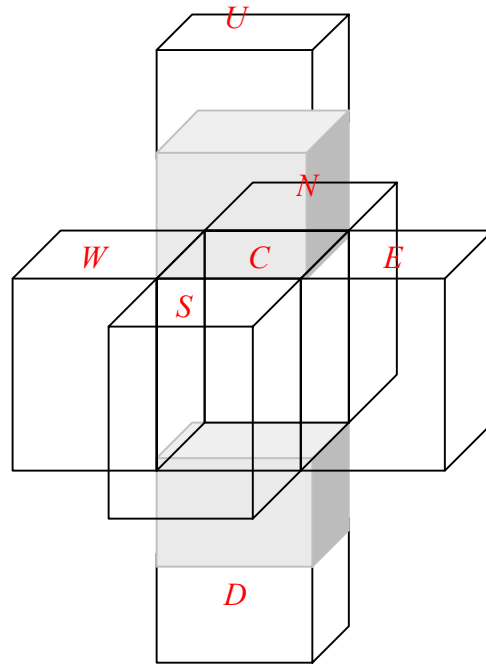


Figura 147. Schema di una cella.

Lo spessore saturo di ogni blocco coincide con lo spessore dell'acquifero per un acquifero confinato e viene calcolato come differenza tra la quota della tavola d'acqua e la quota della base dell'acquifero stesso per un acquifero freatico.

Lo schema discreto utilizzato viene ricavato semplicemente dalla applicazione del principio di conservazione della massa e da una generalizzazione al caso discreto della legge di Darcy. Indicando con $M(t)$ la massa di acqua contenuta nel blocco C al tempo t , con $\Phi_{XC}(t)$ la portata che entra nel blocco C attraverso la superficie che lo separa dal blocco X al tempo t e con $F_C(t)$ la somma di tutti i termini di sorgente (portate estratte dai pozzi, ricarica per infiltrazione dalla superficie, scambi fiume-falda) presenti nel blocco in esame allo stesso istante temporale, applicando il principio di conservazione della massa possiamo scrivere:

$$(9.5.1) \quad M(t + \Delta t) - M(t) = \int_t^{t+\Delta t} [\Phi_{NC}(t') + \Phi_{EC}(t') + \Phi_{SC}(t') + \Phi_{WC}(t') + \Phi_{UC}(t') + \Phi_{DC}(t') - F_C(t')] dt'$$

Le portate Φ_{XC} vengono legate ai valori del potenziale nei nodi attraverso una generalizzazione della legge di Darcy:

$$(9.5.2) \quad \Phi_{XC} = T_{XC}(h_X - h_C),$$

dove T_{XC} prende il nome di trasmissività internodo o interblocco e viene calcolata come descritto di seguito.

- Se $X \in \{N, S, E, W\}$
 - T_{XC} è uguale alla media armonica delle trasmissività dei blocchi X e C , per un acquifero confinato;
 - T_{XC} è uguale al prodotto tra la media armonica delle conducibilità e la media aritmetica degli spessori dell'acquifero nei blocchi X e C , per un acquifero freatico;
- Se $X \in \{U, D\}$, allora $T_{XC} = (K_s/b_s)\Delta x^2$, dove K_s e b_s sono rispettivamente la conducibilità e lo spessore del setto semipermeabile (o acquitardo) che collega il blocco X con il blocco C e Δx è la spaziatura della griglia di discretizzazione, cioè il lato della base dei blocchi. Nel paragrafo 5.3 si fa riferimento a questa quantità come coefficiente di leakage e viene indicato con σ .

L'integrale del membro di destra della (9.5.1) viene approssimato con uno schema del tipo di Crank-Nicolson nel modo seguente:

$$(9.5.3) \quad \int_t^{t+\Delta t} [\Phi_{NC}(t') + \Phi_{EC}(t') + \Phi_{SC}(t') + \Phi_{WC}(t') + \Phi_{UC}(t') + \Phi_{DC}(t') - F_C(t')] dt' \cong \frac{1}{2} \{ [\Phi_{NC}(t + \Delta t) + \Phi_{EC}(t + \Delta t) + \Phi_{SC}(t + \Delta t) + \Phi_{WC}(t + \Delta t) + \Phi_{UC}(t + \Delta t) + \Phi_{DC}(t + \Delta t)] + [\Phi_{NC}(t) + \Phi_{EC}(t) + \Phi_{SC}(t) + \Phi_{WC}(t) + \Phi_{UC}(t) + \Phi_{DC}(t)] \} - \int_t^{t+\Delta t} F_C(t') dt'$$

L'accumulo di massa che compare nel membro di sinistra della (9.5.1) viene approssimato come:

$$(9.5.4) \quad M(t + \Delta t) - M(t) = S_C [h_C(t + \Delta t) - h_C(t)] \Delta x^2,$$

dove S_C è pari alla porosità efficace equivalente del blocco C nel caso di acquifero freatico e pari al prodotto dell'immagazzinamento specifico equivalente del blocco per lo spessore dello stesso nel caso di acquifero semi-confinato.

Sostituendo le (9.5.2), (9.5.3) ed (9.5.4) nella (9.5.1) si ottiene l'equazione fondamentale del modello:

$$\begin{aligned}
S_C [h_C(t + \Delta t) - h_C(t)] \Delta x^2 = & \frac{1}{2} \{ [T_{NC}(h_N(t) - h_C(t)) + T_{EC}(h_E(t) - h_C(t)) + \\
& + T_{SC}(h_S(t) - h_C(t)) + T_{WC}(h_W(t) - h_C(t)) + T_{UC}(h_U(t) - h_C(t)) + T_{DC}(h_D(t) - h_C(t))] + \\
(9.5.5) \quad & + [T_{NC}(h_N(t + \Delta t) - h_C(t + \Delta t)) + T_{EC}(h_E(t + \Delta t) - h_C(t + \Delta t)) + \\
& + T_{SC}(h_S(t + \Delta t) - h_C(t + \Delta t)) + T_{WC}(h_W(t + \Delta t) - h_C(t + \Delta t)) + \\
& + T_{UC}(h_U(t + \Delta t) - h_C(t + \Delta t)) + T_{DC}(h_D(t + \Delta t) - h_C(t + \Delta t))] \} - \int_t^{t+\Delta t} F_C(t') dt'
\end{aligned}$$

Scrivendo una equazione come la (9.5.5) per ogni blocco interno si ottiene un sistema di equazioni algebriche rispetto alle altezze piezometriche nei nodi. Il sistema è non lineare perché T_{XC} dipende dallo spessore dell'acquifero e quindi da h_C nei blocchi dell'acquifero freatico.

L'equazione (9.5.5) si semplifica nel caso del modello per il flusso in un acquifero monostrato equivalente, perché non compaiono gli ultimi due addendi del membro di sinistra, che rappresentano gli scambi verticali attraverso gli acquitardi, che non vengono considerati in un modello di flusso bidimensionale.

Analogamente per un modello in condizioni stazionarie, l'equazione si semplifica perché tutti i termini che compaiono nella stessa non dipendono dal tempo.

In particolare, nel caso più semplice di un acquifero monostrato in condizioni stazionarie l'equazione (9.5.5) si riduce alla forma

$$(9.5.6) \quad T_{NC}(h_N - h_C) + T_{EC}(h_E - h_C) + T_{SC}(h_S - h_C) + T_{WC}(h_W - h_C) = F_C.$$

9.6 Groundwater Modeling System

9.6.1 L'ambiente di sviluppo del modello

Il Groundwater Modeling System (GMS)¹⁰ è un pacchetto software dedicato allo sviluppo di studi modellistici per le acque sotterranee ed include in un unico ambiente tutti gli strumenti necessari. Il GMS è costituito da una interfaccia grafica per la gestione dei dati in ingresso e dei risultati, da programmi per l'elaborazione dei dati e da alcuni tra i modelli maggiormente provati e riconosciuti come standard a livello internazionale.

In particolare l'interfaccia GMS si compone di 10 moduli, per la descrizione dei quali si rimanda alla relativa documentazione (<http://www.ems-i.com>) e il cui utilizzo consente la più ampia condivisione di dati ed informazioni attraverso alcune funzionalità tipiche di un GIS.

Tra gli altri ricordiamo i pacchetti di geostatistica, che permettono l'interpolazione geostatistica dei dati osservativi distribuiti nello spazio in modo irregolare sulla griglia di discretizzazione del modello.

Infine il modello scelto per la simulazione è stato MODFLOW, le cui caratteristiche principali sono descritte nel prossimo paragrafo.

9.6.2 Il modello MODFLOW

GMS contiene una completa interfaccia grafica per il modello di flusso delle acque sotterranee MODFLOW-2000. MODFLOW è un modello tridimensionale che risolve le equazioni del flusso saturo in regime di moto stazionario e transitorio col metodo delle differenze finite. MODFLOW è stato sviluppato dallo USGS (United States Geological Survey) nel 1988 (McDonald & Harbaugh, 1988). MODFLOW-2000 rappresenta la versione più recente del codice (Harbaugh *et al.*, 2000).

L'equazione differenziale alle derivate parziali che descrive il flusso in un mezzo poroso eterogeneo e anisotropo¹¹ e in condizioni non stazionarie è la seguente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_o \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_o \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - Q = S_s \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

dove:

- K_o e K_v sono le conducibilità idrauliche in direzione orizzontale, nel piano x - y , e verticale, lungo l'asse z (LT^{-1});
- ϕ è il carico idraulico o altezza piezometrica o potenziale di Hubbert (L);
- Q è il termine di sorgente, cioè il volume di acqua estratta per unità di volume del mezzo poroso (T^{-1});
- S_s è il coefficiente di immagazzinamento specifico (L^{-1}).

Questa equazione è limitata alle condizioni di mezzo poroso saturo, altrimenti dovrebbe essere modificata per tenere conto di diversi fattori:

- nella definizione del potenziale di Hubbert per un mezzo parzialmente saturo comparirebbe il potenziale di matrice che dipende a sua volta dal contenuto volumetrico di acqua, tramite la curva caratteristica del terreno;

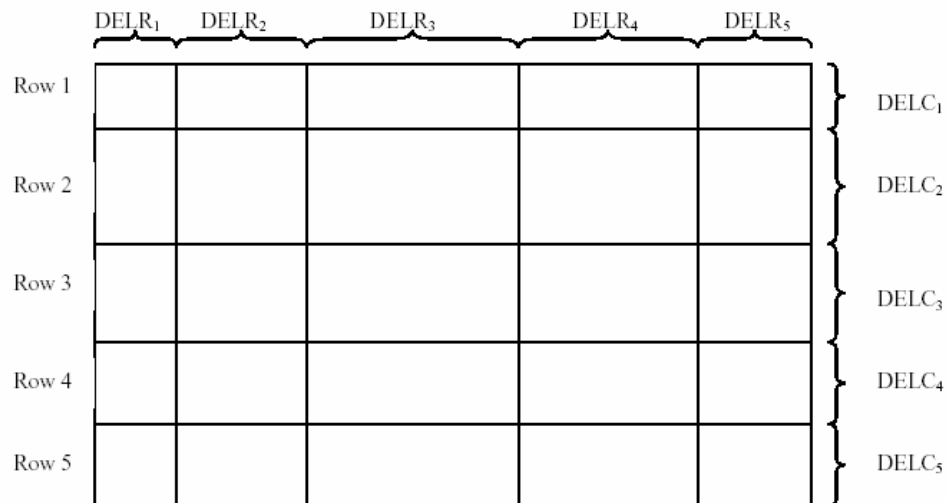
¹⁰ È stata utilizzata la versione 6.0 del pacchetto GMS, sviluppato dal Environmental Modeling Research Laboratory della Brigham Young University (Utah).

¹¹ Assumiamo qui che il mezzo sia eterogeneo e anisotropo alla scala considerata, con un asse principale verticale (direzione a cui corrisponde la conducibilità idraulica minima) e una sostanziale isotropia nel piano orizzontale (direzione a cui corrisponde la conducibilità idraulica massima).

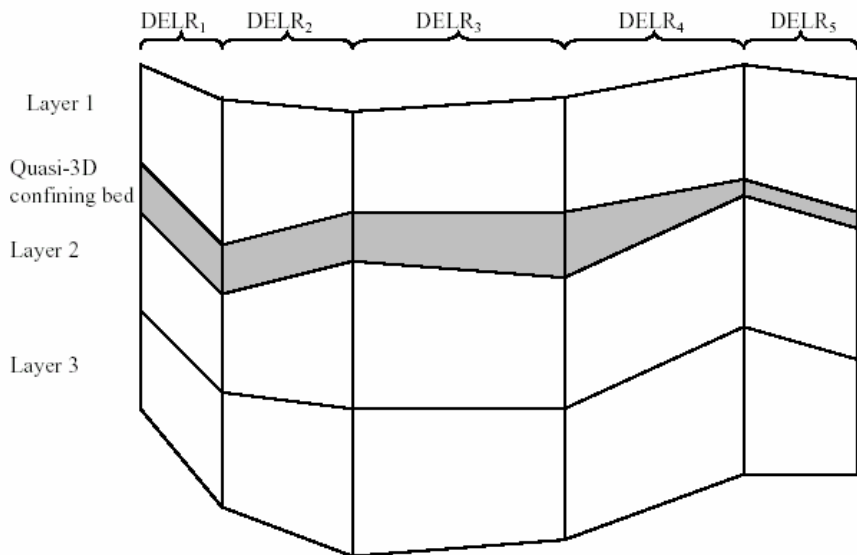
- la conducibilità idraulica dipenderebbe dal potenziale di matrice;
- il coefficiente di immagazzinamento specifico verrebbe sostituito dalla capacità idraulica, che è anch'essa un parametro dipendente dal contenuto volumetrico di acqua.

La soluzione dell'equazione richiederebbe quindi molte più informazioni.

Il codice MODFLOW risolve una versione discreta della equazione precedente, con uno schema alle differenze finite conservativo, applicato ad un reticolo di discretizzazione, la cui geometria viene rappresentata nella Figura 148.



(A) Plan View



(B) Cross section along row i.

Figura 148. schematizzazione della griglia di discretizzazione utilizzata:
(A) vista in pianta, (B) sezione verticale. Da Harbaugh et al. (2000)

Al centro di ogni cella è posto un nodo, dove viene calcolata l'altezza piezometrica. L'equazione alle differenze finite per una cella è data da uno schema conservativo, implicito nel tempo, ed è espressa da (McDonald & Harbaugh, 1988, pag. 2-18):

$$\begin{aligned}
& CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
& + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
& + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\
& + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\text{DELR}_j \times \text{DELC}_i \times \text{THICK}_{i,j,k}) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}
\end{aligned}$$

dove

- $h_{i,j,k}^m$ è l'altezza piezometrica del nodo i,j,k al passo temporale m -esimo (L);
- CV, CR e CC sono le conduttanze idrauliche fra il nodo i,j,k e un nodo adiacente (L^2/T);
- $P_{i,j,k}$ è la somma dei coefficienti dell'altezza piezometrica relativi a termini di sorgente, ad esempio, per tenere conto degli scambi con il reticolo idrografico di superficie (L^2/T);
- $Q_{i,j,k}$ è la somma dei termini di sorgente costanti, cioè indipendenti dall'altezza piezometrica, con $Q_{i,j,k} < 0$ quando l'acqua viene estratta dal sistema acquifero e $Q_{i,j,k} > 0$ quando l'acqua viene immessa (L^3/T);
- $SS_{i,j,k}$ è l'immagazzinamento specifico (L^{-1});
- DELR_j è l'ampiezza delle celle della colonna j , uguale per tutte le righe, (L);
- DELC_i è l'ampiezza delle celle della riga i , uguale per tutte le colonne (L);
- $\text{THICK}_{i,j,k}$ è lo spessore verticale della cella i,j,k (L);
- t_m è il tempo al passo temporale m -esimo (T).

Per indicare le conduttanze idrauliche tra celle, distinguendole dalla conducibilità idraulica di ciascuna cella, viene usata la notazione "1/2" nel pedice: ad esempio, $CR_{i,j+1/2,k}$ rappresenta la conduttanza fra i nodi i,j,k e $i,j+1,k$.

Quando viene simulato un flusso stazionario, le grandezze non variano nel tempo e quindi il termine di destra della equazione è identicamente nullo.

I termini dell'equazione precedente possono essere modificati quando la cella è solo parzialmente satura o addirittura secca, per effetto della variazione temporale e spaziale della quota della tavola d'acqua in risposta a diverse sollecitazioni dei termini di sorgente. MODFLOW-2000 permette di indicare quali celle siano da considerarsi "convertibili", ovvero per quali celle si può verificare che l'altezza piezometrica diventi inferiore alla quota del tetto della cella stessa. Quando ciò accade la cella è solo parzialmente satura e MODFLOW-2000 modifica i parametri della equazione tenendo conto del solo spessore saturo della cella. Quando la cella risulta addirittura asciutta, questa viene trasformata in una cella a flusso nullo.

Scrivendo una equazione algebrica come la precedente per ogni cella del reticolo di discretizzazione si ottiene un sistema di equazioni algebriche non-lineare; la non-linearità è introdotta dal fatto di considerare celle "convertibili". Assegnando opportune condizioni al contorno, raggruppando i valori delle altezze piezometriche in un vettore \mathbf{x} , raggruppando i coefficienti dei termini di sorgente e delle condizioni al contorno indipendenti dall'altezza piezometrica in un vettore \mathbf{b} , il sistema da risolvere assume la forma: $\mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{x}=\mathbf{b}$, dove \mathbf{A} è una matrice quadrata, sparsa e simmetrica.

Per una trattazione più generale delle tecniche di soluzione di sistemi di equazioni algebriche si rimanda alla letteratura scientifica specifica e per quanto riguarda ulteriori informazioni sugli algoritmi implementati nel programma MODFLOW si rimanda a Hill

(1990). Qui ricordiamo solo le proprietà fondamentali dell'algoritmo implementato nel programma MODFLOW.

La soluzione approssimata del precedente sistema di equazioni viene cercata con un algoritmo iterativo "con due cicli" (metodo di Picard), secondo lo schema rappresentato nella carta di flusso della Figura 149.

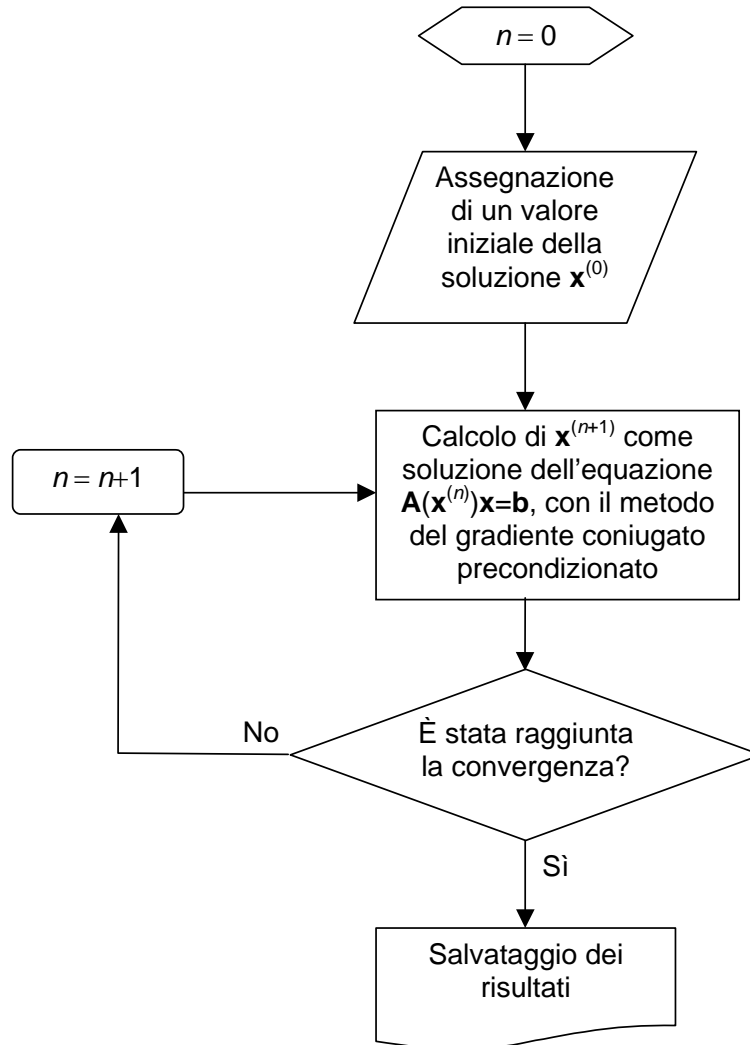


Figura 149. Carta di flusso dell'algoritmo utilizzato da MODFLOW per la soluzione del sistema di equazioni non-lineari ottenuto dalla discretizzazione delle equazioni di bilancio.

Nello schema di Figura 149 è rappresentato esplicitamente il ciclo esterno dell'algoritmo; il ciclo interno è invece "nascosto" nella determinazione di $\mathbf{x}^{(n+1)}$ come soluzione del sistema di equazioni algebriche lineari $\mathbf{A}(\mathbf{x}^{(n)})\mathbf{x}^{(n+1)}=\mathbf{b}$ con il metodo del gradiente coniugato preconditionato.

È importante sottolineare che la forma della matrice dell'idraulica, \mathbf{A} , è tale da garantire che, nel caso di un problema lineare con opportune condizioni al contorno, ad esempio per lo studio del flusso in un acquifero confinato con condizioni al contorno di potenziale imposto (Dirichlet), la soluzione del sistema di equazioni lineari $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$ esiste ed è unica. Essa può essere ottenuta con metodi diretti di soluzione (ad esempio, l'eliminazione gaussiana) o con metodi iterativi (ad esempio, il metodo del surrilassamento successivo, il metodo del gradiente coniugato semplice o preconditionato). In generale sono preferiti i metodi iterativi, poiché sfruttano meglio la caratteristica di \mathbf{A} di essere una matrice sparsa,

cioè una matrice in cui moltissimi elementi sono nulli; i teoremi dell'analisi numerica garantiscono che la soluzione trovata è indipendente dalla scelta dell'inizializzazione di questi algoritmi iterativi, cioè di $\mathbf{x}^{(0)}$. Se invece il problema è non-lineare, non è possibile garantire l'esistenza e l'unicità di una soluzione globale, ma i teoremi di esistenza e unicità della soluzione forniscono solo risultati locali. In altri termini, l'analisi numerica mostra che la soluzione di un sistema di equazioni algebriche non-lineari può essere ottenuta in modo univoco se l'inizializzazione, $\mathbf{x}^{(0)}$, è abbastanza vicina alla soluzione del sistema di equazioni. Queste difficoltà sono comuni ai diversi metodi di discretizzazione delle equazioni di flusso, anche se, ovviamente, cambia la matrice dei coefficienti e cambia quindi il numero di condizionamento che controlla la velocità di convergenza dell'algoritmo di soluzione.

La presenza di celle convertibili viene gestita da MODFLOW nell'ambito del ciclo esterno di Figura 149. In particolare al termine di ogni iterazione viene valutato se una cella completamente o parzialmente satura sia diventata completamente secca o viceversa se una cella precedentemente secca possa diventare almeno parzialmente satura (McDonald *et al.*, 1991). Questo introduce numerosi problemi, che possono riguardare sia la convergenza del metodo di Picard, che l'esistenza e unicità di una soluzione del problema (Valota *et al.*, 2002).

Un'altra importante osservazione relativa allo schema di Figura 149 è legata ai criteri di convergenza. Sia per il ciclo interno (quello della soluzione con il gradiente coniugato preconditionato) che per il ciclo esterno, vengono utilizzati due criteri per stabilire se l'algoritmo è giunto a convergenza. Il primo criterio richiede che il valore assoluto della differenza tra il potenziale ad una iterazione e alla iterazione precedente sia inferiore per tutti i nodi a un valore prefissato, ε_ϕ . Il secondo criterio prevede che il valore assoluto dell'errore di bilancio sia inferiore per tutti i nodi a un valore prefissato, ε_b .

I valori assegnati per questi parametri sono i seguenti:

- numero massimo di cicli esterni: 25;
- numero massimo di cicli interni: 50;
- ε_ϕ : 10^{-5} m;
- ε_b : 10^{-2} m³/s.

9.7 Il metodo del modello di confronto (CMM)

Il modello M²ME-CR è stato calibrato con il metodo del modello di confronto (CMM), le cui caratteristiche fondamentali vengono descritte in questa appendice.

Prima di richiamare brevemente le caratteristiche fondamentali del metodo, forniamo un elenco di simboli utilizzati nel seguito:

- Ω rappresenta il dominio orizzontale dell'acquifero e $\partial\Omega$ il suo bordo;
- $h^{(int)}$ è l'altezza piezometrica interpolata dalle osservazioni;
- $h^{(ref)}$ è l'altezza piezometrica di riferimento utilizzata per l'inversione e ottenuta attraverso l'applicazione di una media (filtro taglia alto nel dominio dei numeri d'onda) a $h^{(int)}$; osserviamo comunque che $h^{(ref)} = h^{(int)}$ su $\partial\Omega$;
- $T^{(0)}$ è il campo di trasmissività iniziale per il CMM;
- $h^{(CM)}$ è l'altezza piezometrica calcolata con il Modello di Confronto (CM), che verrà introdotto più avanti;
- $F^{(ref)}$ è il termine di sorgente di riferimento usato per l'inversione con il CMM e ottenuto dalla applicazione di una media (filtro taglia alto nel dominio dei numeri d'onda) a $F^{(abs)} - F^{(recharge)} + F^{(springs)} - F^{(channels)} + F^{(terraces)} + F^{(river)}$.

9.7.1 Caratteristiche del modello di confronto

Il CMM si basa sulla soluzione di un problema in avanti ausiliario, detto Modello di Confronto (CM, acronimo dell'espressione inglese Comparison Model), con le seguenti caratteristiche: la geometria è identica a quella del modello da calibrare, i termini di sorgente corrispondono a quelli di riferimento, $F^{(ref)}$, così come le condizioni al contorno, mentre il campo di trasmissività, $T^{(0)}$, è assegnato a priori. Il CM produce quindi la soluzione $h^{(CM)}$ del problema al contorno:

$$(9.7.1) \quad \begin{aligned} \nabla \cdot (T^{(0)} \nabla h^{(CM)}) &= F^{(ref)} \quad \text{su } \Omega \\ h^{(CM)} &= h^{(ref)} \quad \text{su } \partial\Omega \end{aligned}$$

Il CM è dunque una equazione ausiliaria che risolve un problema in avanti ben posto e genera quindi un assetto di $h^{(CM)}$ fisicamente consistente con la geometria dell'acquifero, le condizioni al contorno e le sorgenti. I gradienti idraulici calcolati da questo assetto piezometrico, da una parte servono come confronto coi gradienti calcolati dalla piezometria osservata ed interpolata per il calcolo delle trasmissività, e dall'altra sono stati utilizzati in questo lavoro come guida per facilitare l'individuazione di sottozone dell'acquifero dove i dati osservativi non sono fisicamente consistenti e vanno quindi corretti.

La stima della trasmissività equivalente di una generica maglia del modello, $T^{(est)}$, è ottenuta ipotizzando che le portate di transito nell'acquifero determinate dal CM coincidano con quelle reali. Nell'ipotesi che il prodotto $Q = TJ$ sia costante, dove Q è il modulo della portata di transito per unità di lunghezza nel sistema acquifero e $J = |\nabla h|$, allora $T^{(est)} J^{(est)} = T^{(0)} J^{(0)}$. Poiché la migliore stima del gradiente idraulico è data da $J^{(ref)}$ e $J^{(0)} \equiv J^{(CM)}$, allora il valore di trasmissività calcolato con il CMM è dato da:

$$(9.7.2) \quad T^{(est)} = T^{(0)} \left(\frac{|\nabla h^{(CM)}|}{|\nabla h^{(ref)}|} \right).$$

Il campo di trasmissività così stimato può essere utilizzato nuovamente come campo “iniziale” per un nuovo CM e questo porta ad una procedura iterativa con la quale si può progressivamente ridurre la differenza tra $h^{(ref)}$ e $h^{(CM)}$.

L'equazione (9.7.2) ha una semplice interpretazione basata sulla legge di Darcy, che possiamo distinguere in tre casi.

- Se $|\nabla h^{(ref)}| \cong |\nabla h^{(CM)}|$, allora possiamo ritenere che $T^{(0)}$ sia molto vicino al valore reale e in questo caso $T^{(est)} \cong T^{(0)}$.
- Se invece $|\nabla h^{(ref)}| > |\nabla h^{(CM)}|$, allora è probabile che il valore di trasmissività assegnato sia troppo alto e quindi vada diminuito; in questo caso dalla (9.7.2) si vede che $T^{(est)} < T^{(0)}$.
- Se infine $|\nabla h^{(ref)}| < |\nabla h^{(CM)}|$, allora è probabile che il valore di trasmissività assegnato sia troppo basso e quindi vada alzato; in questo caso dalla (9.7.2) si vede che $T^{(est)} > T^{(0)}$.

Per tenere conto del fatto che nelle zone dove il gradiente idraulico di riferimento è più basso, la stabilità dell'inversione è peggiore, la formula (9.7.2) è stata leggermente modificata in analogia a quanto suggerito, ad es. da Ponzini & Lozej (1982). In particolare la correzione apportata a $T^{(0)}$ è data da:

$$(9.7.3) \quad T^{(est)} = T^{(0)} \left(\frac{|\nabla h^{(CM)}|}{|\nabla h^{(ref)}|} + 1 - \beta \right),$$

dove β è un “parametro di smorzamento” compreso tra 0 e 1, calcolato come rapporto tra il modulo del gradiente idraulico di riferimento e la media dello stesso su tutta l'area del modello.

9.7.1.1 Osservazioni sul calcolo dei gradienti idraulici

Nel caso discreto le componenti del gradiente idraulico sono calcolate con la tecnica delle differenze finite; in questo lavoro sono state utilizzate differenze in avanti o centrate, scegliendo per ogni cella il metodo che dà il gradiente idraulico maggiore, tranne che lungo il contorno dove sono state usate differenze finite in avanti o all'indietro. Questa scelta permette di evitare i problemi che possono sorgere usando l'approssimazione del secondo ordine data dalle differenze centrate in alcune situazioni particolari, ad esempio in presenza di un minimo del potenziale prodotto da termini di sorgente molto intensi. In questi casi, infatti, le differenze finite centrate stimano gradienti idraulici bassi, vicini a zero, che non risultano rappresentativi delle portate di transito tra celle adiacenti. Per spiegare questo concetto usiamo l'esempio ipotetico di Figura 150.

I valori di piezometria in tre nodi lungo uno degli assi cartesiani sono rappresentati con la linea blu. I punti verdi mostrano il valore del gradiente idraulico discreto calcolato con le differenze finite in avanti, che passa da negativo a positivo andando da sinistra a destra del nodo 2. Invece il gradiente idraulico calcolato con le differenze finite centrate, rappresentato in rosso, è molto vicino a 0. Dal punto di vista del CMM la scelta delle differenze in avanti permette di tenere in conto il fatto che c'è un flusso convergente verso il nodo 2 sia da destra che da sinistra, mentre con le differenze centrate si sarebbe condotti a ipotizzare una assenza di portate di transito verso quel nodo, il che può portare a risultati fisicamente inconsistenti nella calibrazione.

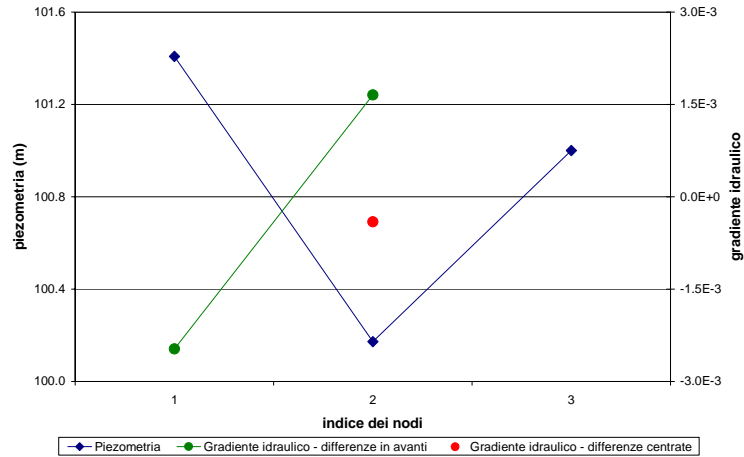


Figura 150. Andamento ipotetico della piezometria lungo una direzione e gradiente idraulico discreto calcolato con differenti schemi alle differenze finite.

9.7.1.2 Determinazione del campo di trasmissività iniziale

Il campo $T^{(0)}$ è costruito assegnando in ogni cella il valore di trasmissività τ che minimizza la funzione $f(\tau) = |\nabla H(\tau) - \nabla h^{(ref)}|^2$, dove $H(\tau)$ è la soluzione del problema al contorno

$$(9.7.4) \quad \begin{aligned} \tau \nabla^2 H &= F^{(0)} \quad \text{su } \Omega \\ H &= h^{(ref)} \quad \text{su } \partial\Omega \end{aligned}$$

Il termine di sorgente, $F^{(0)}$, è dato dal filtro taglia-alto di $F^{(abs)} - F^{(recharge)} + F^{(springs)} + F^{(terraces)} + F^{(serio)} - F^{(channels)}$, con i termini di drenaggio dai fontanili, dai terrazzi e dal fiume Serio calcolati con le formule descritte nel paragrafo 5.1.2.1 utilizzando come altezza piezometrica quella di riferimento. Inoltre è stato posto il vincolo che $\tau < \tau_{max}$, per evitare che τ assuma valori poco realistici.

Grazie ad un elevato numero di prove è stato possibile individuare questo criterio di calcolo di $T^{(0)}$ come il migliore tra quelli provati; i risultati di queste prove sono descritti diffusamente nella relazione intermedia della prima fase del lavoro e non vengono riportati in questa relazione per non appesantire la trattazione.

Per ognuna delle prove richiamate nel paragrafo 5.2.2.2, risolviamo il problema in avanti:

$$(9.7.5) \quad \begin{aligned} \nabla \cdot (T^{(0)} \nabla h^{(0)}) &= F^{(abs)} - F^{(recharge)} + F^{(springs)} - F^{(channels)} + F^{(terraces)} + F^{(river)} \quad \text{su } \Omega \\ h^{(0)} &= h^{(ref)} \quad \text{su } \partial\Omega \end{aligned}$$

Osserviamo che $F^{(terraces)}$, $F^{(river)}$ e $F^{(springs)}$ dipendono da $h^{(0)}$. In alcuni casi questo può generare problemi di convergenza della soluzione del problema in avanti¹².

¹² L'algoritmo iterativo che calcola la soluzione approssimata è sommariamente descritto nell'Appendice 9.6. Nelle prove che prevedono la modellazione dei termini di drenaggio dai fontanili e dai terrazzi geomorfologici e di scambio fiume/falda, il sistema di equazioni da risolvere non è più lineare e ciò può porre problemi di soluzione. Infatti in alcuni casi l'algoritmo non permette di ricavare una approssimazione della soluzione che soddisfi i criteri di convergenza assegnati in un numero prefissato di iterazioni.

9.8 Simulazione geostatistica

Le indagini derivanti da perforazione di pozzi forniscono una buona densità di dati nella direzione verticale, ma non in quella orizzontale dove la distribuzione è spesso troppo rada per poter sviluppare buone correlazioni.

Basandosi sulla conoscenza delle proporzioni globali tra le facies, della lunghezza media delle lenti, dei processi sedimentari e di altre informazioni di carattere geologico è possibile ricostruire le superfici litostratigrafiche con l'ausilio di simulazioni matematiche. Generando una griglia 3D nell'area di studio è possibile utilizzare degli algoritmi per simulare la distribuzione spaziale delle litologie, ottenendone quindi un valore per ogni voxel. Esistono diversi software che permettono di fare queste simulazioni, di rappresentare ed elaborare i risultati ottenuti; tra essi si è scelto di utilizzare T-PROGS (Transition PROBability Geostatistical Software; Carle, 1999) che è inserito nel pacchetto GMS per la ricostruzione della distribuzione di facies e Rockware Rockworks per la rappresentazione grafica dei risultati.

Le codifiche litologiche della banca dati sono state semplificate e ridotte a 5 classi (il massimo permesso da T-PROGS), alle quali si farà riferimento in seguito usando il termine di "litotipi". In Tabella 38 sono riportate le 5 classi:

- Ghiaia: sono i sedimenti più grossolani (ghiaie, ghiaietto, conglomerati fessurati,...) che rappresentano i depositi fluviali;
- Sabbia media: comprende le sabbie, sabbie grossolane e sabbie medie tipiche dei processi sedimentari fluviali a basso regime;
- Sabbia fine e finissima: caratterizzano le zone di transizione tra i depositi fluviali e quelli della piana di esondazione.
- Argilla e limo;
- Altro: sono le litologie non comprese tra ghiaie, sabbie e argille.

Tabella 38. Caratteristiche delle principali idrofacies

Idrofacies	Interpretazione geologica	Composizione	Descrizione tipica	Proporzione volumetrica
<i>Ghiaia</i>	Fiume	Ghiaia da grossa a fine, ciottoli, ghiaietto, conglomerato fessurato	Ghiaia e sabbia, ghiaia con ciottoli e sabbia, ghiaia e ghiaietto	3.7%
<i>Sabbia media</i>	Vicinanze del fiume	Sabbie medie e grossolane	Sabbia granosa, sabbia con poco ghiaietto	40%
<i>Sabbia fine</i>	Prossimità della piana d'espansione	Sabbie da fini a finissime	Sabbia fine, sabbia grigia fine	6.5%
<i>Argilla e Limo</i>	Piana d'espansione	Argille, limi, torba, suolo, terreno vegetale	Argilla, argilla torbosa, argilla sabbiosa giallastra	49.7%
<i>Altro</i>	Materiale di superficie	Materiale organico, calcare, terra, lignite...	Terreno vegetale, terreno coltivabile	0.1%

T-PROGS affronta il problema con variabili indicatrici, cioè variabili di tipo descrittivo (i litotipi), e con funzioni che descrivono la probabilità con cui un litotipo passa ad un litotipo differente. Sostanzialmente i passaggi necessari sono i seguenti.

- Dai dati stratigrafici forniti in ingresso al programma vengono calcolate le funzioni di probabilità di transizione da un litotipo all'altro lungo la verticale per tutte le coppie di litotipi. In Figura 151 è riportato un esempio di finestra di dialogo di T-PROGS per la scelta dei parametri che permettono il best-fit delle probabilità di transizione tra litologie.

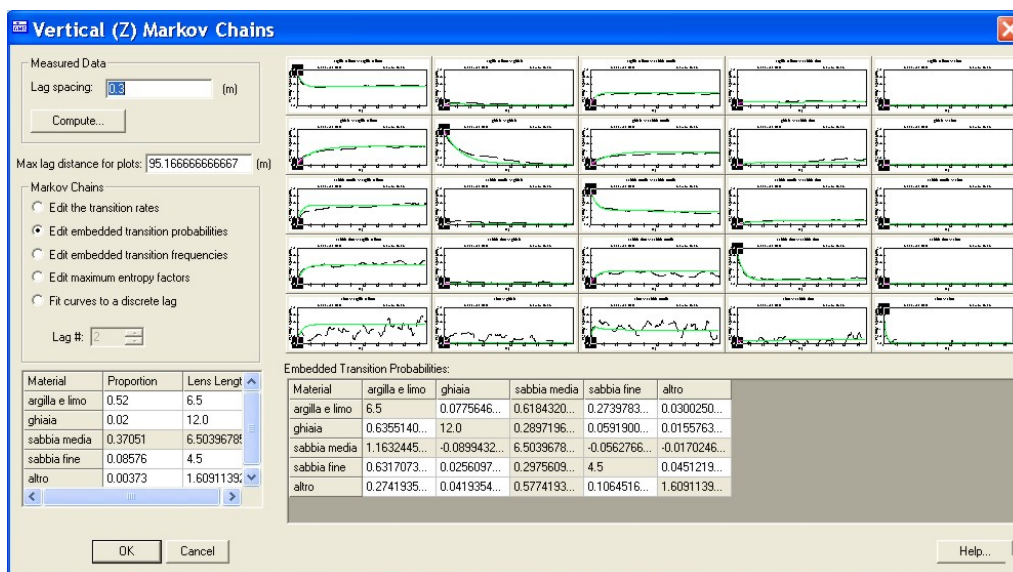


Figura 151. Finestra di dialogo Vertical Markov chain di T-PROGS, i grafici rappresentano le probabilità di transizione tra litotipi diversi (uguali sulla diagonale).

- Vengono calcolate le stesse funzioni di probabilità lungo le direzioni sul piano geografico, attraverso alcuni parametri che devono essere inseriti dall'analista con proprie ipotesi, in base alle conoscenze geologiche specifiche della struttura; ad esempio, il caso in esame riguarda un ambiente alluvionale a basso gradiente topografico, si deve quindi considerare la tendenza ad avere lenti particolarmente estese nel piano orizzontale.
- Simulazione condizionale per la stima della distribuzione dei litotipi su tutto il dominio di calcolo, attraverso una procedura in due fasi:
 - i. una configurazione iniziale viene generata con una versione dell'algorithmo SIS (sequential indicator simulation; Deutsch & Journel, 1992) basata sul cokriging;
 - ii. la simulazione condizionale viene migliorata iterativamente applicando un algoritmo di "raffreddamento simulato" (simulated annealing); questo passo ha lo scopo di riprodurre correttamente il modello di variabilità spaziale.

La simulazione condizionale permette di generare un grande numero di possibili distribuzioni spaziali dei litotipi, rispettando due caratteristiche precise:

- ogni distribuzione spaziale dei litotipi possiede la medesima distribuzione di probabilità dei dati in ingresso;
- ogni distribuzione spaziale dei litotipi è condizionata, cioè rispetta rigorosamente i dati senza modificare i litotipi delle celle dove questi sono fissati dai dati in ingresso.

Per il caso di studio di Cremona è stata generata una griglia regolare costituita da celle di dimensioni laterali $\Delta x \times \Delta y = 500 \times 500 \text{ m}^2$ (come per i modelli di flusso) e verticale $\Delta z = 5 \text{ m}$. Questa scelta di Δz permette di considerare adeguatamente l'eterogeneità verticale dei sedimenti riprodotta dalle stratigrafie; inoltre, osservando che lo scopo delle simulazioni è effettuare delle correlazioni nel piano orizzontale tra dati con bassa densità spaziale e rappresentare il modello ottenuto su sezioni stratigrafiche della lunghezza di decine di chilometri, si è ritenuto opportuno considerare lenti non più sottili di 5 m (lenti di spessore inferiore difficilmente avrebbero una buona continuità laterale a questa scala).

T-PROGS è in grado di fornire molte realizzazioni equiprobabili della distribuzione spaziale dei litotipi, in questo caso ne sono state considerate soltanto due che si differenziano per la scelta di "lens lenght" (L), il parametro che descrive la lunghezza

laterale della lente. Le stratigrafie allegare al lavoro di Beretta *et al.* (1992) riportano lenti limoso-argillose con un'estensione laterale che varia tra 2-3 km e 10-20 km; si è perciò scelto di effettuare due realizzazioni, una con $Ll=5$ km denominata L5DZ5 e l'altra con $Ll=10$ km denominata L10DZ5.

I risultati di L5DZ5 e L10DZ5 sono stati esportati da T-PROGS e rielaborati per poter essere letti come modello litologico in Rockworks. Il vantaggio di quest'ultimo software rispetto al pacchetto GMS è la maggior disponibilità di strumenti di tipo grafico.

Selezionando l'opzione "lithology→ section" nel Borehole Manager di Rockworks è possibile realizzare delle sezioni stratigrafiche a partire da un modello litologico pre-esistente. A titolo di esempio si riportano per entrambi i modelli alcune sezioni le cui tracce sono rappresentate in Figura 152.

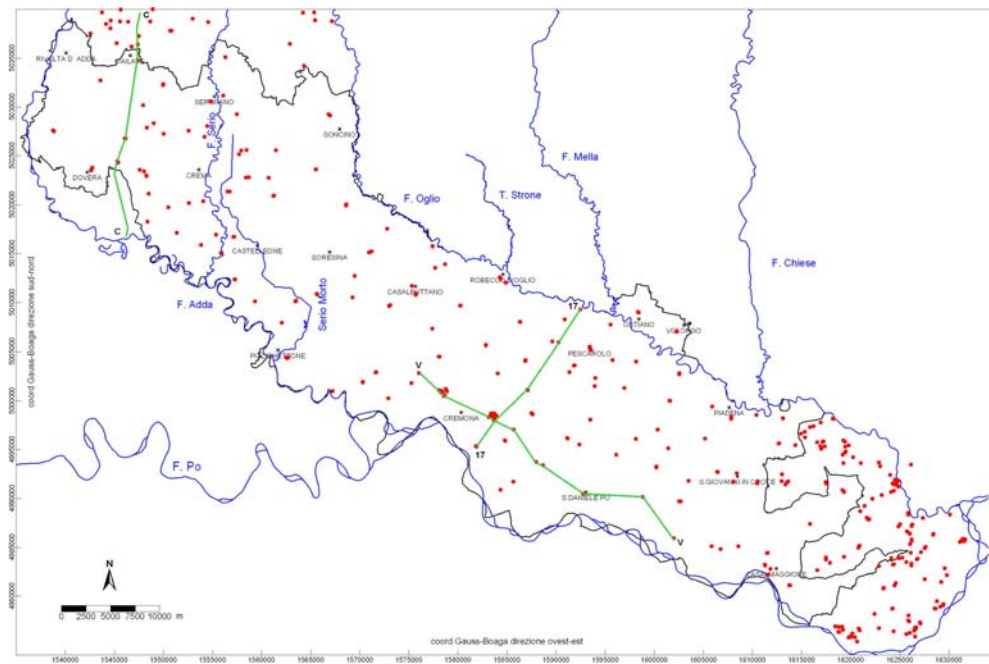


Figura 152. Tracce delle sezioni stratigrafiche C, V e 17. I puntini rossi indicano la posizione dei pozzi.

- Sezione C, direzione Nord – Sud.

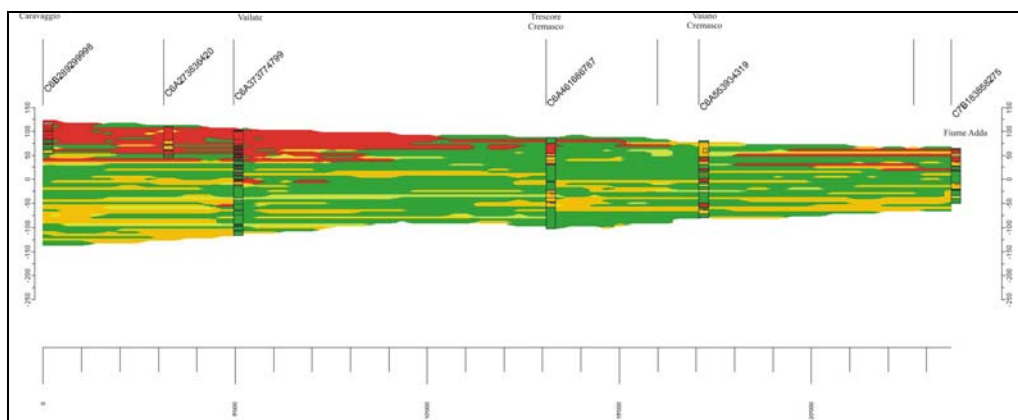


Figura 153. Sezione stratigrafica C direzione Nord - Sud, realizzazione L5DZ5.

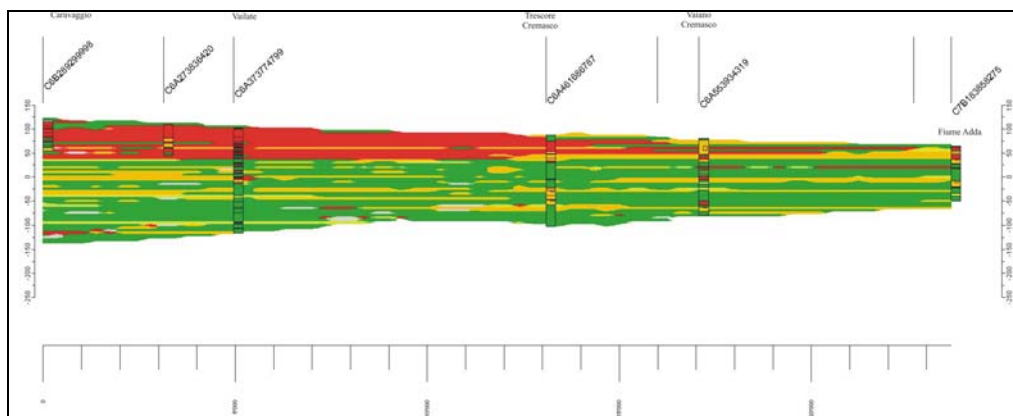


Figura 154. Sezione stratigrafica C direzione Nord - Sud, realizzazione L10DZ5.

Osservando le sezioni in Figura 153 e Figura 154 si nota la presenza (confermata anche dalle altre sezioni NS) nell'area settentrionale del dominio di uno strato superficiale abbastanza spesso (circa 50 m) di sedimenti molto permeabili, formati principalmente da ghiaie di varia dimensione, conglomerati e sabbie grossolane. Lo spessore di questo strato diminuisce progressivamente spostandosi in direzione sud fino a sparire e inglobarsi nell'alternarsi di sabbie medie, sabbie fini e argille. La presenza di questo strato ad alta permeabilità, soprattutto nel settore tra Adda e Serio, è confermata dal campo di trasmissività ottenuto dalla calibrazione del modello monostrato equivalente, si hanno infatti in tale zona valori di T dell'ordine di $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$.

Le realizzazioni L5DZ5 e L10DZ5 simulano all'incirca la stessa distribuzione spaziale a una scala di osservazione più grande, ma si diversificano alla scala più piccola: in particolare la tendenza della realizzazione L10DZ5 rispetto a L5DZ5 è di omogeneizzare maggiormente le correlazioni nella direzione laterale, generando come ci aspetterebbe lenti più estese.

- Sezione V, direzione Nord Ovest – Sud Est.

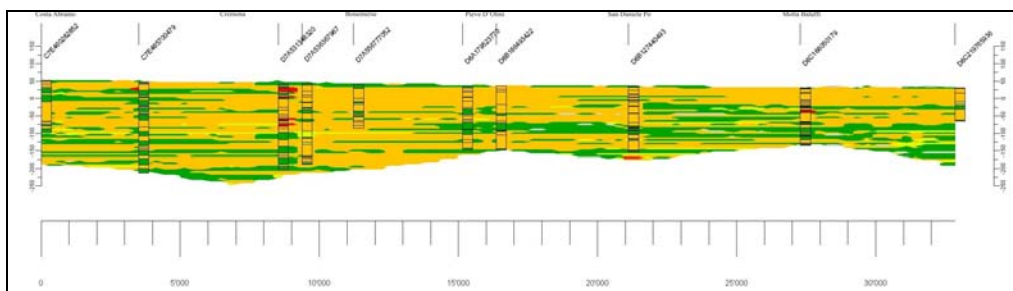


Figura 155. Sezione stratigrafica V direzione Nord Ovest – Sud Est, realizzazione L5DZ5.

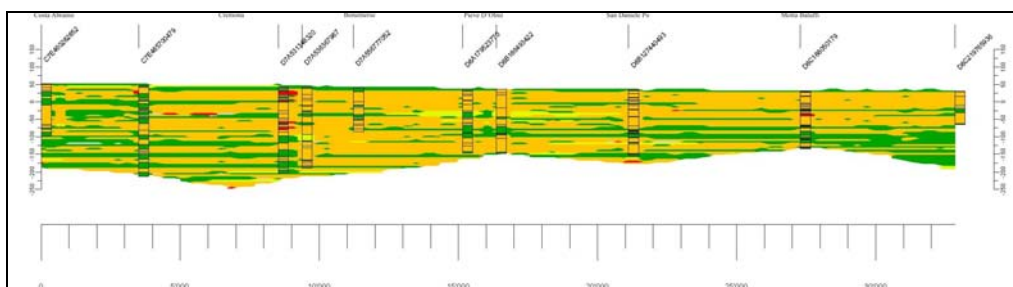


Figura 156. Sezione stratigrafica V direzione Nord Ovest – Sud Est, realizzazione L10DZ5.

La sezione V è disposta parallelamente al corso del fiume Po nella zona che va dalla città di Cremona a San Daniele Po. I due modelli mostrano la presenza di sedimenti prevalentemente sabbiosi di dimensioni medie alternati a lenti di argilla e materiali fini; la discontinuità laterale dei depositi più fini è probabilmente dovuta all'azione del fiume che durante le fasi di piena e poi di sedimentazione ha eroso le lenti argillose per poi sedimentare materiale sabbioso.

- Sezione 17, direzione Sud Ovest – Nord Est.

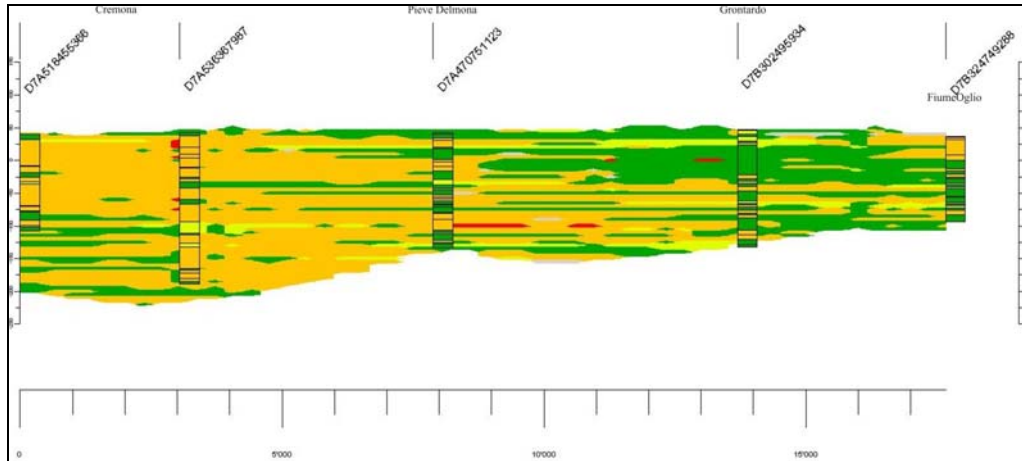


Figura 157. Sezione stratigrafica 17 direzione Sud Ovest – Nord Est, realizzazione LSDZ5.

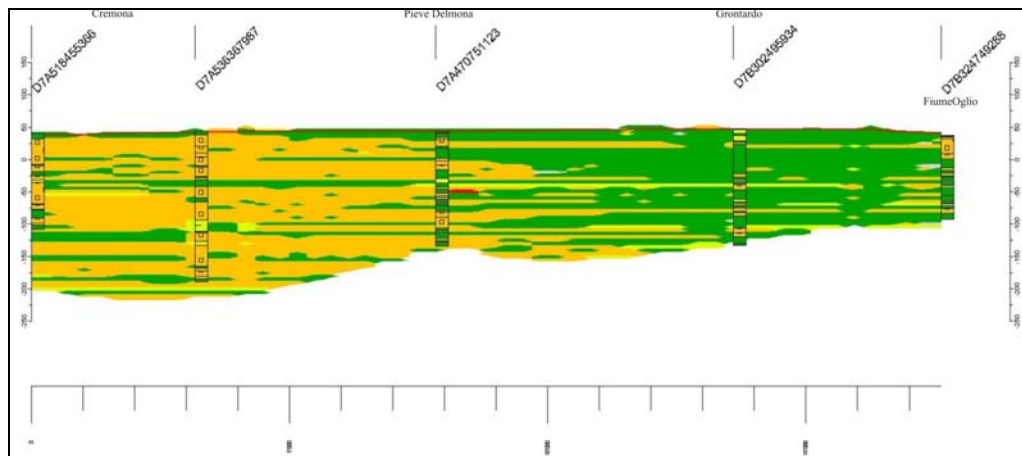


Figura 158. Sezione stratigrafica 17 direzione Sud Ovest – Nord Est, realizzazione L10DZ5.

La sezione 17 è disposta perpendicolarmente ai fattori principali della pianura, che nell'area della sezione sono i fiumi Po e Oglio. Entrambe i modelli mostrano una transizione tra il settore del Po e quello dell'Oglio delimitando i domini di influenza dei due fiumi: mentre nel primo settore i sedimenti sono prevalentemente composti da sabbie medie, nel secondo si ha la netta predominanza delle argille. Questi aspetti sono confermati anche da altre osservazioni effettuate nel corso di questo lavoro. Infatti, osservando le mappe di trasmissività per gli acquiferi freatico e semi-confinato, si nota come il settore dell'Oglio sia caratterizzato da valori più bassi (e quindi da sedimenti meno permeabili) rispetto alle altre zone del cremonese. Si può notare la stessa relazione, anche se meno netta, nella mappa delle portate specifiche (Tavola 10) dove si trovano nella città di Cremona valori superiori a 10 (l/s)/m e nell'area di Robecco d'Oglio valori inferiori a 6 (l/s)/m.