



Assessorato Agricoltura, Ambiente e Sviluppo Sostenibile

AUTORITA' DI BACINO DEL RENO

**Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la
realizzazione di un modello idrogeologico per la
gestione sostenibile delle risorse idriche**

Relazione finale



Sezione Provinciale di Bologna
Servizio Sistemi Ambientali

Ingegneria Ambientale

Dicembre 2005

**CONVENZIONE TRA REGIONE EMILIA-ROMAGNA (ASSESSORATO AGRICOLTURA,
AMBIENTE E SVILUPPO SOSTENIBILE), AUTORITA' DI BACINO DEL RENO E ARPA
EMILIA-ROMAGNA PER LO STUDIO DELLA CONOIDE ALLUVIONALE DEL FIUME RENO
PER LA REALIZZAZIONE DI UN MODELLO IDROGEOLOGICO PER LA GESTIONE
SOSTENIBILE DELLE RISORSE IDRICHE.**

Dott. Giuseppe Bortone - Responsabile del Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua
Dott. Ferruccio Melloni – Segretario Generale Autorità di Bacino del Reno

Referenti del Progetto per conto della Regione Emilia-Romagna:

Ing. Tiziano Draghetti - Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua
Dott. Raffaele Pignone - Responsabile Servizio Geologico Sismico e dei Suoli
Dott. Giorgio Frassinetti - Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua
Dott. Paolo Severi - Servizio Geologico Sismico e dei Suoli

Responsabili di Progetto per conto di ARPA:

Dott. Marco Marcaccio – ARPA Sezione Provinciale di Bologna
Ing. Andrea Chahoud – ARPA Ingegneria Ambientale

Il Gruppo di Lavoro è costituito da:

Ing. Andrea Chahoud – ARPA Ingegneria Ambientale
Dott. Ubaldo Cibirin - Servizio Geologico Sismico e dei Suoli
Dott. Giorgio Frassinetti - Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua
Dott. Marco Marcaccio – ARPA Sezione Provinciale di Bologna
Dott.ssa Sara Molducci - Servin Ravenna
Dott. Giuseppe Patrizi - Servin Ravenna
Ing. Alessandro Pazzi - Servin Ravenna
Dott. Paolo Severi – Servizio Geologico Sismico e dei Suoli

Hanno contribuito per le diverse attività:

Dott.ssa Samantha Arda - ARPA Sezione Provinciale di Bologna
Dott.ssa Bianca M. Billi - ARPA Sezione Provinciale di Bologna
Dott.ssa Monica Branchi - ARPA Ingegneria Ambientale
Dott. Nicola Ciancabilla - ARPA Sezione Provinciale di Bologna
Dott.ssa Gisella Ferroni - ARPA Ingegneria Ambientale
Dott. Fabrizio Morandi - Servin Ravenna
Ditta Agisco - Advanced Geotechnical Instrumentation Systems & Consulting
Ditta S.P.G di Sacchetto Perforazioni Geotecnica s.r.l

Si ringraziano per la collaborazione prestata e/o per i dati forniti:

Dott. Andrea Bergonzoni - Hera
Dott. Flavio Bonsignore - ARPA Ingegneria Ambientale
Ing. Paola Cavazzi – Provincia di Bologna
Ing. Daniele Cristofori - ARPA Ingegneria Ambientale
Dott. Marco Farina – Comune di Bologna
Dott. Luca Gelati - ARPA Ingegneria Ambientale
Ing. Claudio Marchesini – Autorità di Bacino del Reno
Dott. Domenico Preti – Autorità di Bacino del Reno
Dott. Leonardo Rosciglione – Servizio Tecnico di Bacino
Dott. Matteo Simoni – Comune di Bologna
Ing. Paolo Spezzani - ARPA Ingegneria Ambientale

Indice

1. Premessa	6
2. Progetto e strutturazione di un sistema informativo territoriale (Attività A1.2).	8
2.1 Parametri idrogeologici, piezometrie e qualità acque sotterranee	9
2.2 modello geologico-geomorfologico della conoide del fiume Reno. Banca dati geognostica.	12
2.3 dati pluviometrici	17
2.4 dati di subsidenza	18
3. Definizione di un modello concettuale del Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del Fiume Reno (Attività A1.7)	19
3.1 Il modello concettuale delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna	19
3.2 L'origine e l'età delle acque della Conoide del Fiume Reno	20
3.3 Il modello concettuale locale della conoide del Fiume Reno	21
4. Implementazione del modello concettuale in un sistema di simulazione matematica del flusso idrico nel sottosuolo (Attività A3)	23
4.1 Premessa	23
4.2 Approccio generale al problema	23
4.2.1 Modelli di flusso in genere, modelli subsidenza in particolare	23
4.2.2 Applicazioni in Emilia-Romagna e Conoide Reno	26
4.3 Le scelte di Metodo e software applicato:	27
4.4 I dati a disposizione	28
4.4.1 Dati geologici, stratigrafici ed idrostratigrafici	28
4.4.2 Dati piezometrici e freaticometrici	29
4.4.3 La ricarica meteorica	29
4.4.4 La ricarica fluviale	30
4.4.5 I prelievi da falda	30
4.5 Schema del modello di flusso	33
4.5.1 Discretizzazione nello spazio	33
4.5.2 Discretizzazione nel tempo	35
4.5.3 Condizioni al bordo, condizione iniziale	35
4.5.4 Regionalizzazione 3-d del carico idraulico	36
4.5.4.1 Analisi strutturale del carico idraulico	36
4.5.4.2 Distribuzione del carico idraulico	38
4.5.5 Struttura del sistema sedimentario	40
4.5.5.1 Le funzioni di distribuzione delle sequenze stratigrafiche	40
4.5.5.2 La distribuzione delle facies nelle tre dimensioni	43
4.5.6 Parametrizzazione idraulica del sistema	46
4.6 calibrazione del modello di flusso	47
4.6.1 Controllo della taratura del modello	49
4.6.2 Controllo del bilancio idrogeologico della Conoide alluvionale del Fiume Reno (Attività A2.1)	52
4.6.3 I risultati della modellizzazione	57
4.6.3.1 La distribuzione del carico idraulico	57
4.6.3.2 La distribuzione delle velocità di flusso	61

4.6.4	Taratura: conclusioni e raccomandazioni	62
5.	Calcolo delle riserve idriche permanenti (Attività A2.3)	64
6.	Approfondimento delle problematiche relative alla subsidenza (Attività C1)	66
6.1	<i>Il fenomeno della subsidenza nell'area di studio: i dati disponibili dal monitoraggio</i>	66
6.2	<i>IL modello di subsidenza</i>	68
6.2.1	Metodologia	68
6.2.2	Distribuzione dei dati sperimentali	70
6.2.3	Taratura del modello della subsidenza	72
6.2.4	Considerazioni conclusive sulla taratura	82
7.	Indagine geognostica e caratterizzazione fisico-meccanica tridimensionale (Attività C2)	87
7.1	<i>Predisposizione, assegnazione ed esecuzione delle attività</i>	87
7.1.1	Installazione della strumentazione	90
7.1.1.1	Descrizione della diagrafia dei parametri di perforazione (MWD)	91
7.1.1.2	Descrizione dell'assestimetro	96
7.2	<i>I dati di subsidenza disponibili</i>	99
8.	Strumento informatico di supporto alle concessioni (Attività B)	102
8.1	<i>Simulazioni</i>	104
9.	Convegni, seminari e pubblicazioni (Attività D)	108
10.	Considerazioni conclusive	109
11.	Bibliografia	112
12.	Allegati: analisi geotecniche campioni sondaggio	114

1. Premessa

La conoide alluvionale del fiume Reno è sicuramente il principale serbatoio di riserve e risorse idriche del territorio bolognese. Essa ha costituito e costituisce la principale fonte degli approvvigionamenti idrici provinciali.

I prelievi sotterranei, sebbene integrati con approvvigionamenti di acque superficiali, sono talmente consistenti da superare la capacità di ricarica naturale della conoide. Le misure effettuate dal 1977 sulla rete regionale di controllo delle acque sotterranee hanno registrato, infatti, lo sviluppo di una notevole depressione piezometrica in corrispondenza della conoide alluvionale del fiume Reno. Qui i livelli di falda, a causa dei prelievi operati nei decenni passati, si attestano a diverse decine di metri di profondità dal piano campagna, con i massimi valori nella parte centrale della conoide, dove sono raggiunte quote inferiori al livello del mare.

Le conseguenze più immediate di tale impatto antropico sono costituite dal consolidamento dei sedimenti alluvionali, fenomeno che come è noto si manifesta in superficie con la subsidenza del suolo. Negli anni 1997-98 è stata istituita la rete regionale di controllo della subsidenza che integra le reti locali esistenti (del Comune di Bologna, dell'Autorità di Bacino del Reno e la rete della Provincia di Bologna), su cui erano già stati registrati abbassamenti del suolo di diversi centimetri all'anno. La prima campagna di misura della nuova rete è stata effettuata nel 1999 mentre la seconda campagna, effettuata nel 2005 fornirà a breve i suoi risultati.

Negli ultimi anni il Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna ha ampliato le conoscenze sui serbatoi acquiferi della pianura, differenziando e cartografando tre gruppi di acquiferi principali. Essi risultano in gran parte isolati tra loro e variamente compartimentati al loro interno.

Nello stesso tempo, (anni 2001-2004) la Regione Emilia-Romagna con il supporto tecnico-scientifico di ARPA ha condotto una serie di attività connesse allo sviluppo del quadro conoscitivo a supporto del Piano di Tutela delle Acque, attività riguardanti:

- la definizione del modello concettuale delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna;
- la creazione di una banca dati informatizzata per la parametrizzazione idrodinamica degli acquiferi;
- il modello matematico di flusso delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna;

Inoltre negli anni 2001 e 2002 sono state effettuate due campagne di misurazione di dati isotopici all'interno del "Progetto Operativo Monitoraggio Acque - Indagine di idrologia isotopica" (Programma SINA) che hanno consentito di ottenere indicazioni circa l'età e l'origine delle acque.

Ne consegue l'opportunità di integrare le diverse basi per creare uno strumento di simulazione e di supporto alle decisioni il più rispondente possibile alla realtà fisica. La creazione di un tale strumento è fondamentale per la gestione di una risorsa ritenuta di importanza strategica e sulla quale sono già evidenti i segni di uno squilibrio tra sfruttamento e rigenerazione, conseguenti ad uno sviluppo territoriale che, soprattutto negli anni passati, non ha rispettato i criteri di sostenibilità.

Uno degli obiettivi di questo progetto quindi, oltre a quello conoscitivo e di creazione di strumenti utilizzabili a supporto delle decisioni, è stato quello di favorire la concertazione tra i soggetti coinvolti.

Il sopra citato processo di concertazione tra gli Enti ed i soggetti interessati ha portato prima alla stesura dello schema di progetto denominato “Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche”, e poi alla sua approvazione attraverso la firma di un Protocollo di Intesa per la sua realizzazione.

È all'interno di tale Progetto complessivo che si inseriscono le attività della presente relazione che rappresentano le parti di progetto sviluppate da ARPA e che vengono di seguito elencate, anche se nella relazione non verranno presentate con lo stesso ordine ma si farà riferimento di volta in volta al relativo codice di attività:

Modulo A:

- Attività A1.2: progetto e strutturazione di un sistema informativo territoriale;
- Attività A1.7: definizione di un modello concettuale del Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del Fiume Reno;
- Attività A2.1: calcolo del bilancio idrico del Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del Fiume Reno per gli anni idrologici di cui sono disponibili le misure necessarie;
- Attività A2.3: calcolo delle riserve idriche permanenti;
- Attività A3: implementazione del modello concettuale in un sistema di simulazione matematica del flusso idrico nel sottosuolo;

Modulo B:

- Modulo B: strumento informatico di supporto alle concessioni;

Modulo C:

- Attività C1: approfondimento delle problematiche relative alla subsidenza;
- Attività C2: indagine geognostica e caratterizzazione fisico-meccanica tridimensionale

2. Progetto e strutturazione di un sistema informativo territoriale (Attività A1.2).

Questa attività aveva come obiettivo quello di raccogliere e sistematizzare in un SIT tutte le informazioni e i dati sia di tipo cartografico che banche dati, funzionale ad estrarre le informazioni di base che costituiscono l'input per il modello idrogeologico e di subsidenza.

Il SIT realizzato e trasmesso in allegato alla presente relazione tramite DVD contiene i seguenti elementi:

- cartografia di base (CTR) alla scala 1:5.000 e 1:25.000, nel formato raster georeferenziato e la cartografia vettoriale dell'idrografia;
- cartografia ortofotopiano alla scala 1:10.000 nel formato raster georeferenziato;
- estrazione della banca dati geognostica per l'area di studio;
- sezioni idrogeologiche e geologiche ricostruite e interpretate utilizzando la banca dati geognostica della Regione Emilia-Romagna;
- cartografia del modello geologico-geomorfologico della conoide del fiume Reno, ricostruita dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna contenente le superfici stratigrafiche ricostruite, gli orizzonti individuati e la percentuale di ghiaia e sabbia;
- dati piezometrici riferiti agli acquiferi profondi (Rete Regionale di monitoraggio delle acque sotterranee) e a quelli superficiali (Rete di monitoraggio del Comune di Bologna);
- dati di qualità delle acque sotterranee sia profonde che superficiali e caratterizzazione tramite isotopi;
- parametri idrogeologici degli acquiferi consistenti in permeabilità e coefficienti di immagazzinamento;
- rappresentazione dei consumi idrici distinti in civile, agricolo, zootecnico e industriale utilizzando le informazioni elaborate nell'ambito del Quadro conoscitivo del Piano di Tutela e basate sul catasto pozzi esistente della Regione Emilia-Romagna anche se non aggiornato;
- dati meteorologici – precipitazione - disponibili e già organizzati dall'Autorità di Bacino del Reno;
- dati relativi al drenaggio (infiltrazione efficace) derivanti dalle elaborazioni del modello Criteria (Arpa Emilia-Romagna);
- le portate del fiume Reno utilizzate come input per il modello non sono state aggiornate con quelle previste dall'attività A2.2 "Studio e stima della ricarica fluviale potenziale" in quanto sono ancora in corso gli approfondimenti relativi all'interpretazione ed elaborazione dei dati da parte degli enti direttamente interessati dallo svolgimento dell'attività;

- dati di subsidenza derivanti dalla rete di monitoraggio (Arpa Emilia-Romagna, Comune di Bologna, Provincia di Bologna) e dalla misura degli assestimetri che verranno installati nel sondaggio di Progetto.

I dati archiviati essendo funzionali ad elaborare e organizzare i dati di input del modello idrogeologico e di subsidenza coprono pertanto il periodo di riferimento per la taratura del modello stesso che come si vedrà più avanti va dal 1983 al 1999.

Di seguito si riportano alcuni approfondimenti sui dati e sulla loro organizzazione all'interno del SIT Conoide Reno.

2.1 PARAMETRI IDROGEOLOGICI, PIEZOMETRIE E QUALITÀ ACQUE SOTTERRANEE

La struttura del SIT e il suo popolamento con i dati è avvenuto contattando gli enti coinvolti nel progetto e inviando loro un format per la raccolta delle informazioni partendo dai parametri idrogeologici quali le caratteristiche dinamiche delle falde che risultavano, alla scala di dettaglio di conoide, quelle più difficili da reperire. Infatti, oltre ai dati contenuti nell'attività B del Quadro Conoscitivo del Piano di Tutela della Regione Emilia-Romagna, che già conteneva i dati di Hera (gestore della rete acquedottistica), sono stati raccolti altri dati prodotti dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli nell'ambito delle indagini geognostiche effettuate in passato e quelli trasmessi dal Comune di Bologna.

Queste informazioni sono state archiviate e messe in relazione, attraverso l'ausilio di un database relazione utilizzando il software *Access* di Microsoft, ai dati piezometrici e di qualità rilevati dalla Rete Regionale di monitoraggio delle acque sotterranee, ai dati isotopici, alle stratigrafie e la posizione dei filtri, secondo lo schema relazionale riportato in Figura 2-1.

Nella tabella **Anagrafica** sono contenute le informazioni per identificare e ubicare ciascun pozzo in cui è stata effettuata almeno una prova di pozzo, di strato, eccetera e prevede almeno i seguenti campi:

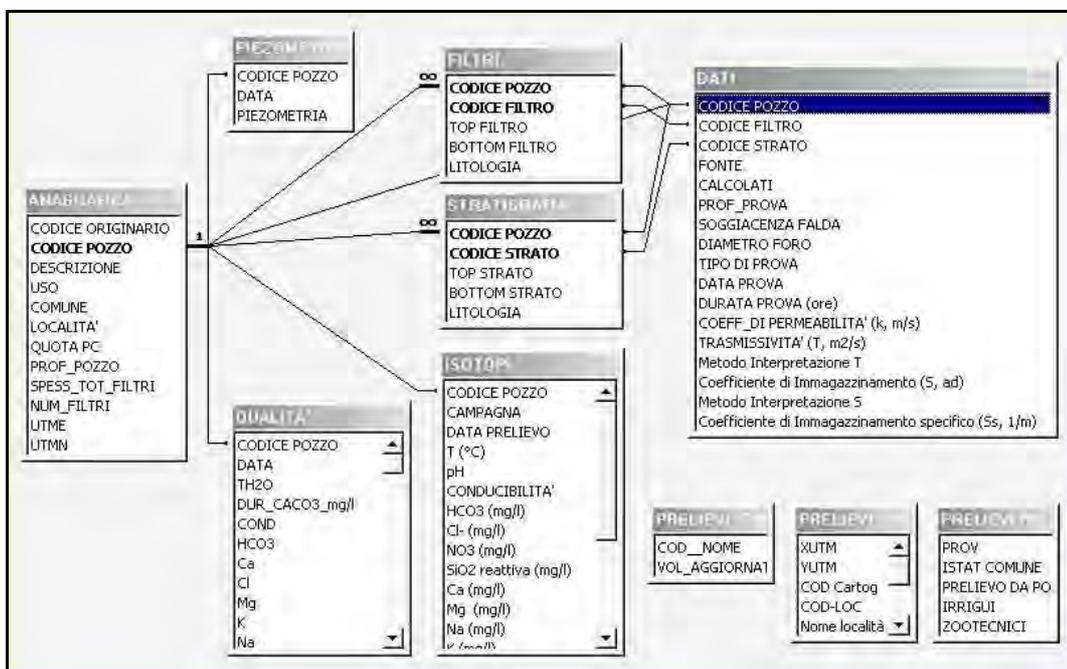
- Il Codice Pozzo è quello attualmente utilizzato nel database per identificare il pozzo;
- Il Codice Originario è quello eventualmente utilizzato dal fornitore del dato per identificare il pozzo stesso, può essere uguale al codice pozzo precedente;
- Il campo Descrizione può essere utilizzato per inserire altre informazioni utili ad identificare meglio il pozzo;
- Lo Spessore totale filtri è la sommatoria di tutti i tratti di pozzo filtrati, ovvero la lunghezza totale dei filtri presenti nel pozzo.

La tabella **Filtri** contiene l'elenco dei filtri contenuti in ogni pozzo e se esiste l'informazione anche la litologia del mezzo filtrato.

- Il Codice Pozzo è il medesimo utilizzato per identificare il pozzo nella tabella Anagrafica;

- Il Codice Filtro è un numero progressivo che identifica ogni singolo filtro presente nel pozzo. Viene attribuito invece all'intero pozzo il Codice Filtro 0 (zero);
- Per ogni filtro, partendo dal piano campagna, si dovrà riportare la Profondità Da, la Profondità A e se esiste anche una indicazione della Litologia. Quindi per ogni filtro la Profondità Da sarà sempre minore della Profondità A.
- Il record con Codice Filtro relativo all'intero pozzo (codice 0) avrà come campo Profondità Da il top del primo filtro e come Profondità A il bottom dell'ultimo filtro, e di conseguenza non avrà alcun valore nel campo litologia;
- Solo qualora il pozzo abbia un unico filtro (Numero filtri = 1 della tabella Anagrafica) allora il Codice Filtro relativo avrà valore 1 e non vi sarà alcun record relativo al pozzo stesso con Codice Filtro 0.

Figura 2-1: relazioni e struttura del database



La tabella **Stratigrafie** contiene l'elenco degli strati in cui sono state effettuate le prove in situ o prelevati campioni per prove in laboratorio. Si riporta quindi lo spessore dello strato e la litologia.

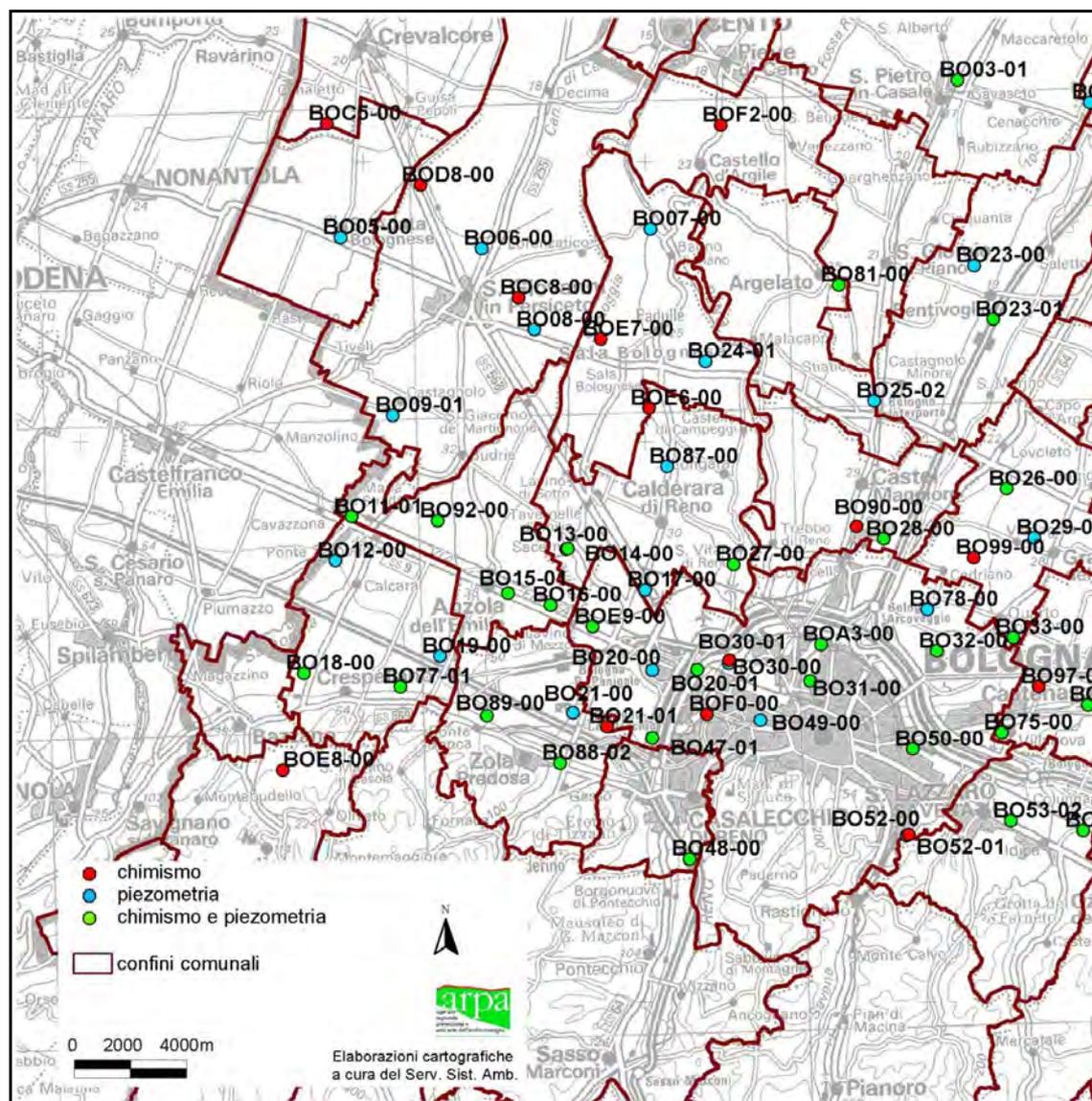
Tabella **Dati** contiene le informazioni relative alle singole prove effettuate sui pozzi:

- Il Codice Pozzo è il medesimo utilizzato per identificare il pozzo nella tabella Anagrafica, in quella Filtri e stratigrafia;
- Il Codice Filtro è il medesimo utilizzato per identificare il filtro nella tabella Filtri;
- Il Codice Strato è il medesimo utilizzato per identificare lo strato nella tabella Stratigrafia;
- Il campo Fonte contiene chi fornisce il dato o colui che ha realizzato la prova;

- I dati e i relativi metodi interpretativi o di calcolo sono inseriti nei successivi campi della tabella, tenendo presente che, quando la prova è relativa ad un determinato filtro, il campo Codice Filtro avrà il valore relativo al filtro in questione, mentre quando la prova è riferita all'intero pozzo, contenente magari più filtri, il Campo Codice Filtro avrà il valore 0.

I dati di piezometria, di qualità e delle indagini isotopiche effettuate sulla rete regionale delle acque sotterranee (Figura 2-2) sono contenuti nel SIT.

Figura 2-2: Rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee



2.2 MODELLO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO DELLA CONOIDE DEL FIUME RENO. BANCA DATI GEOGNOSTICA.

Il modello geologico e geomorfologico della conoide alluvionale del fiume Reno è stato ricostruito dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna partendo dalle conoscenze già consolidate nel lavoro Riserve Idriche Sotterranee (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998) e facendo un lavoro di approfondimento con l'ausilio della banca dati geognostica, di cui è presente nel SIT uno stralcio che copre l'areale della Conoide. Nel SIT è quindi disponibile un progetto ArcView, di cui si riportano di seguito alcune rappresentazioni (Figura 2-3, Figura 2-4, Figura 2-5, Figura 2-6, Figura 2-7, Figura 2-8, Figura 2-9, Figura 2-10), e le sezioni geologiche di lavoro scannerizzate previste dall'attività A1.1 del protocollo d'intesa.

In modo molto sintetico si riporta la metodologia utilizzata per ricostruire le carte isopache e isobate. Dei diversi complessi acquiferi:

1. acquisizione digitale del modello in scala 250.000 di Riserve Idriche Sotterranee;
2. perimetrazione dell'area di analisi della banca dati geognostica SGSS comprendente l'intera conoide e le aree adiacenti;
3. analisi delle stratigrafie di sottosuolo della banca dati tramite la ricostruzione di una griglia di 22 sezioni geologiche di 200-400 m di profondità orientate parallelamente e perpendicolarmente agli assi strutturali (rispettivamente NW-SE e NE-SW);
4. interpretazione grafica sulle sezioni per ciascun sistema acquifero (A, B, C) e per ciascun complesso acquifero di A (A1, A2, A3 e A4) di:
 - a) limiti inferiore e superiore di ciascuna unità idrostratigrafica;
 - b) geometrie dei principali corpi acquiferi e acquitardi di ciascuna unità;
 - c) distinzione delle litologie prevalenti (ghiaie o sabbie);
 - d) digitalizzazione e georeferenziazione delle superfici tracciate sulle sezioni.

Questo lavoro ha permesso di ottenere i seguenti elaborati:

- 1) andamento di base (XX_base) delle unità idrostratigrafiche (carte isobate) tramite metodo di interpolazione automatica a partire dagli andamenti delle linee tracciate in sezione. Solo per A1 è stata realizzata anche l'andamento del tetto (A1_tetto);
- 2) estensione areale dei corpi acquiferi principali e distribuzione areale delle litologie prevalenti (XX_lito) distinte in ghiaie (g, solo A1), ghiaie sabbiose (gs) e sabbie (s)
- 3) intersezione automatica fra superfici limite delle unità idrostratigrafiche e stratigrafie della banca dati geognostica per la definizione degli spessori di grossolano contenuti in ciascuna unità (SpX_dati);
- 4) realizzazione della carta degli spessori di grossolano per ciascuna unità tramite metodo di interpolazione manuale (carta isopache) (SpX);
- 5) distinzione in:
 - un settore di monte dove il limite laterale fra depositi grossolani acquiferi e depositi fini acquitardi è una superficie quasi verticale e netta con

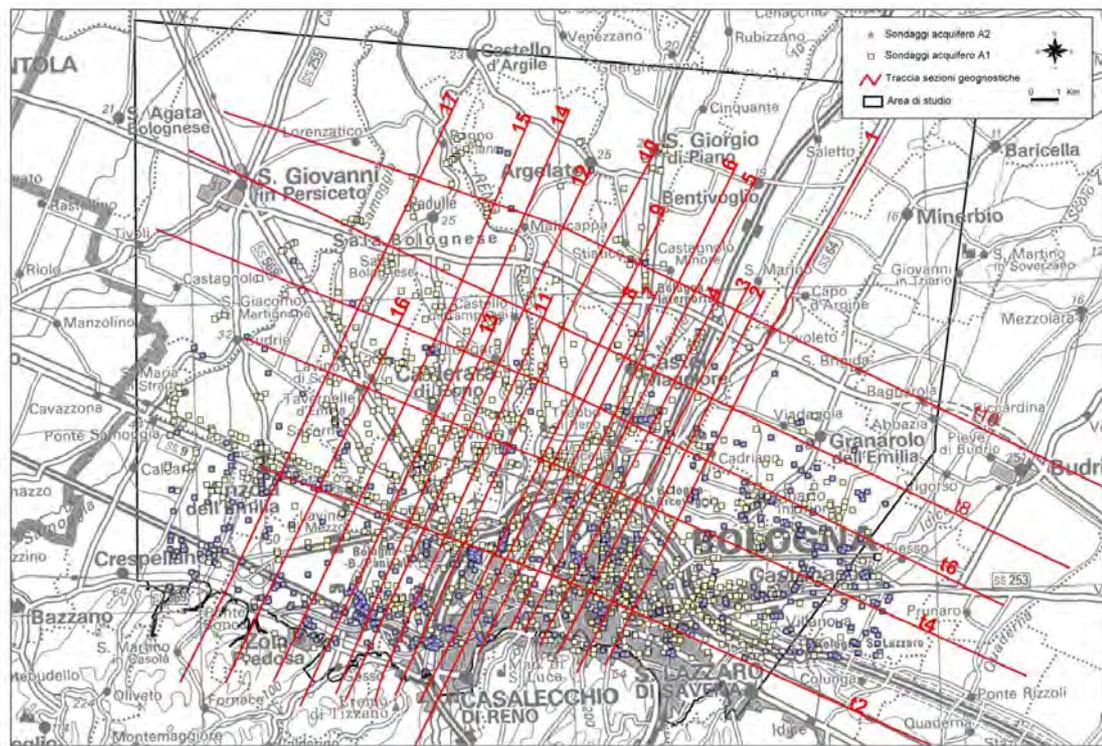
scambio idrico stimato nullo (ad eccezione delle aree intravallive dei corsi d'acqua dove la prosecuzione verso monte degli acquiferi è interrotta artificialmente con una linea retta per evitare di incorporare tutto il settore intravallivo dentro l'area di studio, in questi brevi tratti va considerato uno scambio idrico significativo);

- un settore di valle dove tale limite è sfumato e lo scambio idrico è possibile (spessore cumulativo di grossolano nell'acquifero =< 5 m)(XX_grossolano).

6) perimetrazione delle aree di contatto diretto fra il grossolano di una unità e quello dell'unità sovrastante (XX_amalgama_tetto). Per l'unità sommitale A1 la carta è sostituita da quella della distribuzione delle ghiaie affioranti (area di ricarica diretta)(A1_ghiaie aff).

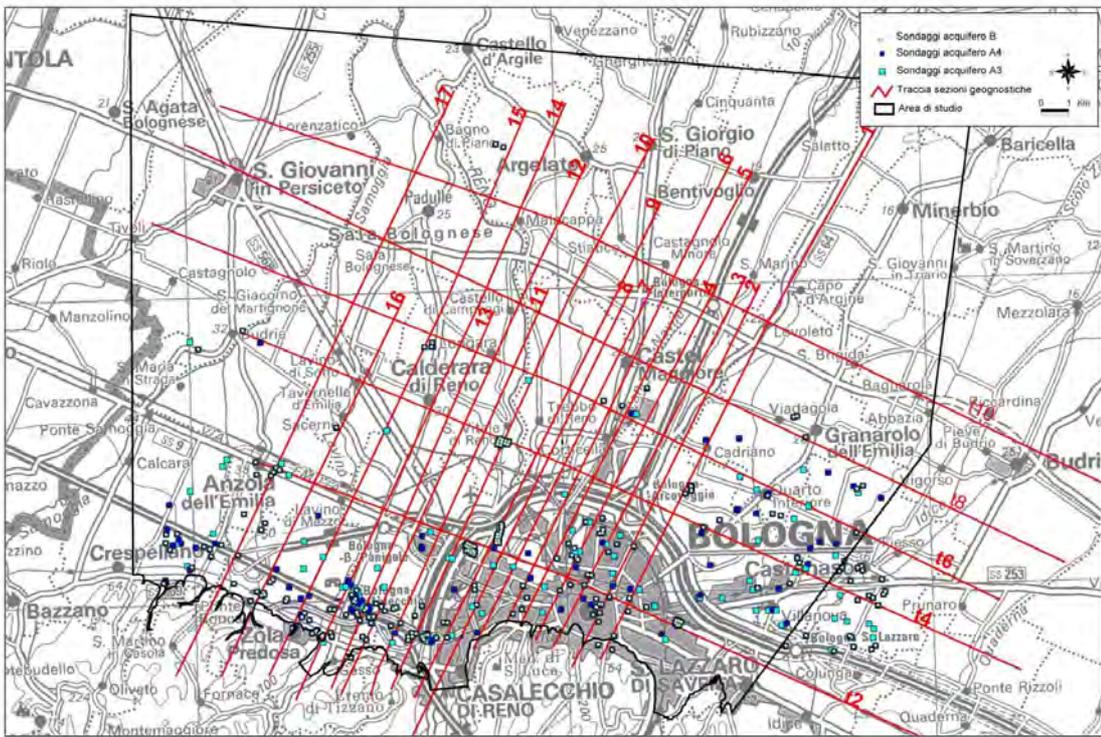
Le interpolazioni delle mappe di base delle unità idrostratigrafiche nelle aree più esterne, particolarmente povere di dati, hanno beneficiato degli andamenti delle medesime superfici definiti in Riserve Idriche Sotterranee o estrapolati da queste. Le mappe degli spessori di grossolano in B e C derivano da Riserve Idriche Sotterranee e sono state solo in parte modificate sulla base dei pochi dati disponibili per l'area della conoide.

Figura 2-3: Traccia delle sezioni e ubicazione dei sondaggi degli acquiferi A1 e A2



Traccia delle sezioni e ubicazione dei sondaggi geognostici degli acquiferi A1, A2.

Figura 2-4: Traccia delle sezioni e ubicazione dei sondaggi degli acquiferi A3, A4 e B



Traccia delle sezioni e ubicazione dei sondaggi geologici degli acquiferi A3, A4, B.

Figura 2-5: Geometrie del complesso acquifero A1

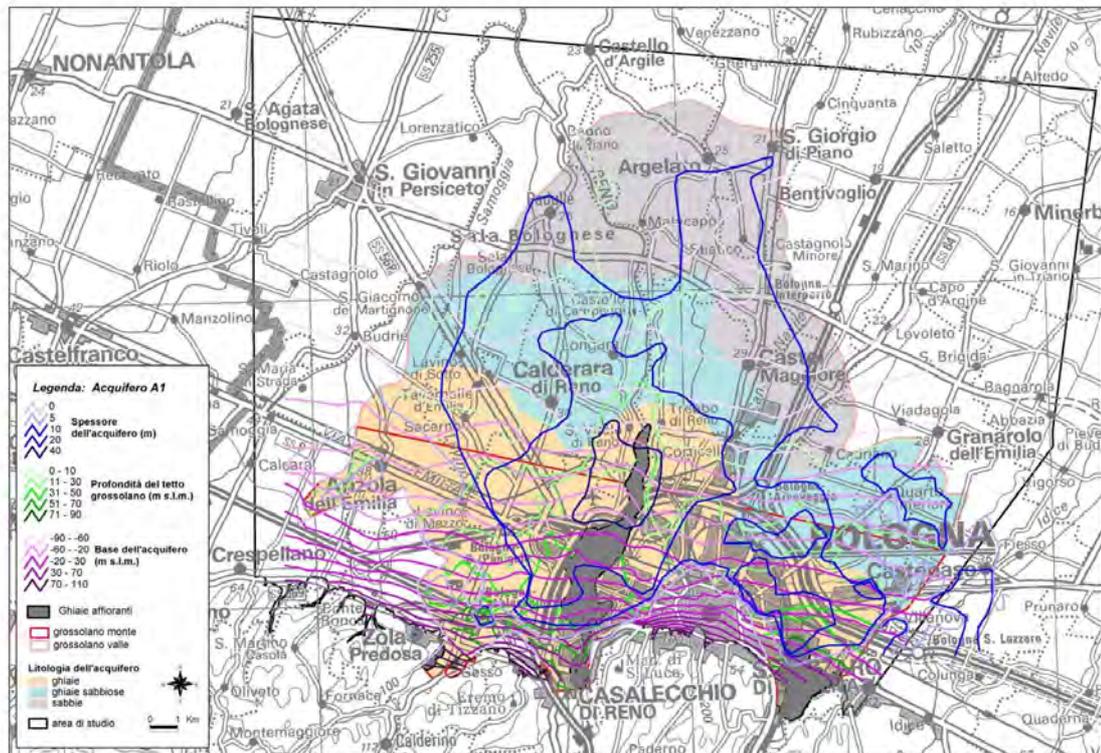


Figura 2-6: Geometrie del complesso acquifero A2

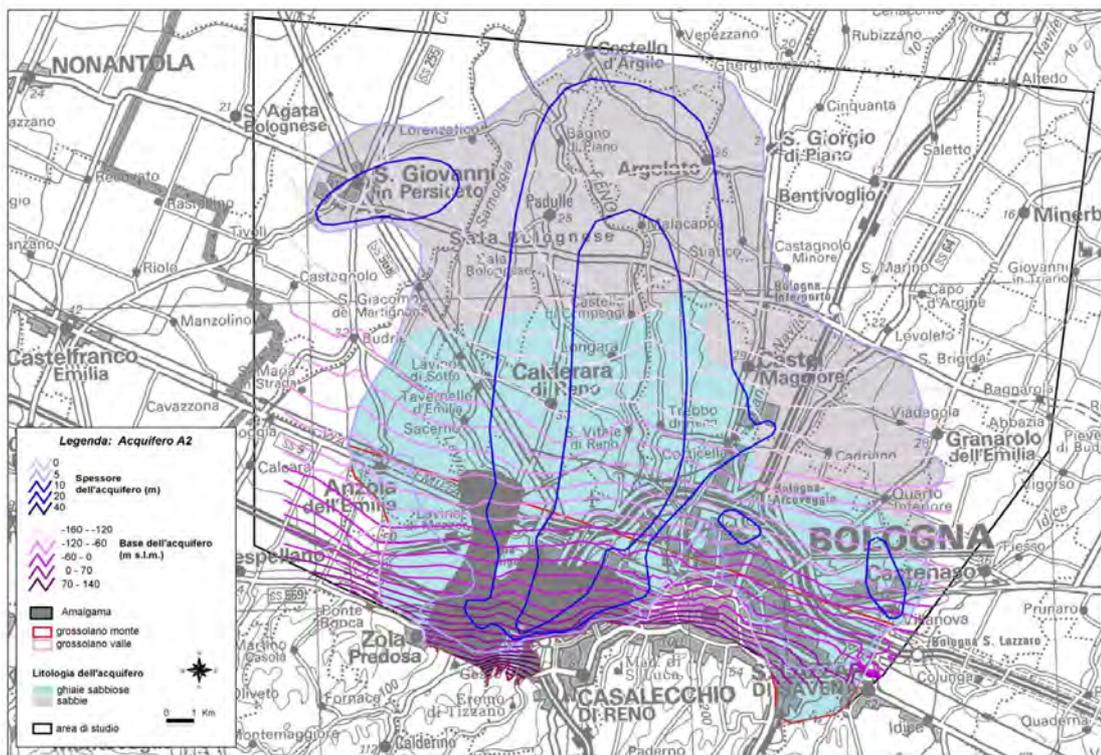


Figura 2-7: Geometrie del complesso acquifero A3

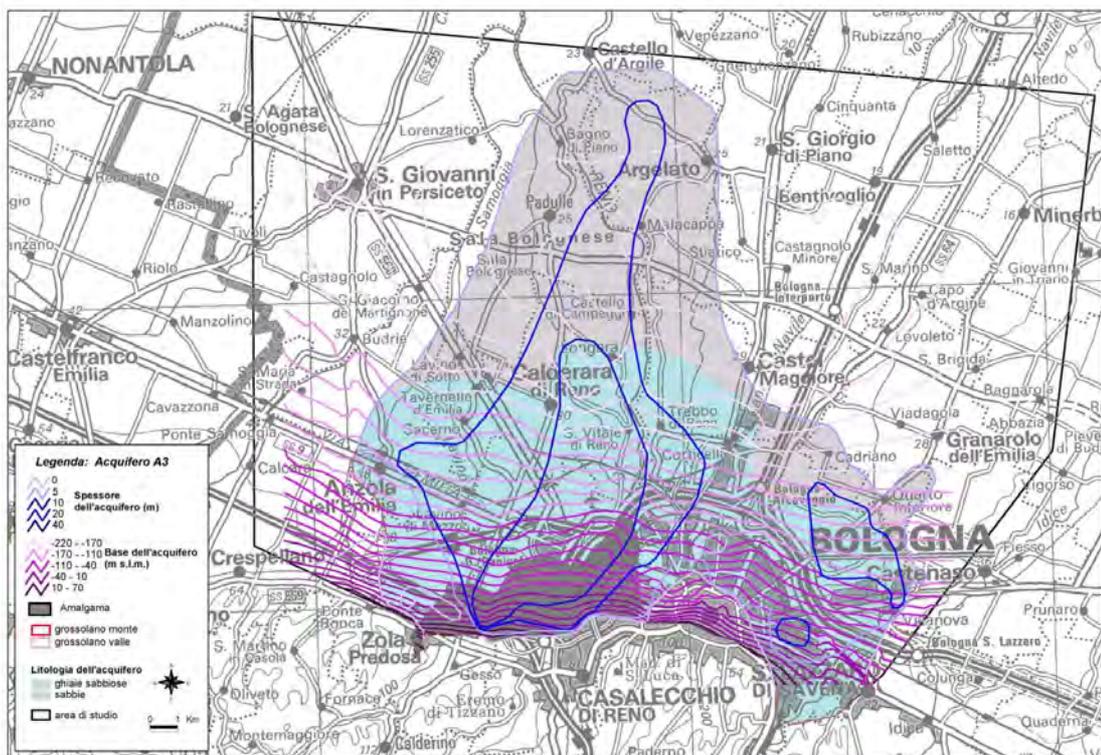


Figura 2-8: Geometrie del complesso acquifero A4

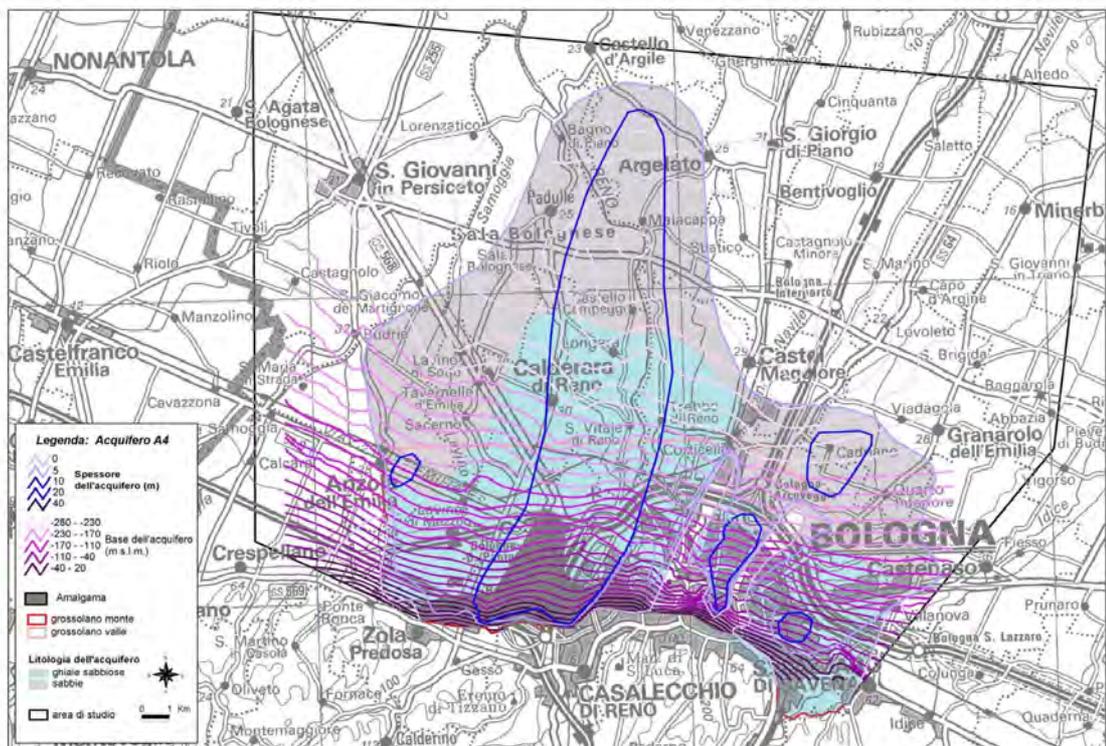


Figura 2-9: Geometrie del complesso acquifero B

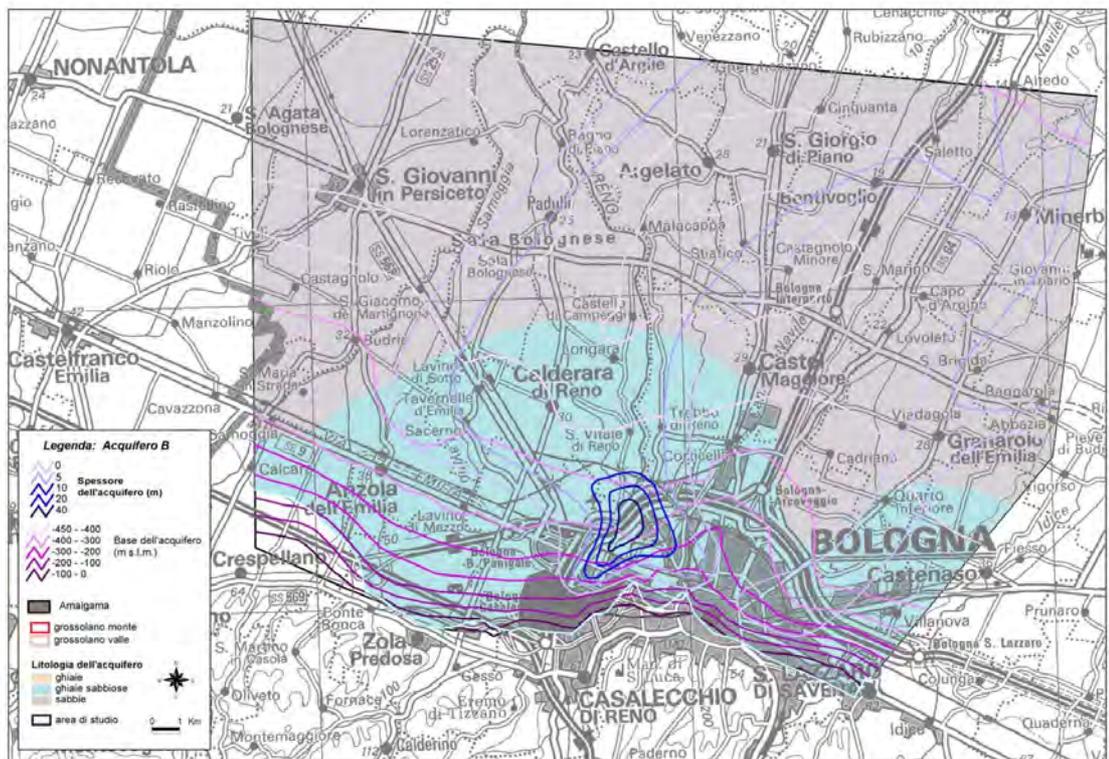
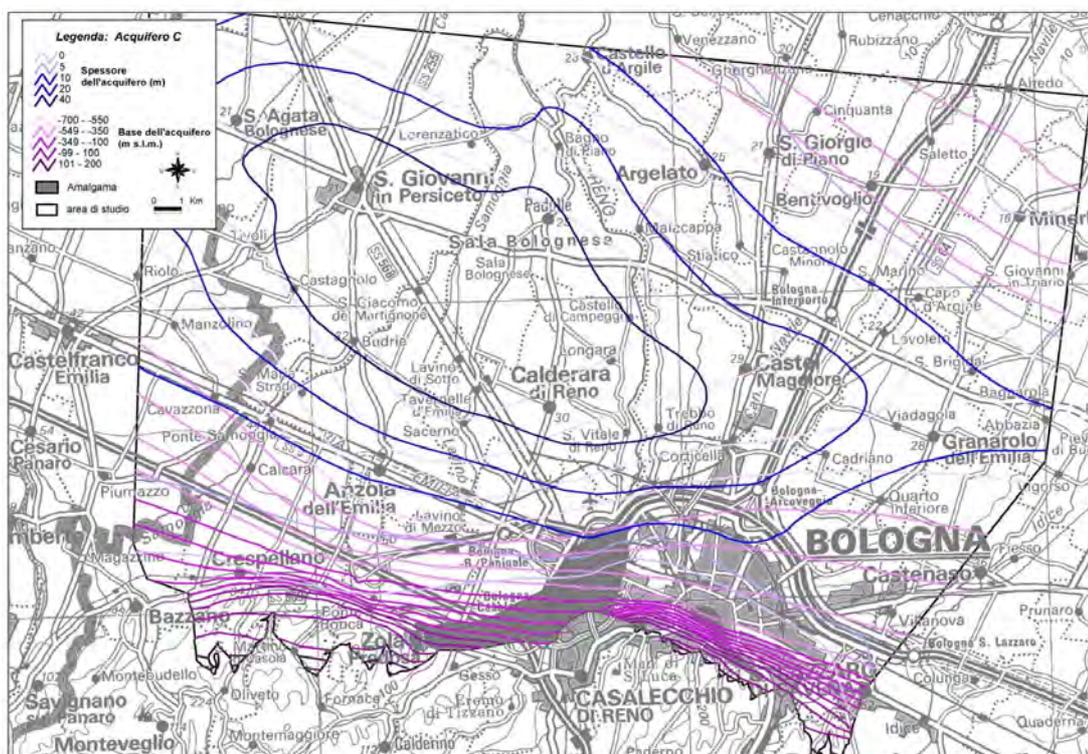


Figura 2-10: Geometrie del complesso acquifero C



2.3 DATI PLUVIOMETRICI

Nel SIT è stato inserito l'archivio dei dati pluviometrici dell'Autorità di Bacino del Reno realizzato in collaborazione con l'ex Servizio Idrografico di Bologna, che contiene i dati a partire dall'inizio delle registrazioni delle singole stazioni, le più remote delle quali risalgono al 1916, fino al 2001 compreso.

Nell'archivio sono descritte le stazioni di misura attraverso le seguenti informazioni:

- il nominativo della stazione
- il Comune e la Provincia in cui è ubicata
- il bacino di appartenenza
- i codici di identificazione SIMN e GADI del Servizio Idrografico
- le coordinate geografiche
- l'inizio e la fine delle registrazioni
- lo strumento attualmente in uso
- una piccola cronistoria della stazione stessa.

L'archivio aveva già predisposto per ogni singola stazione 4 tipi di informazioni:

- – le osservazioni pluviometriche giornaliere,
- – le precipitazioni mensili ed i totali annui,
- – il numero dei giorni piovosi,
- – le precipitazioni di massima intensità registrate dai pluviografi.

Si possono infine verificare e consultare in tre distinte tabelle i tabulati di consistenza dei dati:

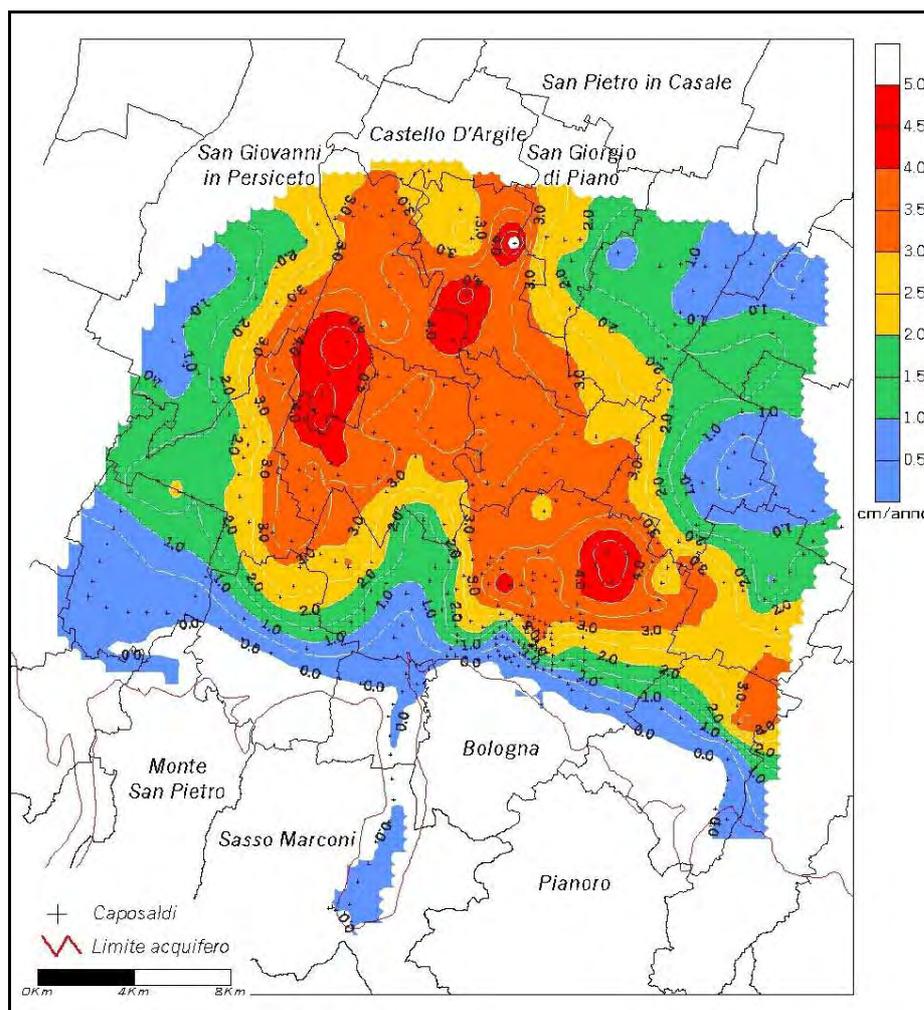
- giornalieri (che vale anche per la consistenza del numero dei giorni piovosi)

- mensili
- di pioggia intensa.

2.4 DATI DI SUBSIDENZA

I dati relativi alla subsidenza inseriti nel SIT si riferiscono alle misure effettuate dal Comune di Bologna (Rete grande e Rete di raffittimento), dalla Provincia di Bologna, dall'Autorità di Bacino del Reno, dall'I.G.M.I. e dalla Regione Emilia-Romagna tramite l'Arpa – Ingegneria Ambientale. Le misure effettuate si riferiscono agli anni 1983, 1987, 1992 e 1999 riferite ad ogni caposaldo. In particolare per ognuno di essi si riporta la misura di quota assoluta nei diversi anni, il calcolo degli abbassamenti negli intervalli temporali e la velocità media di abbassamento negli stessi periodi di tempo. Nella Figura 2-11 si riporta una elaborazione dei dati di subsidenza e l'ubicazione dei caposaldi.

Figura 2-11: Subsidenza nel periodo 1992-1999 e ubicazione caposaldi



3. Definizione di un modello concettuale del Bacino Idrogeologico della Conoide Alluvionale del Fiume Reno (Attività A1.7)

3.1 IL MODELLO CONCETTUALE DELLE ACQUE SOTTERRANEE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Nell'ambito del Quadro Conoscitivo creato a supporto dello sviluppo del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna negli anni 2002 e 2003 è stata condotta una complessa attività denominata "*Le acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna: modello concettuale*" -Attività B del Completamento del Quadro Conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna - che ha portato a sintesi tutte le informazioni di tipo geologico, idrogeologico e di struttura del sottosuolo lette ed integrate in rapporto ai dati quantitativi, chimici ed isotopici disponibili.

In tale lavoro sono stati definiti i complessi idrogeologici (conoide alluvionali appenniniche, pianura alluvionale appenninica, pianura alluvionale e deltizia padana) che sono stati poi descritti sulla base delle caratteristiche geologiche, idrochimiche ed idrodinamiche, con le conferme ottenibili dalla lettura dei dati disponibili in sovrapposizione ad una serie di sezioni idrogeologiche costruite ad hoc. L'analisi successiva ha riguardato la lettura degli effetti che le condizioni di flusso hanno avuto sul fluido nell'ambito delle strutture descritte (ottenibile dai dati isotopici della Rete Sina, origine ed età del fluido) e ciò ha permesso quindi l'elaborazione di uno schema di modello concettuale con una doppia chiave di lettura: una deposizionale, legata ai complessi idrogeologici, e l'altra idrodinamica, essendo quest'ultima meglio espressa dalle caratteristiche chimico isotopiche del fluido. Le caratteristiche chimico isotopiche, proprio per il maggior dinamismo delle conoidi, hanno consentito di distinguere tre possibili ambienti in conoide e rispettivamente due ed uno nella pianura Appenninica e nella pianura alluvionale e deltizia Padana (Tabella 3-1).

Tabella 3-1: schematizzazione dei complessi idrogeologici e origine del fluido

Complesso idrogeologico	Origine del fluido		
	Appennino, recente	Appennino, antica	Padano-alpina, antica
"Conoidi alluvionali appenniniche"	$\alpha 1$ acquiferi freatici	$\beta 1$ acquiferi freatici/confinati	$\chi 1$ (in ipotesi) acquiferi confinati
Pianura alluvionale appenninica		$\beta 2$ acquiferi confinati	$\chi 2$ (in ipotesi) acquiferi confinati
Pianura alluvionale e deltizia padana			$\chi 2$ acquiferi confinati

Per le conoidi alluvionali appenniniche lo schema prevede la presenza di una porzione più superficiale e più prossimale delle conoidi contenente acque completamente rinnovate con fluido recente proveniente dall'Appennino ($\alpha 1$) fino alla profondità interessata dai prelievi; più in profondità e distalmente vi sono acque antiche di origine

appenninica ($\beta 1$). Ancora in profondità al di sotto dei depositi di conoide alluvionale sono localmente presenti, in ipotesi, acque di origine padano-alpina ($\chi 1$). La parte distale delle conoidi può avere questo stesso schema o al tetto acque di tipo $\beta 1$ se il processo di rinnovamento non è arrivato così avanti.

3.2 L'ORIGINE E L'ETÀ DELLE ACQUE DELLA CONOIDE DEL FIUME RENO

L'analisi è stata condotta su una porzione di territorio incentrata sulla conoide alluvionale del Reno, con l'estensione alle conoidi adiacenti ubicate nella Provincia di Bologna, oltre alla porzione di pianura appenninica posta con queste in continuità, immediatamente più a Nord.

Al fine di attribuire le giuste provenienze ed età alle acque di falda campionate, sono stati posizionati nello spazio tridimensionale i rispettivi filtri dei pozzi. Dal momento che è noto il modello idrostratigrafico di dettaglio appositamente ricostruito, è stato possibile effettuare la corretta attribuzione del/i complesso/i o gruppi acquiferi captati da ciascun pozzo. I dati disponibili si riferiscono alle due campagne di prospezione isotopica eseguite nel giugno-luglio 2001 e nel febbraio-marzo 2002.

I dati degli isotopi stabili, utilizzati per ricavare l'origine delle acque di falda campionate, sono $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, mentre quelli degli isotopi instabili, usati per la datazione delle stesse acque, sono ^{14}C e Trizio. Di questi due il primo viene usato per datazioni comprese fra i 5.000 ed i 50.000 anni, mentre il secondo per datazioni molto più recenti comprese fra qualche mese e la cinquantina di anni.

Sebbene la concentrazione di tali dati non sia distribuita uniformemente nell'area di studio, nemmeno in riferimento ai diversi gruppi acquiferi, è possibile comunque arrivare ad individuare caratteristiche diverse per le conoidi alluvionali da un lato e per la pianura appenninica dall'altro.

Le porzioni prossimali-centrali della conoide maggiore del Reno-Lavino, di quella intermedia del Samoggia e di quella minore della Ghironda sono ben rappresentate da un numero sufficiente di pozzi, tale da permettere la loro caratterizzazione: tre sia per la prima (I-BO-30, I-BO-32 e I-BO-33) che per la seconda conoide (I-BO-07, I-BO-08 e I-BO-31) ed uno per la terza (I-BO-10), oltre ad un altro aggiuntivo (I-BO-54) preso in considerazione fra quelli della conoide dell'Idice-Zena. Si tratta di pozzi con captazione nei Complessi acquiferi A, ad eccezione di I-BO-10, che intercetta il Gruppo C. I relativi dati isotopici di $\delta^{18}\text{O}$ e di $\delta^2\text{H}$ risultano compresi rispettivamente tra -9,1 e -7,8 e tra -60,6 e -49,2. Si tratta quindi di valori indicativi di acque di origine appenninica, le cui concentrazioni di Trizio rilevate, comprese fra 5,2 e 12,2 TU, permettono di attribuire loro un'età molto recente variabile orientativamente dai 5 ai 30 anni, fatta eccezione per il pozzo I-BO-54, avente valori di $^{14}\text{C}=42,6\%$, che fa risalire le età di tali acque a circa 4.200 anni.

Spostandosi più a Nord, nelle porzioni distali della conoide del Reno-Lavino e del Savena sono disponibili rispettivamente il pozzi I-BO-29 e I-BO-36, i quali captano acque dei complessi acquiferi A1 e A2 con valori di $\delta^{18}\text{O}$ e di $\delta^2\text{H}$ compresi rispettivamente tra -8,8 e -8,1 e tra -57,7 e -52,5, ancora indicativi di acque di provenienza appenninica. Per il pozzo I-BO-36 il valore di Trizio di 0,8 TU, corrispondente circa al "limite di rilevabilità", fa ipotizzare un'età recente delle acque captate, non inferiore però ad almeno 50 anni. Per il pozzo I-BO-29 è disponibile solo il

valore di ^{14}C , ma essendo molto elevato (71,4%) non permette la datazione dell'acqua che può quindi essere considerata come recente.

La porzione di pianura appenninica a NE dell'area di studio mostra caratteristiche diverse dalle precedenti, riscontrabili nei seguenti pozzi: I-BO-03, I-BO-05 e I-BO-26, i quali captano acque dai Gruppi acquiferi più profondi (B i primi due e C il terzo). In tale zona si può riscontrare una variabilità di valori isotopici di $\delta^{18}\text{O}$ e di $\delta^2\text{H}$ correlabili con un'origine delle acque che non è più appenninica, ma va dal mescolamento di acque padane con altre appenniniche (I-BO-03), a padane (I-BO-26), fino a più spiccatamente alpine (I-BO-05). Per i tre pozzi i valori isotopici medi di $\delta^{18}\text{O}$ sono rispettivamente uguali a: -9,6 , -10,2 , -10,7 , mentre gli associati valori isotopici medi di $\delta^2\text{H}$ sono nello stesso ordine i seguenti: -64,3 , -69,45 , -74,2.

Le concentrazioni abbastanza basse di ^{14}C rilevate permettono un'attribuzione delle età delle acque intorno ai 25-30.000 anni per i pozzi I-BO-26 e I-BO-05 (^{14}C compreso fra 1,4 e 1,8%) e di circa 13.000 anni per I-BO-03 (^{14}C =11%).

3.3 IL MODELLO CONCETTUALE LOCALE DELLA CONOIDE DEL FIUME RENO

La conoide del Fiume Reno appartiene al complesso idrogeologico delle conoidi alluvionali appenniniche per le quali lo schema concettuale regionale prevede la presenza di porzioni delle stesse caratterizzate dalla presenza di acque comunque di origine appenninica ma con età recente nelle parti più superficiali e più prossimali ed antiche più in profondità e distalmente. Ancora in profondità al di sotto dei depositi di conoide alluvionale sono localmente presenti, in ipotesi, acque di origine padano-alpina ($\chi 1$). Nell'ambito del presente lavoro si è provveduto a verificare tale schema avendo a disposizione una ricostruzione stratigrafica di dettaglio all'interno della quale collocare i dati utili alla identificazione dell'origine e dell'età del fluido. I dati isotopici sono stati quindi inseriti all'interno dello schema stratigrafico di dettaglio ed è stato così possibile verificare che i dati dell'area in esame si inseriscono bene nello schema regionale di flusso delle acque sotterranee e più in particolare sono coerenti con le considerazioni relative alla sezione del Fiume Reno (Tav. 4 del lavoro per il Piano di Tutela).

Si trova infatti conferma che il sistema delle conoidi alluvionali appenniniche è caratterizzato da una ricarica appenninica delle falde per infiltrazione superficiale e per connessione con l'idrografia, la quale abbinata ai prelievi da pozzo dà luogo a un rinnovamento delle acque in esse contenute secondo cicli di circa 50 anni, se considerati gli interi sistemi di conoide. Inoltre i valori isotopici riscontrati per le acque del pozzo I-BO-10, con captazione nel Gruppo C, molto simili rispetto a quelli dei pozzi circostanti con filtri captanti i vari Complessi A, dimostrano che esiste amalgamazione fra i diversi gruppi acquiferi in corrispondenza delle porzioni apicali delle conoidi, dove la falda è freatica per tutto lo spessore dei sedimenti alluvionali. Esiste quindi un flusso relativamente veloce legato al discreto gradiente naturale incrementato artificialmente dall'estrazione di acqua dai pozzi.

Spostandosi verso Nord via via nelle porzioni più distali delle conoidi si assiste alla progressiva compartimentazione degli acquiferi con una diminuzione da monte a valle delle velocità di flusso delle acque in essi contenuti, che nel caso dell'area di studio, si esplica con una età delle acque dei Complessi A uguale o superiore ai 50 anni, le quali dimostrano comunque una buona continuità longitudinale degli stessi complessi.

Il caso isolato del pozzo I-BO-54, alle cui acque vengono attribuite età intorno ai 4.200 anni, può essere spiegato ipotizzando l'esistenza di zone abbastanza circoscritte di semiconfinamento degli acquiferi o a minore circolazione idrica.

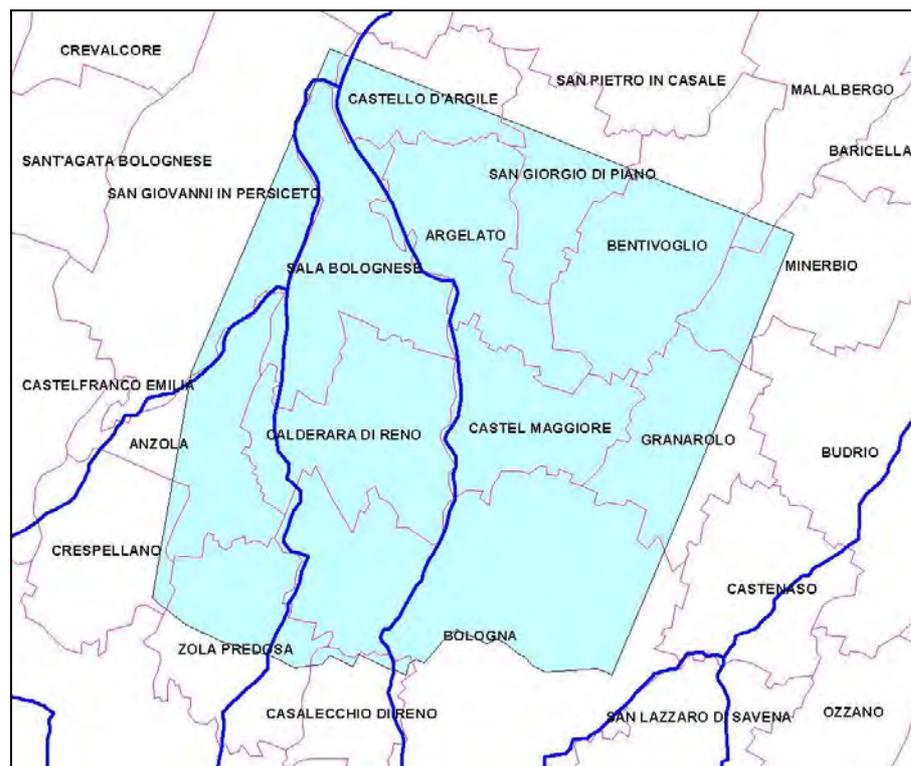
Spostandosi poi ulteriormente verso Nord i Gruppi acquiferi più profondi (B e C) risultano caratterizzati da velocità di flusso delle acque in essi contenute molto basse, esplicate dalle loro età dell'ordine dei 10-30.000 anni, significative di una situazione di confinamento e di un'origine padana o alpina, anche se esistono zone più circoscritte di mescolamento di acque appenniniche con altre padane.

4. Implementazione del modello concettuale in un sistema di simulazione matematica del flusso idrico nel sottosuolo (Attività A3)

4.1 PREMESSA

Il modello concettuale precedentemente descritto è stato sviluppato con il Groundwater Modeling System (GMS) e trasformato in un modello matematico per la simulazione del flusso idrico nel sottosuolo. Come meglio descritto in seguito, il modello è stato prima predisposto numericamente e quindi sottoposto a taratura sia in regime stazionario che in regime transitorio, utilizzando i dati e le elaborazioni contenute nel SIT. Viene inizialmente effettuata una analisi delle problematiche emerse nella fase di approccio e di impostazione del lavoro, dalla quale sono scaturite le scelte metodologiche ed operative che hanno caratterizzato le diverse fasi che vengono poi descritte nei paragrafi successivi. L'area di studio viene riportata in Figura 4-1.

Figura 4-1: area di studio



4.2 APPROCCIO GENERALE AL PROBLEMA

4.2.1 Modelli di flusso in genere, modelli subsidenza in particolare

Prima di affrontare la descrizione metodologica effettivamente impiegata, è opportuna una breve sintesi delle modalità attraverso le quali si possono fare i modelli numerici in

idrogeologia; va anche ricordato che si tratta di modelli che taluni definiscono “sporchi”, nel senso che, essendo il problema mal posto dal punto di vista matematico, è necessario assegnare i valori delle variabili di controllo (permeabilità, porosità ecc.) per tentativi. Questa è la fase di taratura che, per quanto ben sviluppata, non dà mai garanzie di tipo aprioristico sul fatto di aver impiegato effettivamente la miglior combinazione possibile di valori per tali variabili.

La taratura, quindi, non è solo un passaggio necessario per arrivare ad una qualche soluzione del problema, ma anche e soprattutto la fase in cui si deve fare in modo che la soluzione sia controllata nel maggior numero possibile di modi, anche i più indiretti, in modo da circoscrivere e limitare il più possibile gli aspetti negativi, che tendenzialmente dipendono dai gradi di libertà di sistemi di questo tipo, a loro volta valutabili nell'ordine dei milioni o miliardi di combinazioni

Il controllo di maggior peso resta comunque la permeabilità del mezzo poroso, che è uno dei termini fondamentali dell'equazione del flusso in idrogeologia; se questo termine non viene calibrato in modo adeguato, allora tutti i passaggi successivi (i.e. la calibrazione delle porosità delle dispersioni ecc.) sono affetti da fenomeni di propagazione degli errori che possono rendere del tutto inutilizzabile l'intero costruito modellistico.

Tuttavia il problema non è puramente e semplicemente numerico nel campo di applicazione dell'equazione del moto dell'acqua. Un ruolo fondamentale è infatti giocato dai gradi di rappresentatività che la permeabilità assegnata nel modello assume rispetto a quella attesa, passando attraverso la necessità di discretizzare il dominio di calcolo sulla base di volumi finiti di roccia. In pratica:

1. occorre valutare l'aderenza del valore di k da assegnare al volume V nel modello rispetto alla variabilità intrinseca del volume V' di roccia. Nella pratica, si sottintende che k possa corrispondere ad una k' intesa come media di tutti i valori veri del mezzo poroso nel volume V' . Questo assunto è in realtà complicato dalla natura tensoriale della permeabilità, per cui lo stesso concetto andrebbe sviluppato nelle tre dimensioni dello spazio per darne espressione compiuta; ne risulterebbe un sistema almeno bivariato in k_o e k_v , ciascuna delle quali con proprie caratteristiche di variabilità e di scarti rispetto alle distribuzioni attese;
2. si deve valutare l'aderenza dei valori assegnati nel modello rispetto a quelli teoricamente attesi dalla corretta applicazione del punto precedente (1). Infatti, e soprattutto quando il numero degli elementi è elevato, anche l'applicazione di (1) assume molti caratteri di aleatorietà.

In ultima analisi, la correttezza con cui si esprime la k nel modello segue un percorso del tipo:

$$k_{\text{mod}} \approx k(V) \approx k'(V')$$

Nel corso dell'applicazione assume quindi rilievo sia la capacità di interpretare fisicamente il mezzo poroso, sia la capacità a “manipolare” il problema per assegnare agli elementi di volume del modello il maggior numero possibile di valori corretti attesi. In termini più generali, questo corrisponde più semplicemente al tentativo di generare un modello con la distribuzione di k più vicina possibile a quella vera, con il limite che il numero di elementi di volume su cui è effettivamente possibile il controllo per mezzo delle osservazioni sperimentali è molto piccolo rispetto al numero totale degli elementi

di volume delle celle. E' anche per questo motivo che la correttezza dell'applicazione dipende dalla capacità di svolgere il controllo di qualità con il più ampio spettro possibile di riscontri, anche i più indiretti, in modo da enfatizzare la risposta del modello nel suo insieme piuttosto che le risposte su un numero limitato di situazioni circoscritte.

Detto questo, resta solo da vedere come ci si può invece orientare a realizzare le applicazioni in pratica; queste possono essere approcciate secondo due schemi di comportamento diversi:

1. il primo, più semplice e "classico", si basa sul fatto di far prevalere un'idea aprioristica della struttura del serbatoio rispetto alla disomogeneità spaziale della permeabilità nelle tre dimensioni. In questo modo si realizza un'immagine, il modello concettuale del sistema, da simulare e questa immagine è costituita da un insieme più o meno numeroso di "oggetti" geologici sotto forma di serbatoi acquiferi e di rocce impermeabili, ben distinti tra loro nel comportamento idrodinamico. Successivamente, a ciascuno di questi si assegna il valore della permeabilità più opportuno, assumendo la tendenza a ridurre la variabilità della permeabilità al numero di oggetti riconosciuti. Tipicamente, un'alternanza di sistemi permeabili/impermeabili, ciascuno con una propria permeabilità prevalente e significativa;
2. il secondo, invece, tende a generare il più ampio set di valori delle k , con l'obiettivo di rappresentare, nei limiti del possibile, la variabilità naturale delle caratteristiche idrauliche delle rocce che, soprattutto negli ambienti di tipo sedimentario, è molto elevata.

I risultati che si possono ottenere sono molto diversi, perché l'elasticità di risposta del modello (intesa come capacità di riproduzione delle osservazioni specifiche e del comportamento di sistema in generale) dipende fondamentalmente dalla capacità di riprodurre la distribuzione "vera" delle permeabilità, passando attraverso le difficoltà descritte sopra.

Il primo approccio consiste in ultima analisi in un certo insieme di sottomodelli omogenei: ognuno degli oggetti che formano la struttura concettuale, infatti, tende a essere definito come fine a se stesso e descritto con un livello di precisione molto ridotto, dato che la schematizzazione che viene adottata tende a far coincidere la distribuzione "vera" delle k con un numero limitato di valori (a volte uno solo, nel caso dei modelli perfettamente omogenei). Poiché il comportamento del mezzo poroso è sempre fortemente disomogeneo (ovvero la disomogeneità naturale tende a prevaricare la capacità di riproduzione con un modello omogeneo banalizzante), diviene praticamente impossibile riuscire a riprodurre in modo accettabile la dinamica di un sistema così complesso.

Il passaggio da un modello "puramente" omogeneo ad un modello "puramente" disomogeneo è un fatto strettamente tecnologico, che dipende dai mezzi in uso (software e informazioni), dato che la formulazione teorica delle equazioni del moto prevede la disomogeneità e l'anisotropia nelle tre dimensioni dello spazio fin dalla sua formulazione di base (a solo titolo di esempio, si veda Bear (1972) e tutta la bibliografia in materia).

La constatazione che al crescere delle complicazioni, ovvero al crescere delle prestazioni richieste al modello, si abbia per conseguenza il crescere inevitabile della propagazione degli errori, ha insegnato che un approccio del tipo puramente omogeneo

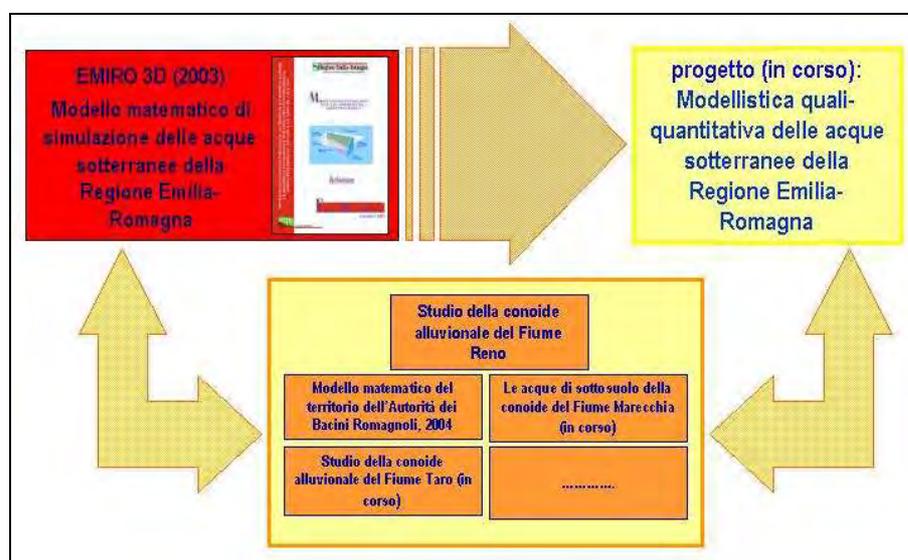
non consente di ottenere risposte soddisfacenti, almeno alla scale dei problemi posti ad oggi. Si tratta di risposte che, nella maggior parte dei casi prevedono il ricorso a modelli sempre in stato transitorio (lo stato di modello in condizioni di regime permanente è funzionale ad una fase preliminare di taratura, dato che non corrisponde ad uno stato fisico utile nella pratica), che tendono ad associare il flusso dell'acqua ad altre fenomenologia, come la subsidenza in questo caso e, molto più di frequente, il trasporto di sostanze in soluzione.

E' stato per certi versi inevitabile che tutte le esperienze condotte negli ultimi anni nell'ambito del "sistema" Emilia Romagna siano state basate su questo assunto, anche pagando il prezzo della molta maggiore fatica necessaria a portare a conclusione le attività conseguenti.

4.2.2 Applicazioni in Emilia-Romagna e Conoide Reno

Il modello matematico di simulazione realizzato per la conoide alluvionale del Reno si inserisce nel più ampio percorso modellistico intrapreso all'interno del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia Romagna (Figura 4-2). All'interno del Piano di Tutela è stato dapprima realizzato EMIRO 3D, come naturale traduzione in termini numerici del modello concettuale delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna, eseguendo una prima calibrazione del modello di flusso in regime stazionario; attualmente è in corso la sua estensione al regime di moto transitorio ed il completamento col modello di trasporto per i nitrati.

Figura 4-2: la modellistica delle acque sotterranee all'interno del Piano di Tutela delle Acque



Nello stesso percorso si collocano le altre esperienze già ultimate per le acque sotterranee dell'Autorità di Bacino dei Fiumi Romagnoli e le esperienze in corso sulle conoidi del Marecchia e del Taro e dovranno necessariamente relazionarsi le ulteriori applicazioni future.

L'integrazione tra i diversi livelli, finalizzata a mantenerne il reciproco aggiornamento, deve essere tale da garantire sia una coerenza dei bilanci di massa sia l'allineamento

delle strutture. In sostanza vi deve essere una coerenza generale nei presupposti e nei risultati, essendo questi ultimi influenzati direttamente da un mancato allineamento tra esperienze diverse sullo stesso bacino, che renderebbe non più confrontabili i risultati conseguiti.

4.3 LE SCELTE DI METODO E SOFTWARE APPLICATO:

Il modello è realizzato sulla base della consueta equazione del flusso dell'idrogeologia derivata dalla legge di Darcy; l'equazione è discretizzata nello spazio e nel tempo e risolta, nel caso specifico di Modflow, con un sistema alle differenze finite sia nello spazio che nel tempo.

La discretizzazione consente la disomogeneità nello spazio, ovvero l'applicazione di una diversa permeabilità per ciascuno degli elementi di volume che costituiscono il dominio di calcolo. Ciascun elemento di volume è descritto mediante due componenti di permeabilità (orizzontale e verticale), l'immagazzinamento, la porosità e la capacità specifica. Il sistema è tuttavia isotropo, poiché Modflow non consente di riprodurre per intero il tensore della permeabilità e ne limita l'uso, come detto, a due sole componenti, l'una orizzontale, l'altra verticale.

Inoltre Modflow applica la legge di Darcy nella sua forma originale e non in quella più generale (Voss, 1984), estesa al grado di saturazione ed ai termini di densità e viscosità del fluido; nasce sostanzialmente per la modellazione del flusso di un fluido con proprietà fisiche costanti (l'acqua) all'interno di un mezzo poroso in condizioni di saturazione (acquifero). Modflow utilizza un doppio sistema di equazioni, uno per la parte sommitale del sistema, ovvero per la parte di sistema in cui vengono diagnosticate condizioni di tipo freatico, l'altra per gli strati successivi al primo.

Questo aspetto è di importanza non trascurabile, poiché ha condizionato uno degli aspetti fondamentali del modello, costituito dalla presenza di una vasta e profonda plaga di terreno non saturo, formatasi nel corso del tempo a seguito dello sfruttamento dell'acquifero e della conseguente depressione idraulica.

Un altro non trascurabile aspetto, è inoltre la componente costituita dall'interfaccia uomo-macchina: infatti, per poter manipolare sistemi vasti e complessi come quello del Reno (alcune centinaia di migliaia di elementi di controllo) la disponibilità di una interfaccia sofisticata è fondamentale e rende possibile lo sviluppo dell'applicazione. Non vi dubbio che, sotto questo profilo, l'ambiente GMS sia oggi il migliore in assoluto e che sia quindi abbastanza scontata la decisione di realizzare le applicazioni con tale strumento; allo stesso tempo, va comunque notato che GMS contiene oltre a Modflow, anche l'interfacciamento verso moduli agli elementi finiti (es. FEMWATER), ma il livello di sviluppo in questa direzione è molto inferiore e rende praticamente impossibile usare questi altri codici per problemi con dimensioni superiori alle poche centinaia o migliaia di maglie.

Per quello che riguarda la subsidenza, ovvero la necessità di risolvere anche l'equazione che descrive la compattazione di un terreno sciolto saturo sottoposto a variazione di pressione idrostatica, sono state esplorate due possibilità:

1. la prima è stata quella del ricorso a SUB, che è un altro modulo aggiuntivo di Modflow (Hoffmann, 2003);
2. la seconda di utilizzare un programma di proprietà, opportunamente modificato per adeguarsi alle esigenze specifiche.

In pratica, è stata preferita la seconda soluzione per diversi motivi; infatti, SUB prevede diverse limitazioni, che riguardano innanzitutto l'assenza di una interfaccia utente adeguata a maneggiare il problema. Questo aspetto è ancor più complicato dal fatto che SUB prevede una propria geometria per gli strati fini ritenuti responsabili del fenomeno che mal si adatta allo schema puramente tridimensionale come quello qui adottato. Separando nettamente le due fasi di calcolo, si è avuta la possibilità di calcolare e conservare la soluzione relativa al flusso una volta per tutte al termine della taratura del modello principale, per poi affrontare con un sistema molto più leggero, con risposte al calcolo molto più brevi, la parte relativa alla compattazione. In questo modo è stato possibile utilizzare in entrambi i casi la medesima geometria per quello che riguarda la discretizzazione nello spazio ed una discretizzazione nel tempo più adeguata per la subsidenza.

Va poi evidenziato che in questo modo si concretizza anche un altro vantaggio in prospettiva e legato all'apertura verso simulazioni riguardanti anche l'applicazione di un carico litostatico alla superficie (edifici, strade, ecc.), carico che può essere associato alla variazione di pressione nei pori dovuta all'evoluzione dell'idrogeologia del sistema. Ne segue che, in questo modo, è possibile studiare in dettaglio situazioni specifiche, caratterizzate sia dal drenaggio del sottosuolo, sia dall'applicazione di un carico litostatico.

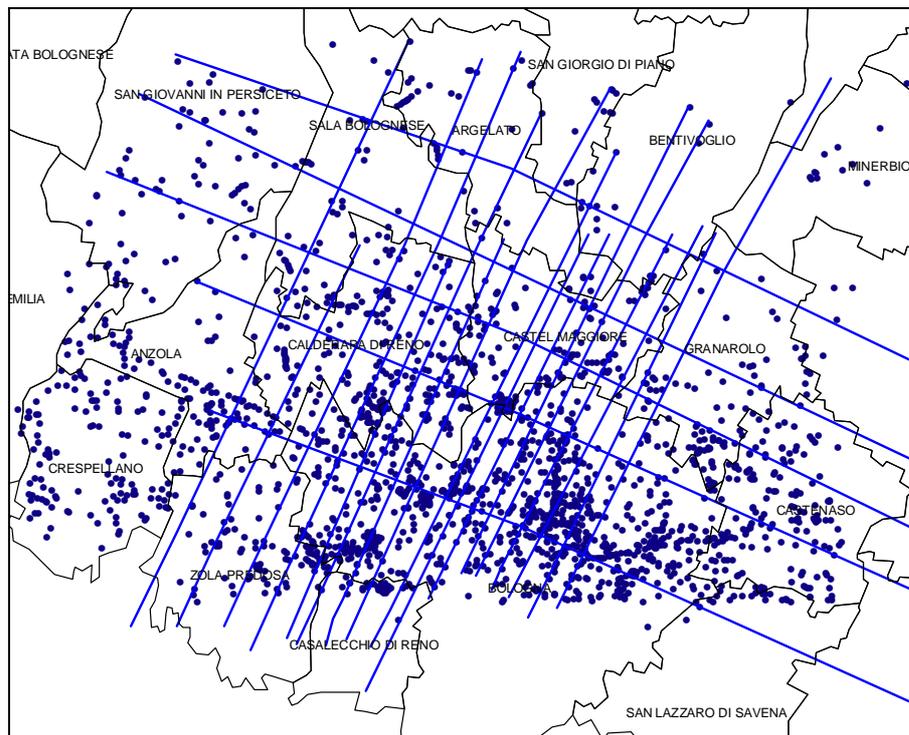
4.4 I DATI A DISPOSIZIONE

4.4.1 Dati geologici, stratigrafici ed idrostratigrafici

I dati disponibili relativamente alla parte strutturale del modello fanno riferimento principalmente:

- alla struttura tridimensionale della conoide realizzata ad hoc nell'ambito del progetto complessivo dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, attraverso l'individuazione di una griglia di sezioni geologiche parallele e trasversali all'Appennino per un totale di 23, di cui 17 longitudinali e 6 trasversali alla conoide. Tutte le sezioni sono tra loro correlate, sia per quanto riguarda le linee di base delle unità geologiche sia per i corpi grossolani individuati (Figura 4-3, v. par. 2.2);
- alla Banca Dati Geognostici della Regione Emilia-Romagna contenente i pozzi, i sondaggi ed i carotaggi unitamente alla relativa descrizione stratigrafica;
- al lavoro *“Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna”* (1998)
- al lavoro *“Le acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna: modello concettuale”* -Attività B del Completamento del Quadro Conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna- che ha portato a sintesi tutte le informazioni di tipo geologico, idrogeologico e di struttura del sottosuolo lette ed integrate in rapporto ai dati quantitativi, chimici ed isotopici disponibili.

Figura 4-3: tracce delle sezioni e pozzi appartenenti alla banca dati geognostici



4.4.2 Dati piezometrici e freaticometrici

I dati piezometrici di riferimento per la calibrazione del modello sono stati quelli della Rete Regionale di Monitoraggio delle acque sotterranee che dal 1976 insiste sul territorio della Regione Emilia-Romagna. Nel dettaglio sono state usate le serie storiche dei pozzi ricadenti sull'area di studio e corrispondenti ai sedici anni compresi tra il 1983 ed il 1988 coerentemente con la scelta dell'orizzonte temporale di riferimento del modello di cui al paragrafo 4.5.2.

Al fine di meglio caratterizzare la parte più superficiale del sistema sono stati utilizzati i dati corrispondenti alle campagne di misure freaticometriche disponibili nell'areale bolognese (Viel, 1995), oltre a quelli rilevati dal Comune di Bologna nel proprio territorio comunale.

4.4.3 La ricarica meteorica

La valutazione del termine di ricarica attribuibile alla componente meteorica è stata ottenuta attraverso il sistema modellistico CRITERIA. (Controllo delle Riserve Idriche Territoriali per Ridurre l'Impatto Ambientale) sviluppato da ARPA - Servizio IdroMeteo Regionale. Esso risolve l'equazione del bilancio idrico sia a scala locale sia a scala territoriale partendo dai dati di input costituiti dalla carta dei suoli dell'Emilia-Romagna, dai dati meteorologici e dai dati colturali. Il calcolo dei termini costituenti il bilancio idrico, di supporto ad una corretta ed efficiente pratica irrigua, permette anche la valutazione, attraverso il termine di drenaggio profondo, dei quantitativi di acqua che dagli strati più superficiali si rendono disponibili per quelli sottostanti costituendo così la ricarica delle falde. Il drenaggio profondo viene quindi determinato nel modello a

partire dalle condizioni iniziali di saturazione del terreno, dal tipo di terreno, dal tipo di coltura applicata e dall'intensità delle precipitazioni. Le simulazioni avvengono in regime transitorio fornendo in uscita i dati giornalieri e cumulati sul periodo di simulazione. I dati utilizzati nel modello fanno riferimento ai risultati delle simulazioni condotte nell'ambito del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna, Attività E del completamento del quadro conoscitivo. I risultati delle simulazioni consistono nel valore giornaliero per l'intero periodo di riferimento relativamente a tutti i termini che concorrono al bilancio idrico, per ciascuna combinazione di cella meteo/tipo di suolo/coltura e quindi per ciascuna cella di discretizzazione spaziale del dominio di calcolo.

4.4.4 La ricarica fluviale

La ricostruzione della ricarica fluviale all'interno del modello è stata effettuata attraverso i seguenti passaggi:

1. raccolta dei dati idraulici (quote del fiume) ed idrologici disponibili (portate e tirante medio)
2. utilizzo dei dati raccolti all'interno del modulo RIVER di Modflow
3. individuazione dei contributi del fiume in termini di volumi di acqua in ingresso ed in uscita
4. imputazione al modello dei volumi così calcolati in termini di ricarica artificiale

Di fatto, la problematica legata all'ampia e profonda zona insatura posta a nord ovest di Bologna e quindi anche al di sotto delle celle sulle quali è stata inizialmente ipotizzata la condizione RIVER, ne ha in realtà messo in crisi il corretto utilizzo nelle fasi vere e proprie di taratura del modello per lo svolgimento delle quali il contributo del fiume è stato accorpato alla ricarica zenitale.

4.4.5 I prelievi da falda

L'analisi dei prelievi è stata condotta su una superficie più ampia di quella considerata per il modello e corrisponde a quella sottesa dai 24 comuni già utilizzati all'interno del precedente lavoro Idroser (1985) (Figura 4-4). Dal punto di vista dell'evoluzione nel tempo sono stati invece utilizzati i seguenti istanti:

- 1976: dati e stime relative al Piano Acque del 1978
- 1985: dati e stime relative al lavoro Idroser (1985);
- 2002: dati e stime relativi al Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna

I prelievi complessivi risultanti per i 24 comuni analizzati e per i tre istanti di tempo considerati sono riportati in Figura 4-5 suddivisi per i diversi usi. Relativamente al comparto acquedottistico sono stati utilizzati i dati relativi alla produzione dei singoli campi pozzi di Hera (San Vitale, Tiro a Segno e Borgo Panigale) negli anni di riferimento per la simulazione.

Figura 4-4: area di analisi dei prelievi (24 Comuni dell'areale bolognese) e catasto pozzi

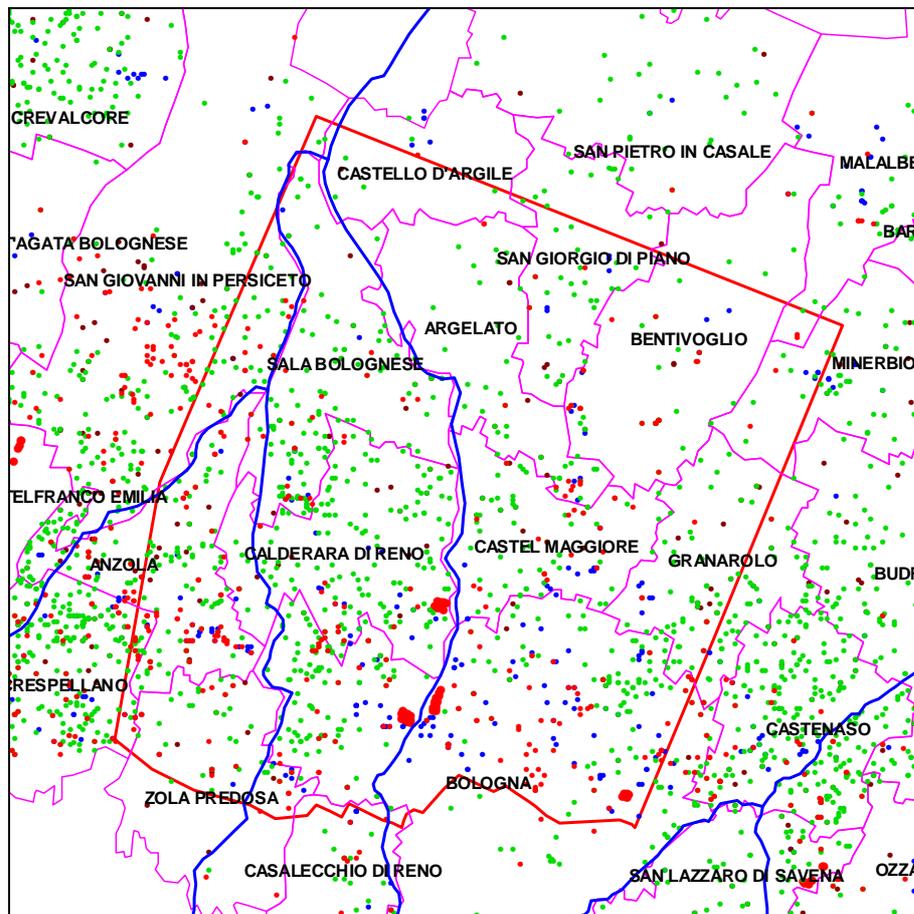
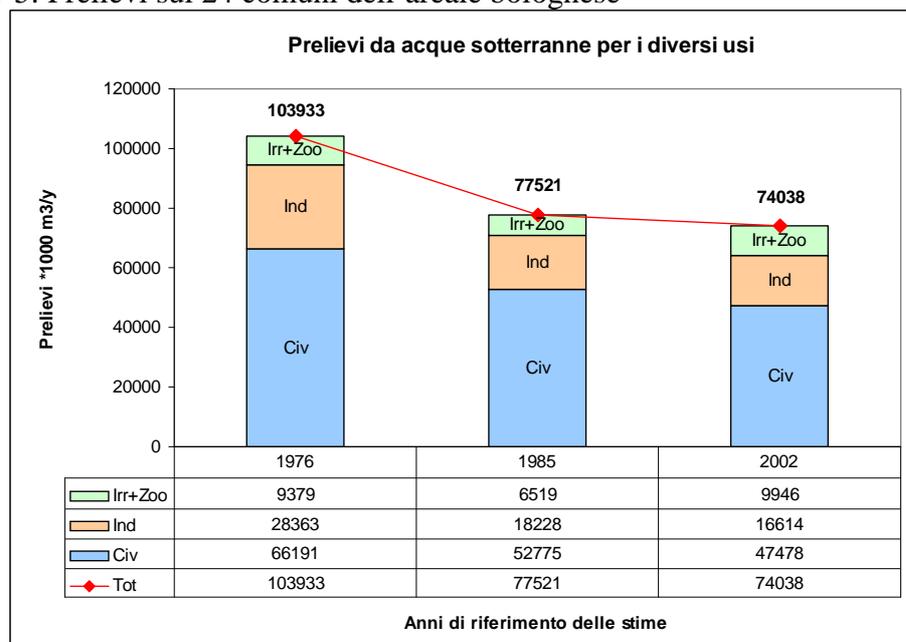


Figura 4-5: Prelievi sui 24 comuni dell'areale bolognese



La fase successiva del lavoro ha riguardato le ulteriori elaborazioni necessarie all'utilizzo di tali dati all'interno del modello matematico e quindi finalizzate ad assegnare i prelievi alle corrette posizioni nello spazio tridimensionale. In alcuni casi la conoscenza diretta è abbastanza buona (per i prelievi civili-acquedottistici), ma in altri casi è incerta, come accade di solito per la estrazione di acqua per gli altri usi.

Nei primi casi, che riguardano soprattutto il prelievo civile acquedottistico, è nota la posizione del punto di prelievo nel piano, ed è stato necessario valutare la posizione verticale, utilizzando la conoscenza della posizione e dello spessore dei filtri del pozzo. Un'altra verifica ha riguardato l'attribuzione nello spazio tridimensionale in coerenza con le geometrie e la geologia. L'operazione è stata condotta controllando dapprima la litologia assegnata dal modello alla posizione di interesse, in modo da scartare posizioni corrispondenti a sedimenti poco permeabili; poi, il deflusso è stato ripartito in modo proporzionale all'altezza di ciascun tratto filtrante.

Negli altri casi, la stima è indipendente dalla conoscenza dei pozzi, e questo vale soprattutto per gli altri usi. È stato utilizzato il catasto pozzi all'interno del quale sono stati selezionati su base comunale i pozzi in funzione dell'uso e della conoscenza della posizione dei filtri o della profondità (Tabella 4-1) e su questi è stata distribuita la stima di prelievo.

Tabella 4-1: numero e profondità media dei pozzi presenti nel catasto pozzi

uso	civile non acq.		industriale		irriguo		zootecnico	
	num. pozzi	prof. media	num. pozzi	prof. media	num. pozzi	prof. media	num. pozzi	prof. media
Comune								
Anzola	52	57	25	110	123	58	30	59
Argelato	11	86	7	108	33	83	4	83
Baricella			6	136	39	23	1	8
Bentivoglio	13	60	4	202	22	34	2	7
Bologna	106	94	91	107	259	50	11	46
Budrio	8	36	16	167	133	69	16	46
Calderara di Reno	9	32	15	68	124	36	12	34
Casalecchio di Reno	8	39	7	165	16	19	2	58
Castel Maggiore	23	35	12	91	61	39	13	25
Castello d'Argile	1	33	5	51	8	93	1	110
Castenaso	28	51	19	81	204	54	26	62
Crespellano	88	60	23	77	266	56	30	48
Crevalcore	3	50	12	303	312	35	33	62
Granarolo	7	105	10	139	73	56	19	38
Malalbergo	9	14	13	231	28	20		
Minerbio	4	14	18	291	48	41	12	77
Ozzano	8	69	2	83	21	68	8	69
S.Agata Bolognese	5	81	3	42	12	89	4	144
S.Giorgio di Piano	4	25	4	137	37	31	5	51
S.Giovanni in Persiceto	81	54	10	189	156	48	37	64
S.Lazzaro di Savena	9	43	2	52	70	68	16	60
S.Pietro in Casale	1	9	3	233	26	51	2	99
Sala Bolognese	18	79	10	56	100	47	14	54
Zola Predosa	19	54	6	110	33	66	10	66
Totale complessivo	515	63	323	131	2204	50	308	56

4.5 SCHEMA DEL MODELLO DI FLUSSO

4.5.1 Discretizzazione nello spazio

L'area di studio è stato discretizzata con maglie di lato 500 m (Figura 4-6) nel piano orizzontale mentre in verticale lo spessore complessivo del sistema sedimentario è stato suddiviso in 70 piani per un numero complessivo di celle pari a 252.000. Di queste a valle delle disattivazioni necessarie sono risultate attive per la griglia di calcolo un numero di celle pari a 117.670. Si è inoltre assunta una orientazione del reticolo di -22 gradi in modo da fare coincidere l'asse X del reticolo con la direzione parallela al margine appenninico. La discretizzazione secondo l'asse verticale Z è stata studiata in modo da:

1. garantire un dettaglio maggiore legato al livello di conoscenza strutturale del sistema;
2. garantire la coerenza del primo strato di celle con le quote della base del letto del fiume;

3. rispecchiare le morfologie dei complessi acquiferi riconosciuti;
4. garantire il dettaglio necessario per la successiva applicazione del modello di subsidenza.

Si è quindi provveduto ad utilizzare una discretizzazione verticale con altezza delle celle variabile ottenuta associando 10 piani per ciascun complesso acquifero appartenente al gruppo acquifero A (A1, A2, A3, A4, per un totale di 40 piani, il complesso A0 risulta compreso all'interno di A1), 20 piani per il gruppo acquifero B e 10 per il gruppo acquifero C. Allo stesso tempo si è provveduto a deformare in verticale la griglia secondo le reali quote delle basi dei diversi complessi e gruppi acquiferi. Il risultato ottenuto è riportato in Figura 4-7 e rappresenta una sezione verticale del modello in direzione SW-NE.

Figura 4-6: vista in pianta del reticolo di discretizzazione

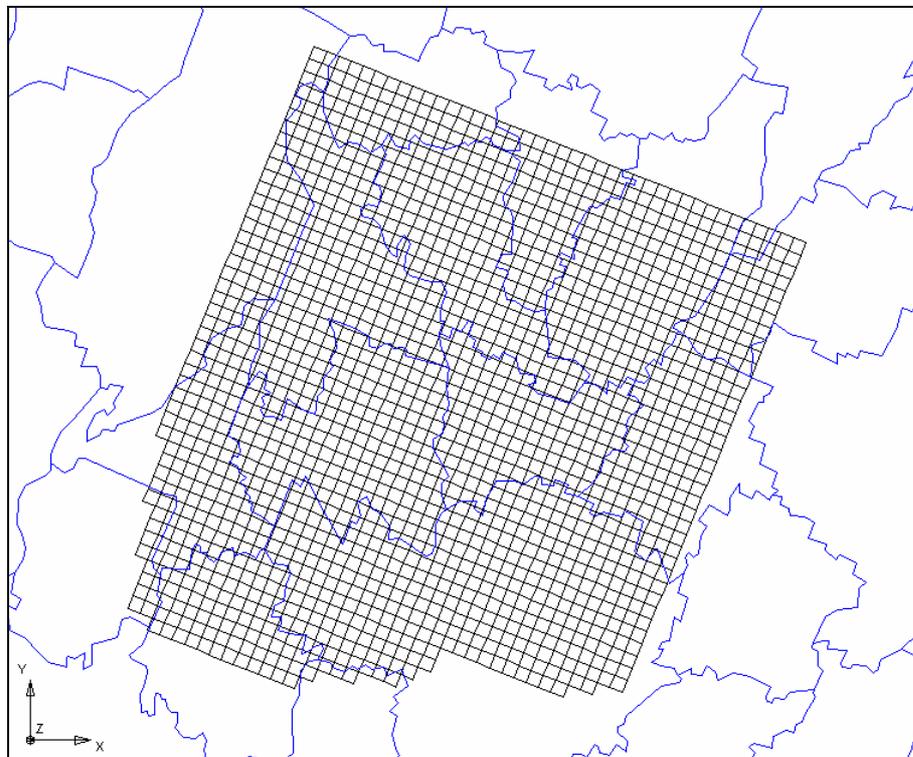
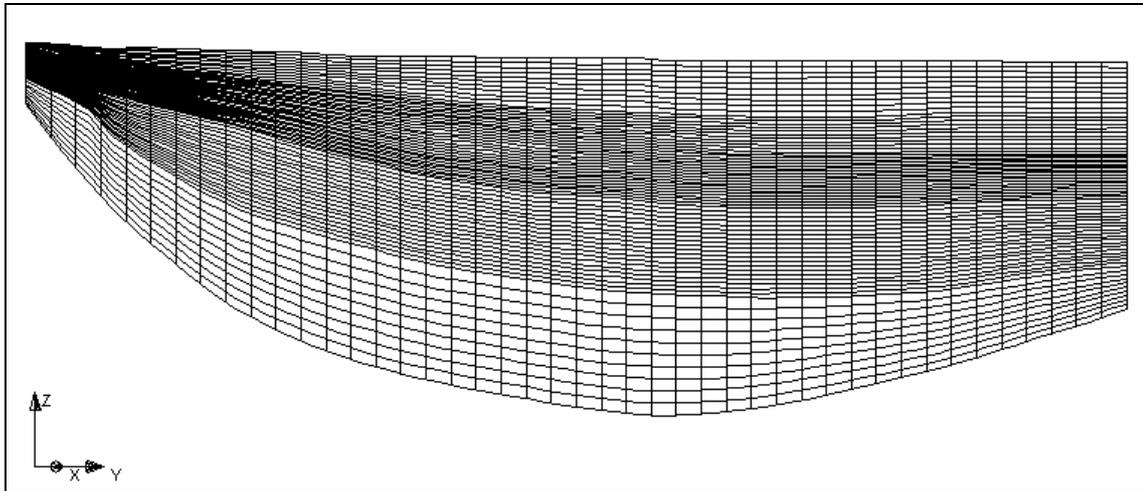


Figura 4-7: vista in sezione del reticolo di discretizzazione



4.5.2 Discretizzazione nel tempo

Come orizzonte temporale di riferimento per il modello è stato utilizzato un periodo di 16 anni corrispondenti all'intervallo temporale 1983 – 1998. Tale scelta è stata condizionata non solo dalla disponibilità dei dati esistenti ma anche dal fatto di dovere abbracciare un periodo abbastanza lungo e funzionale alla successiva applicazione relativa alla subsidenza. Tale periodo inoltre vede come punto iniziale un istante confrontabile col precedente lavoro Idroser 1985 e copre un periodo durante il quale sono state effettuate quattro misure di livellazione (1983, 1987, 1992, 1999).

La modellistica è stata quindi implementata per un regime transitorio di sedici anni con passo temporale pari ad un anno.

4.5.3 Condizioni al bordo, condizione iniziale

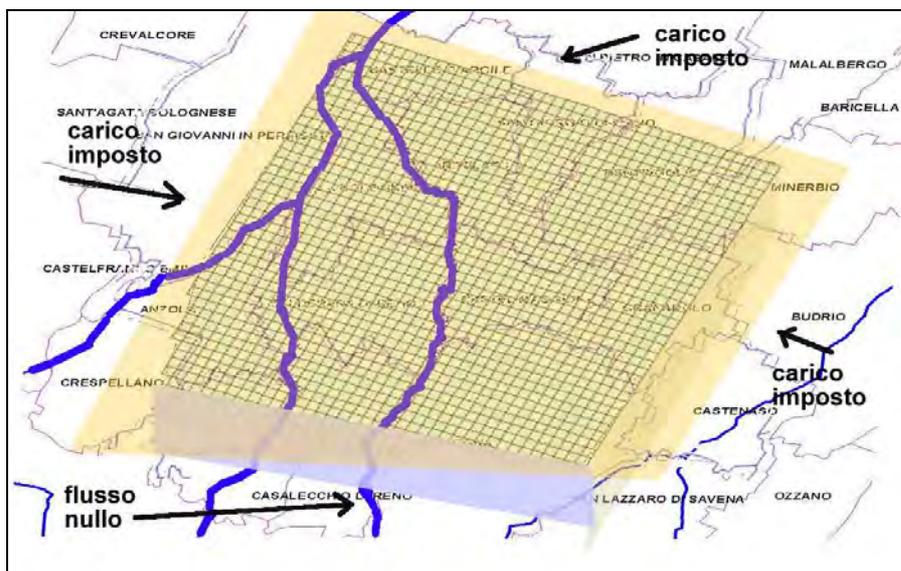
Le condizioni al contorno sono state assegnate come segue (Figura 4-8):

- pressione imposta sul lato di valle e sui fianchi (NW e SE). La pressione al bordo è sempre dipendente dal tempo e riassetata anno per anno sulla base della piezometria media di ciascun anno;
- flusso nullo in corrispondenza della superficie basale del sistema e sul lato di monte.

La condizione iniziale è stata invece ottenuta dalla distribuzione del carico idraulico al 1983, istante iniziale della simulazione, con gli opportuni adeguamenti ottenuti dai dati disponibili sulla falda freatica ed alcuni adattamenti manuali.

Questo è uno degli aspetti che ha mostrato criticità maggiore: come è noto, infatti, a nord ovest di Bologna la conoide del Reno ha una vasta e profonda plaga di terreno non saturo, conseguenza del drenaggio annoso delle falde in quella zona. Lo stesso succede in un'altra zona, meno estesa, localizzata a sud est della città.

Figura 4-8: schema delle condizioni al contorno



Per simulare correttamente questa parte del problema, è possibile impostare il modello in due modi:

1. il primo, più complesso, può prevedere una sorta di pre-modello, attraverso il quale tentare di riprodurre le condizioni che hanno generato la situazione di riferimento al 1983, che rappresenta invece l'istante di tempo preso ad inizio per lo studio vero e proprio;
2. il secondo, è quello di costruire una condizione iniziale adeguata e, attraverso questa, forzare il sistema a partire immediatamente da tale condizione.

E' intuitivo che la seconda possibilità è la più semplice ed efficace, anche perché può essere basata sulla buona conoscenza di dettaglio della superficie della tavola d'acqua per via sperimentale; tuttavia, come si è già visto, Modflow non realizza, per sua natura, la simulazione del flusso idrico nel mezzo non saturo. Ciò avviene con un meccanismo duplice, attraverso il quale da un lato è possibile codificare le celle del sistema che devono essere considerate temporaneamente prive d'acqua, dall'altro è possibile applicare un'equazione per il calcolo del recupero idrico quando ve ne sono le condizioni. Si tratta di un meccanismo instabile e complesso, che tende purtroppo a peggiorare le già difficili condizioni del risolutore alle differenze finite.

In definitiva, la soluzione adottata è stata quella di costruire una condizione iniziale codificando come celle prive d'acqua, quindi inizialmente escluse dal sistema di calcolo, quelle corrispondenti al volume di roccia non saturo dedotto dalle osservazioni freatimetriche disponibili.

4.5.4 Regionalizzazione 3-d del carico idraulico

4.5.4.1 Analisi strutturale del carico idraulico

Lo scopo dell'analisi strutturale è quella di fornire i modelli di variabilità spaziale (variogrammi teorici) da utilizzare nella fase di regionalizzazione che corrisponde invece al processo di stima, sviluppabile con uno dei tanti metodi disponibili, e che

consente di calcolare il valore più probabile di una certa variabile regionale in una certa posizione dello spazio. Nel caso specifico, la variabile di interesse è costituita dal carico idraulico osservato in pozzo. La stima è stata svolta al fine di assegnare:

- la condizione iniziale, cioè il valore del carico all'inizio della simulazione con il modello, in tutti i punti della griglia adottata;
- le condizioni al bordo del tipo a potenziale (carico) imposto, ove ciò è necessario. Dato che questo modello è stato basato su una serie di 16 istanti nel tempo, è stato necessario eseguire le regionalizzazioni per ciascuno di essi e quindi esportare i risultati sotto forma di condizioni imposte al modello di flusso.

Nelle figure seguenti (Figura 4-9, Figura 4-10, Figura 4-11) sono riportati i semivariogrammi sperimentali utilizzati nelle tre direzioni per la regionalizzazione dei dati.

Figura 4-9: Semivariogramma sperimentale (verde) e teorico (rosso) per l'asse X (distanze in metri, varianze in m^2)

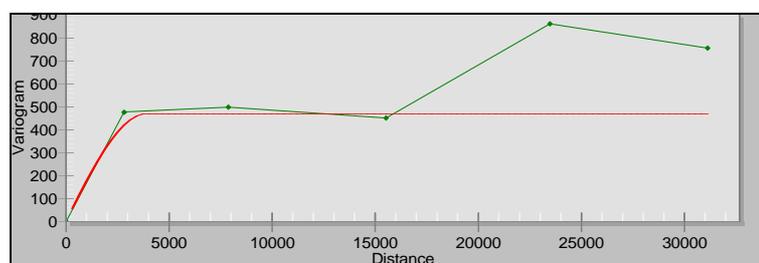


Figura 4-10: Semivariogramma sperimentale (verde) e teorico (rosso) per l'asse Y (distanze in metri, varianze in m^2)

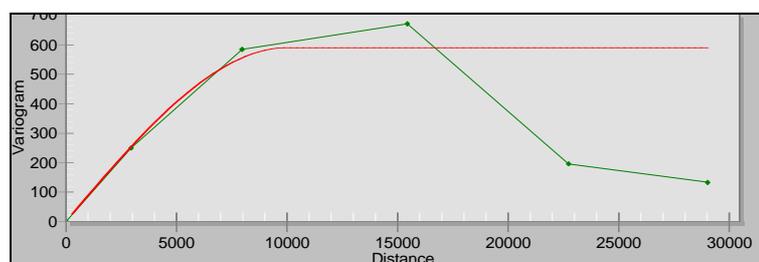


Figura 4-11: Semivariogramma sperimentale (verde) e teorico (rosso) per l'asse Z (distanze in metri, varianze in m^2)



4.5.4.2 Distribuzione del carico idraulico

Le regionalizzazioni sono state eseguite con uno dei metodi più diffusi in geostatistica, il kriging ordinario, che si basa sulla condizione di stazionarietà della funzione variogramma (e quindi delle realizzazioni che essa rappresenta). Attraverso lo studio e l'applicazione di tali funzioni è possibile stimare la variabile di interesse in tutti i punti dello spazio nell'ambito del dominio di calcolo. Nelle immagini di Figura 4-12, Figura 4-14 e Figura 4-14 sono riportati i risultati dell'applicazione, basata sui modelli di variogramma precedenti; va notato ancora che, al di là dell'esposizione grafica, i risultati delle regionalizzazioni sono stati usati per imporre le condizioni di bordo variabili nel tempo e la condizione iniziale.

Figura 4-12: carico idraulico anno 1983, Layer 1, Layer 44 e sezione 33

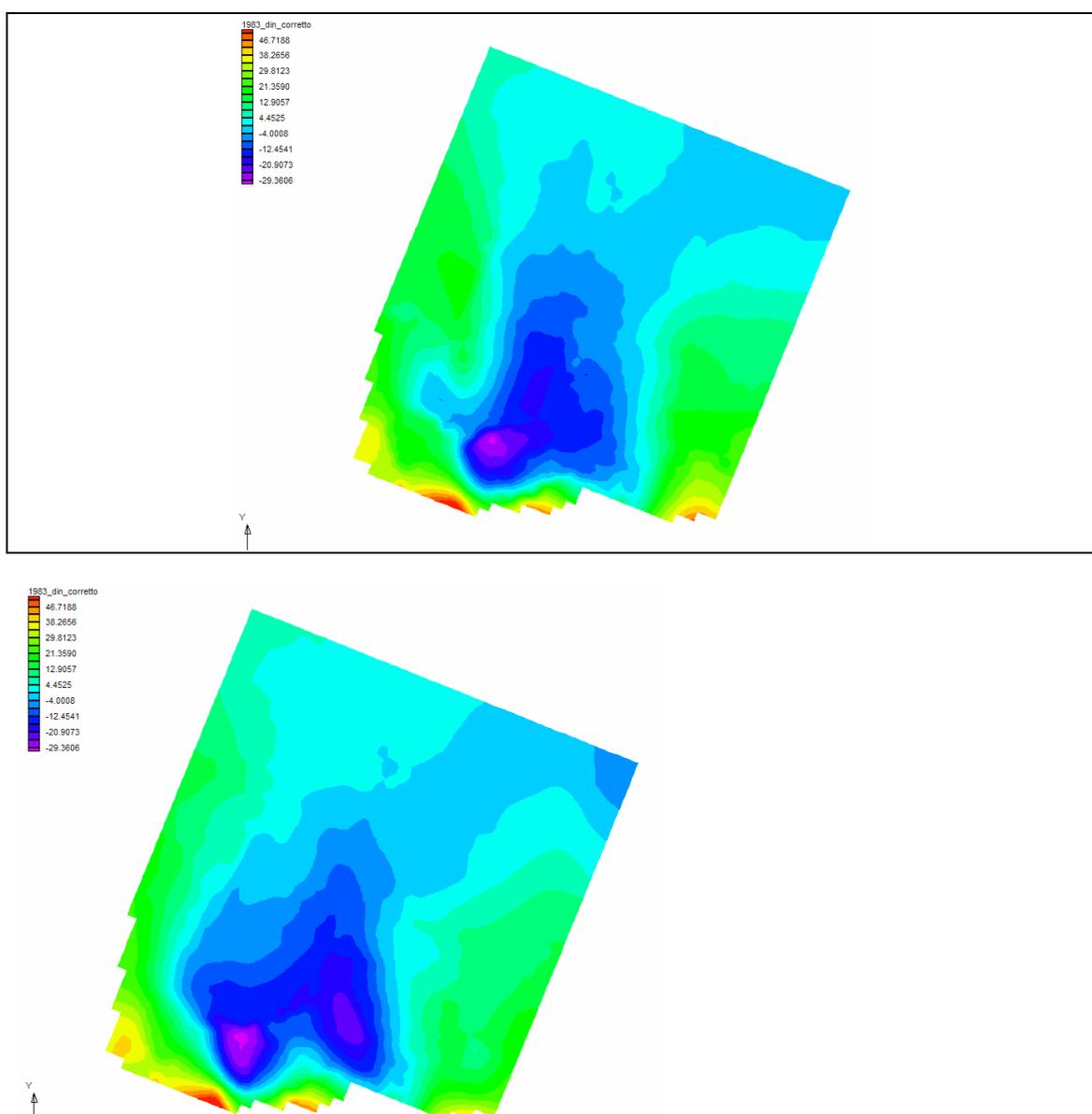


Figura 4-13: carico idraulico anno 1983 sezione 33

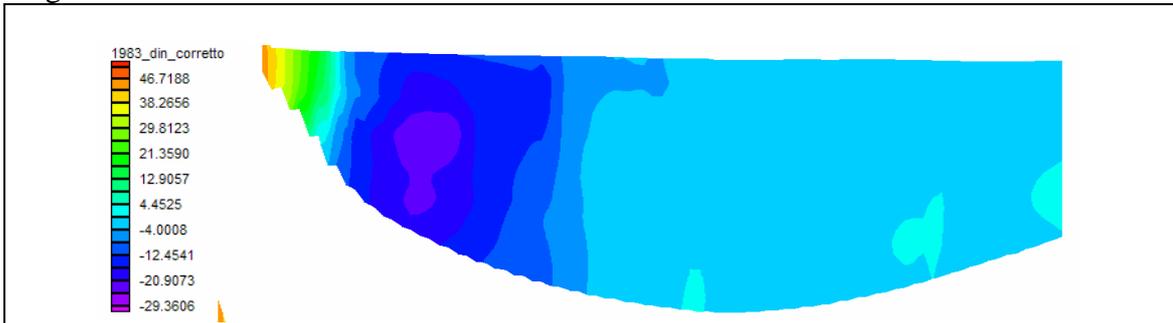
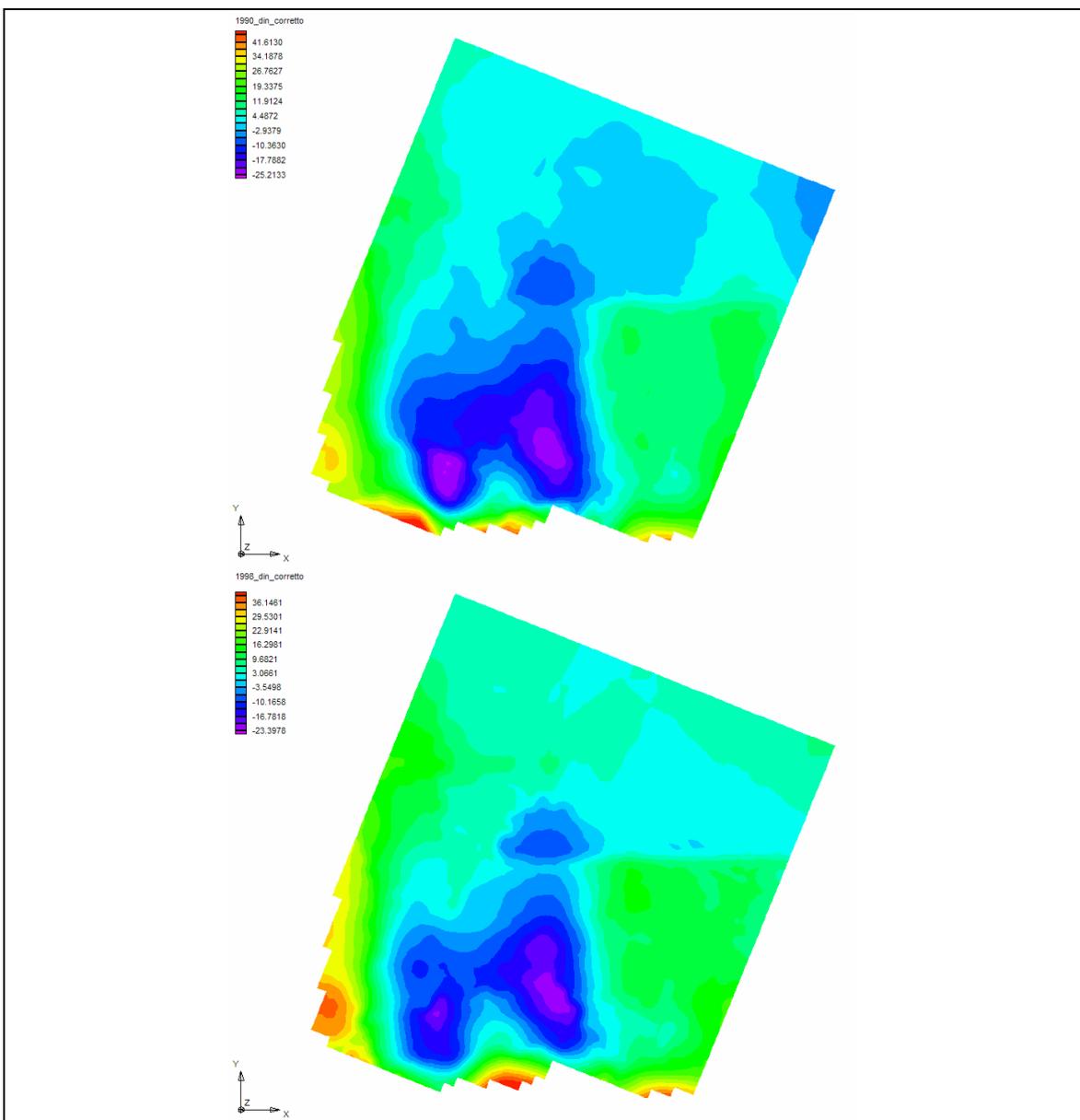


Figura 4-14: carico idraulico Layer 44, anni 1990 e 1998



4.5.5 Struttura del sistema sedimentario

L'assetto è stato ottenuto operando in due fasi diverse. La prima è stata appoggiata sulle conoscenze di carattere strutturale e sedimentario portate a sintesi nell'attività A 1.1 del progetto complessivo da parte del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, con la ricostruzione tridimensionale della conoide, mentre la seconda è consistita nella taratura delle permeabilità e degli immagazzinamenti sulla base della risposta idraulica del modello.

La prima fase è stata realizzata con una applicazione di T-PROGS (Transition Probability Geostatistical Software) utilizzando i dati e le conoscenze esistenti (banca dati geognostici della Regione, ricostruzione tridimensionale della conoide, Riserve idriche sotterranee della Regione). Questa fase è stata reiterata diverse volte fino ad arrivare a un livello che – pur non rappresentando esaustivamente il dettaglio dell'ambiente sedimentario della conoide del Reno – è stato tuttavia ritenuto adeguato per passare alla fase successiva.

Sia per esigenze di tipo computazionale ma soprattutto per ottenere un maggiore condizionamento della distribuzione delle litologie ottenibili dalle simulazioni rispetto alla ricostruzione tridimensionale della conoide, il T-PROGS è stato utilizzato in maniera distinta all'interno dei singoli complessi/gruppi acquiferi riconosciuti (A1, A2, A3, A4, B e C).

4.5.5.1 *Le funzioni di distribuzione delle sequenze stratigrafiche*

In anni recenti l'idrogeologia si è arricchita dei metodi di analisi della geostatistica, tra i quali è interessante la possibilità di simulare le sequenze stratigrafiche di un corpo sedimentario alluvionale mediante un processo di regionalizzazione. In questo modo, invece di assegnare a ciascuna cella della discretizzazione adottata una caratterizzazione sedimentaria definita e derivata ad esempio da un elaborato redatto manualmente, si può basare il processo sulla possibilità di generare automaticamente la distribuzione probabilisticamente più attendibile delle serie stratigrafiche.

Il metodo prevede, come di consueto in geostatistica, due momenti separati: il primo è quello dello studio e della identificazione delle funzioni che descrivono le proprietà spaziali della variabile di interesse, mentre il secondo è sempre quello della stima (o regionalizzazione) del valore della variabile nei punti dello spazio che servono, quindi in corrispondenza di tutti i nodi della griglia del modello. Tuttavia, a differenza delle funzioni variogramma usate per stimare la distribuzione del carico idraulico, nel caso specifico della geometria sedimentaria è necessario seguire un approccio diverso per almeno due ordini di motivi:

1. il primo si riferisce alla natura della variabile da regionalizzare, che non è espressa sotto forma di uno scalare, ma sotto forma di una variabile di tipo descrittivo (argilla, sabbia ecc.);
2. il secondo dipende invece dalle proprietà con cui la variabile "sedimento" è distribuita nello spazio e che devono essere riprodotte nel modo migliore. In particolare, è necessario manipolare la variabile in modo che l'assetto lenticolare dei sedimenti venga riconosciuto il più possibile. I metodi che consentono di realizzare questo schema di lavoro sono quelli delle simulazioni condizionali per variabili indicatrici: le variabili indicatrici, in statistica, sono quelle che possono assumere solo due valori (es.: 0/1, on/off, si/no) e a queste ci

si può riferire per rappresentare una stratigrafia. E' chiaro che in questo modo si garantisce che la medesima posizione dello spazio può essere descritta da un solo valore positivo e quindi la unicità delle osservazioni.

Il software che è stato utilizzato è il T-PROGS, che è presente come modulo di supporto nell'ambito di GMS-Modflow2000 e che è stato quindi giocoforza prendere come risorsa di riferimento. L'approccio specifico di T-PROGS è quello della definizione delle funzioni sotto forma di probabilità di transizione da un tipo di roccia ad un altro nello spazio, ovvero di stabilire il grado di probabilità che ha ciascuna variabile di passare ad una qualsiasi altra del gruppo. La probabilità è espressa convenzionalmente tra un minimo pari a zero ed un massimo pari ad 1 e viene assegnata per ciascuno degli assi dello spazio cartesiano tridimensionale e per ciascuna delle coppie di litotipi osservati.

Ricordando che è stata eseguita una simulazione condizionale all'interno di ogni complesso/gruppo acquifero nelle immagini che seguono sono riportati alcuni esempi che sono riferiti ai complessi acquiferi indicati. In particolare:

- due esempi di funzioni di transizione tra sabbia e argilla sull'asse Z (la profondità) per il complesso acquifero A2 (Figura 4-15) ed A3 (Figura 4-16);
- l'insieme di tutte le funzioni di transizione definite per tutte le coppie dei litotipi considerati (ghiaia, sabbia media, sabbia fine, limo-argilla) per lo stesso asse Z all'interno del complesso acquifero A3 (Figura 4-17);
- l'insieme di tutte le funzioni per tutte le coppie e per tutti gli assi ($4 \times 4 \times 3 = 48$), da cui si deriva l'insieme dei coefficienti necessari alla seconda fase del calcolo, quello della simulazione condizionale vera e propria. All'interno del complesso acquifero A3 (Figura 4-18)

Figura 4-15: Esempio di probabilità di transizione tra sabbia e argilla nel complesso acquifero A2 (asse Z)

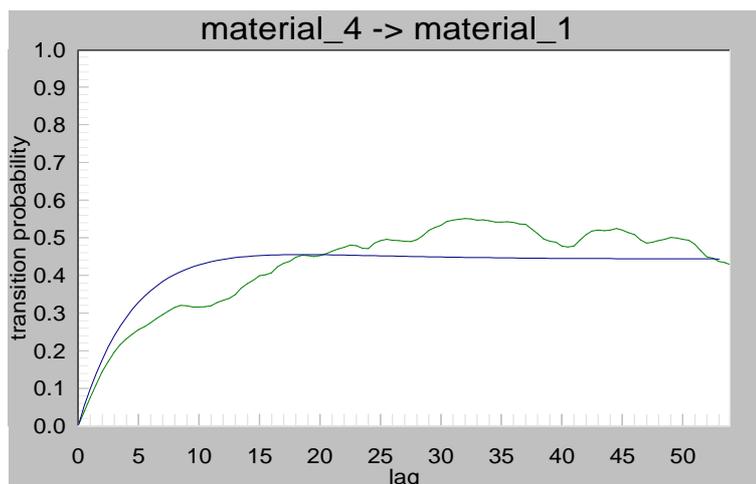


Figura 4-16: Esempio di probabilità di transizione tra sabbia e argilla nel complesso acquifero A3 (asse Z)

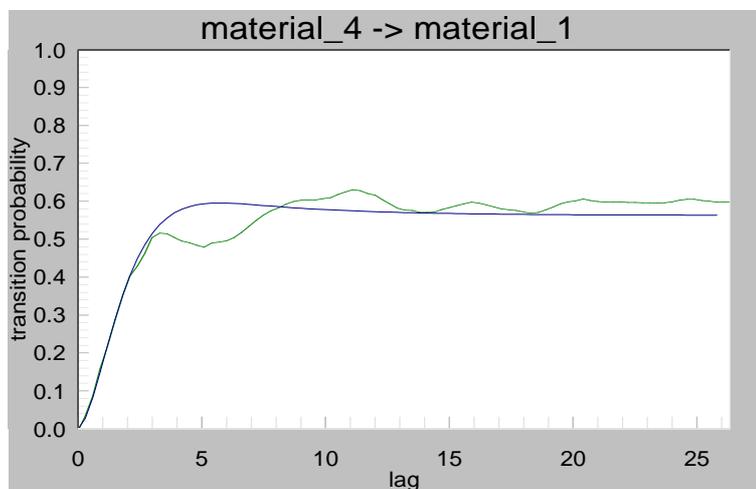


Figura 4-17: Schema dell'insieme delle funzioni di transizione del complesso acquifero A3 (asse Z)

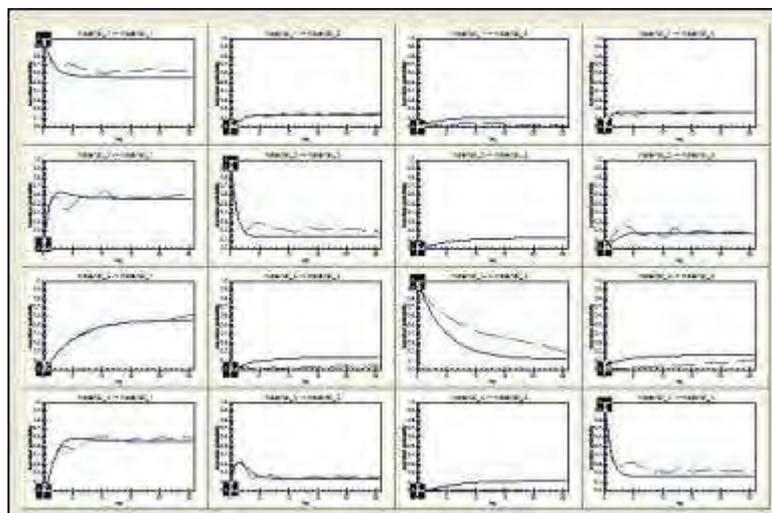
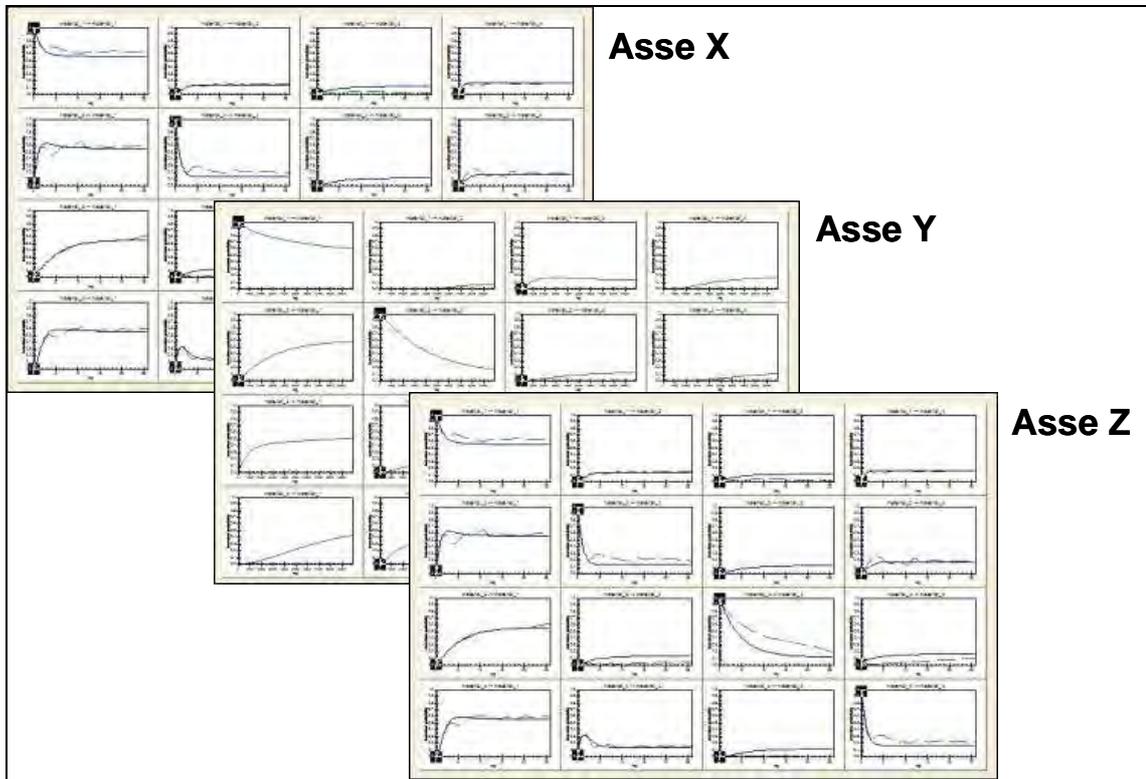


Figura 4-18: Schema dell'intero sistema di funzioni di transizione per il complesso acquifero A3
(4x4 variabili x 3 assi = 48 funzioni)



4.5.5.2 *La distribuzione delle facies nelle tre dimensioni*

Le immagini che seguono sono alcuni esempi dei risultati ottenuti con l'applicazione di T-PROGS secondo le modalità descritte al paragrafo precedente. La frequenza delle litologie, ricavata dai dati disponibili è riportata in Figura 4-19; questa distribuzione è il risultato derivante dall'assemblaggio sull'intero sistema dei parziali ottenuti dalle simulazioni distinte per i diversi complessi/gruppi acquiferi ciascuna delle quali condizionata dalle relative proporzioni tra le diverse litologie presenti. Le immagini successive (Figura 4-20, Figura 4-21, Figura 4-22, Figura 4-23, Figura 4-24, Figura 4-25) riportano la distribuzione delle litologie ottenuta sul piano geografico e per 4 diverse profondità espresse mediante il numero del layer corrispondente; le ultime due immagini riportano invece le serie stratigrafiche ottenute in corrispondenza di due sezioni di riferimento. La legenda dei colori è la seguente: nero: limi e argille; toni di grigio scuro: sabbie medie; toni di grigio chiaro: sabbie fini; bianco: ghiaie.

Figura 4-19: distribuzione delle litologie ottenuta da T-Progs

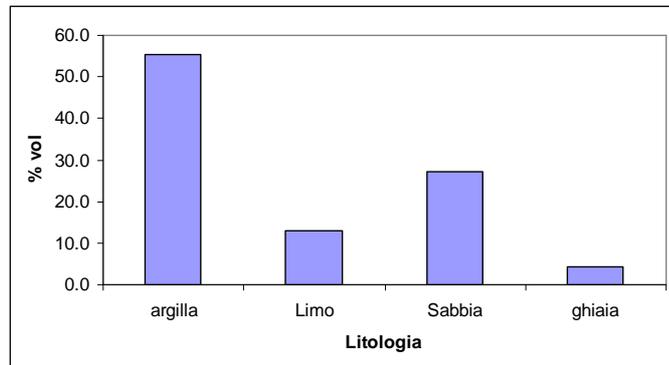


Figura 4-20: distribuzione delle litologie ottenuta dal T-Progs (layer 1)

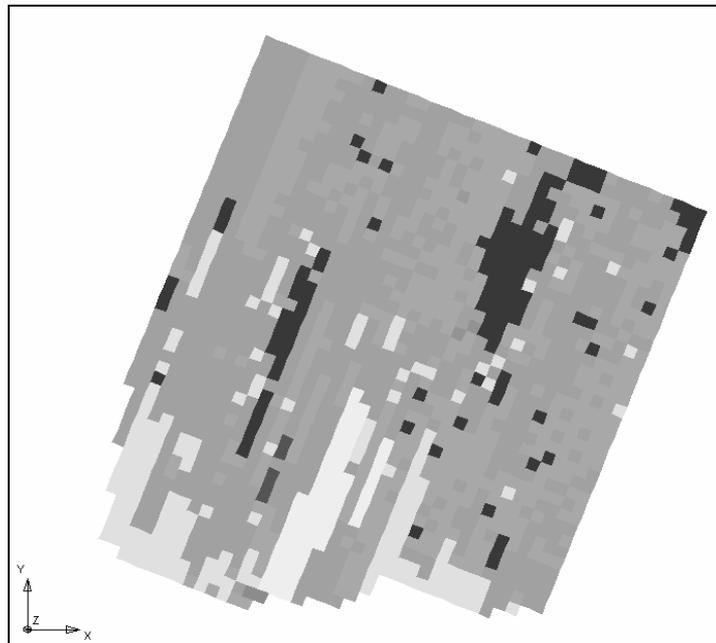


Figura 4-21: distribuzione delle litologie ottenuta dal T-Progs (layer 13)

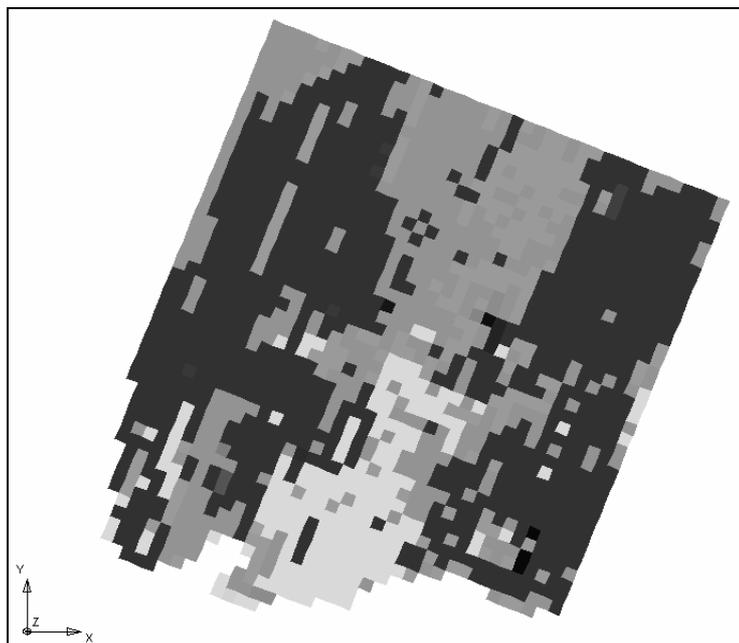


Figura 4-22: distribuzione delle litologie ottenuta dal T-Progs (layer 30)

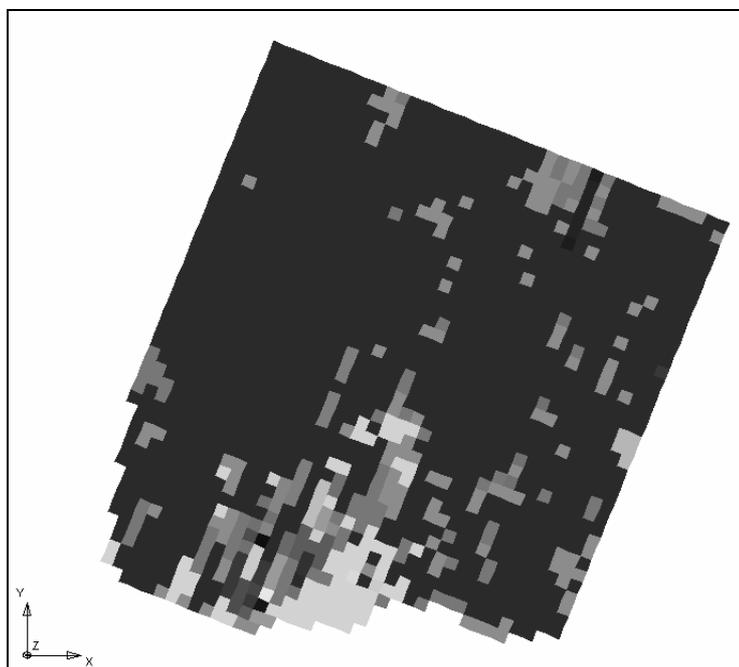


Figura 4-23: distribuzione delle litologie ottenuta dal T-Progs (layer 42)

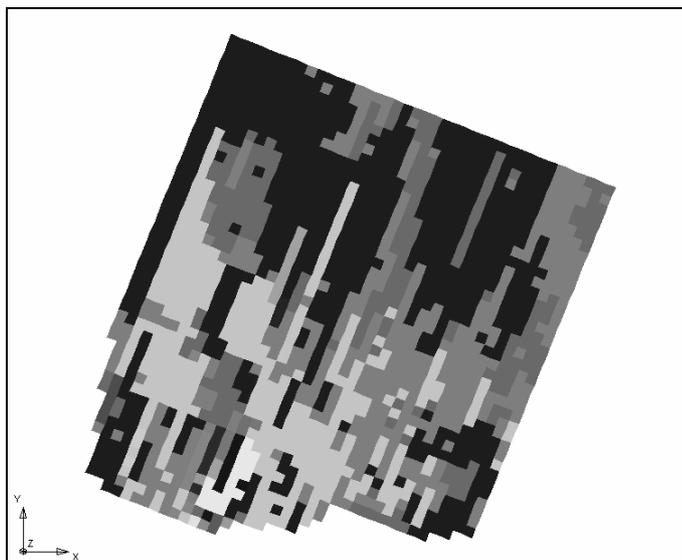


Figura 4-24: distribuzione delle litologie ottenuta dal T-Progs (sezione 21)

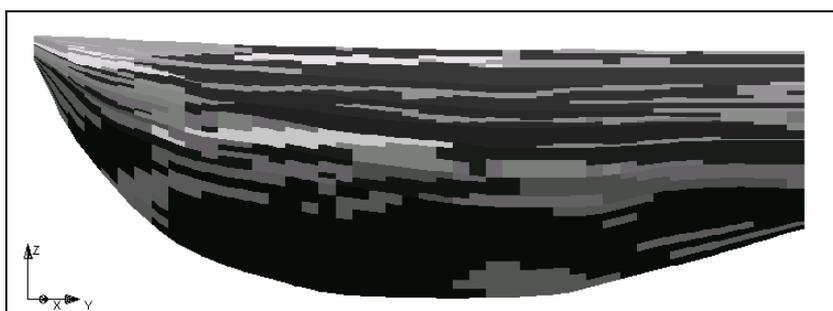
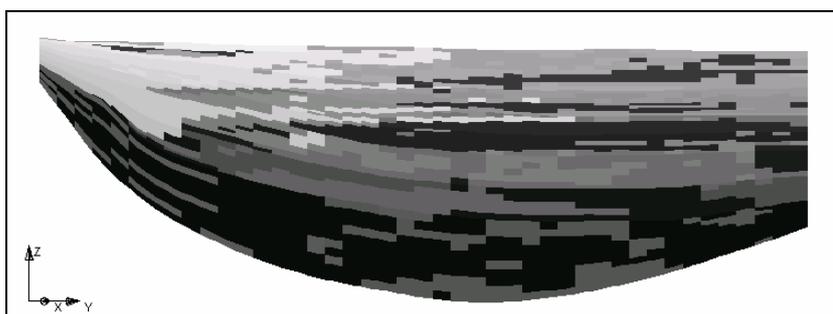


Figura 4-25: distribuzione delle litologie ottenuta dal T-Progs (sezione 32)



4.5.6 Parametrizzazione idraulica del sistema

Dopo aver definito la litologia in tutti i nodi della griglia, la fase successiva dello sviluppo è stata quella di assegnare a ciascuno di essi i parametri idraulici necessari (permeabilità orizzontale e verticale, porosità, immagazzinamento ecc.), in funzione della litologia corrispondente. Questa attribuzione è il primo passaggio nell'ambito della

taratura e corrisponde al sistema di primo tentativo, peraltro destinato a subire modifiche anche notevoli nel corso della taratura stessa; ciò è particolarmente vero nel caso di un approccio del tipo più sofisticato, corrispondente ad un sistema disomogeneo. Nel corso della prima fase, precedentemente descritta, della regionalizzazione del dato stratigrafico, è stata utilizzata una classificazione dei sedimenti su base quaternaria (ghiaia, sabbia, limo, argilla), adeguata a tale fase, ma non adeguata alla necessità di schematizzare le k e le S col livello di disomogeneità richiesto. Per conseguenza, è stato realizzato un approfondimento delle proprietà idrauliche del mezzo poroso attraverso l'uso dei risultati dei test in pozzo disponibili (permeabilità orizzontale e immagazzinamento), attraverso il quale le classi di materiali inizialmente definite in numero di quattro sono state aumentate di numero fino a 32 (Tabella 4-2), assegnando a ciascuna delle classi iniziali una ripartizione ulteriore di 7 intervalli ciascuna, per un totale di 28 classi. A queste sono poi state aggiunte, nel corso della taratura, ancora 4 classi, per un totale definitivo di 32.

E' interessante notare che il passaggio dalla fase di regionalizzazione delle stratigrafie alla taratura idraulica vera e propria, provoca la necessità di cambiare le modalità di descrizione e di percezione della struttura sotterranea; infatti, il mezzo poroso che in termini sedimentologici, è classificabile abbastanza nettamente sulla base della litologia prevalente (ghiaia ecc.), in termini idraulici è meno facilmente classificabile, dato che la medesima permeabilità può essere assegnata a miscugli diversi (ad esempio, una ghiaia mista a limo argilla può avere una permeabilità inferiore a quella di una sabbia pulita). Da ricordare anche che, al livello della discretizzazione adottata, la permeabilità che si ottiene è la permeabilità rappresentativa di un elemento di volume che può raggiungere anche i 5 milioni di metri cubi di roccia, con una variabilità interna ben superiore a quella schematizzata.

Tabella 4-2: Schema dei parametri idraulici utilizzati nel modello al termine della taratura

litologia	ko (m/s)		kv (m/s)		Immagazzinamento specifico (1/m)	
	min	max	min	max	min	max
argille	1.00E-08	6.00E-06	1.00E-09	4.00E-07	1.00E-07	7.00E-05
limi	1.10E-05	6.00E-05	1.00E-07	5.00E-07	7.00E-08	7.00E-05
sabbie	2.01E-06	5.00E-05	1.00E-08	5.00E-06	8.00E-07	5.00E-05
ghiaie	1.00E-04	1.00E-02	1.00E-05	5.00E-03	5.00E-04	1.00E-02

4.6 CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO

Nel precedente paragrafo 4.4 sono stati descritti i dati utilizzati per costituire i termini sorgenti del modello. In particolare:

- i dati piezometrici regionalizzati utilizzati per le condizioni al contorno ed iniziale;
- la distribuzione dei prelievi nello spazio e nel tempo;
- la ricarica zenitale e da fiume.

Relativamente alla condizione iniziale in fase di taratura e rispetto a quanto riportato al paragrafo 4.5.3 si è dovuto provvedere ad un azzeramento della pressione nell'area

corrispondente alla zona non satura posta nel tratto di conoide ad ovest di Bologna e, in misura inferiore, in altre parti dell'area di lavoro.

E' noto infatti che lo sfruttamento delle falde ha aumentato, nel corso del tempo, lo spessore del mezzo non saturo: per riprodurre questa particolare situazione sarebbe stato, a rigore, necessario configurare una sorta di pre-modello per poter applicare una condizione di partenza adeguata alle circostanze. Dovendo evitare per evidenti motivi di risorse questo passaggio, e dovendo aggirare in qualche modo uno dei limiti del simulatore (l'equazione del flusso, per come è configurata da Modflow, non consente la gestione del grado di saturazione), si è optato per una condizione iniziale di tipo assegnato a priori corrispondente alle quote d'acqua effettivamente rilevate e documentate nella letteratura disponibile (Viel, 1998) e quelle reperite presso il Comune di Bologna.

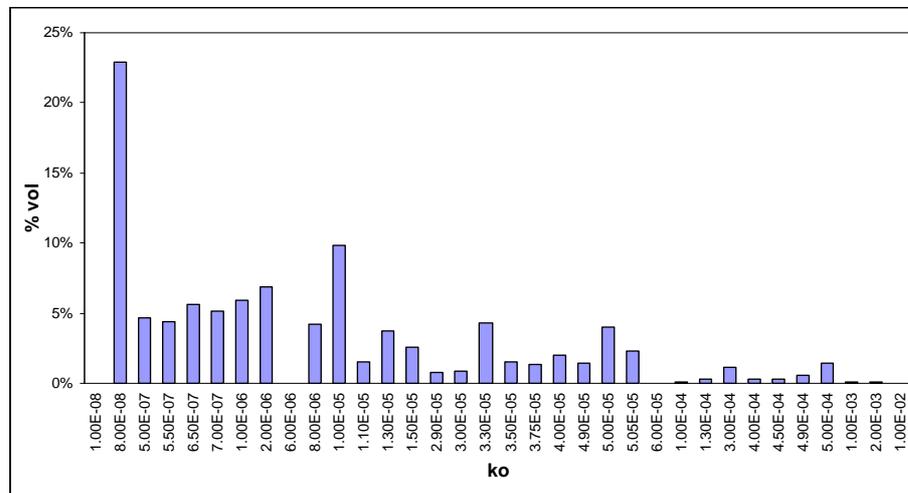
Nel corso delle simulazioni, questa condizione viene poi rilasciata, nel senso che il meccanismo di calcolo consente, entro certi limiti, di poter rioccupare il volume di roccia non satura a seguito dell'aumento di pressione.

La calibrazione del modello è poi avvenuta nelle seguenti fasi:

- (1) una prima fase di precalibrazione in regime transitorio su 1 anno dell'intervallo relativo al 1983, che ha portato ad un primo livello di definizione delle k e delle S , non molto diverso dall'ipotesi iniziale, in pratica mediante la corrispondenza tra litologia prevalente e permeabilità di "letteratura";
- (2) la fase di calibrazione vera e propria sull'intero periodo 1983 – 1998 (in regime transitorio), che ha portato al livello di definizione di k e S definitivo e, dove necessario, alla precisazione dei prelievi;
- (3) ripetizione della fase (2) fino a portare entro un intervallo di confidenza di 0,5 m lo scarto tra valori osservati e valori misurati per almeno l'80 % dei casi disponibili;
- (4) assestamento finale del bilancio (ricarica zenitale e ricarica fluviale).

Nella Figura 4-26 è riportata la frequenza di distribuzione delle permeabilità al termine della taratura, mentre nelle figure successive sono riportate le distribuzioni della k in alcune sezioni del modello.

Figura 4-26: frequenza di distribuzione delle permeabilità (fine taratura)



4.6.1 Controllo della taratura del modello

Il controllo della taratura del modello avviene inizialmente attraverso la verifica diretta della corrispondenza dei valori calcolati dal modello con le serie storiche osservate. Pertanto nelle figure che seguono (Figura 4-27, Figura 4-28, Figura 4-29, Figura 4-30, Figura 4-31) vengono riportati sia il confronto dei dati delle serie storiche osservate (linee tratteggiate che rappresentano un intervallo di confidenza $\pm 1m$) con quelli calcolati su alcuni punti d'acqua significativi, sia gli scatterplot dei valori osservati/calcolati per alcuni anni, evidenziando il buon risultato raggiunto dalla modellizzazione.

Figura 4-27: Serie storiche osservate/calcolate (Pozzo BO26-00)

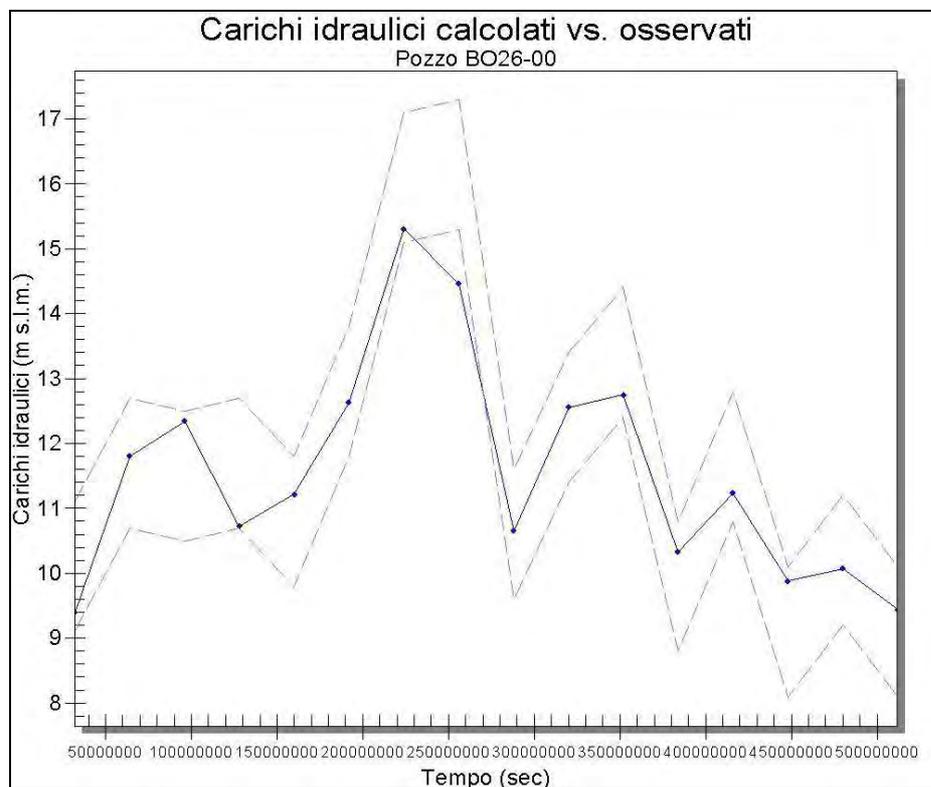


Figura 4-28: Serie storiche osservate/calcolate (Pozzo BO19-00)

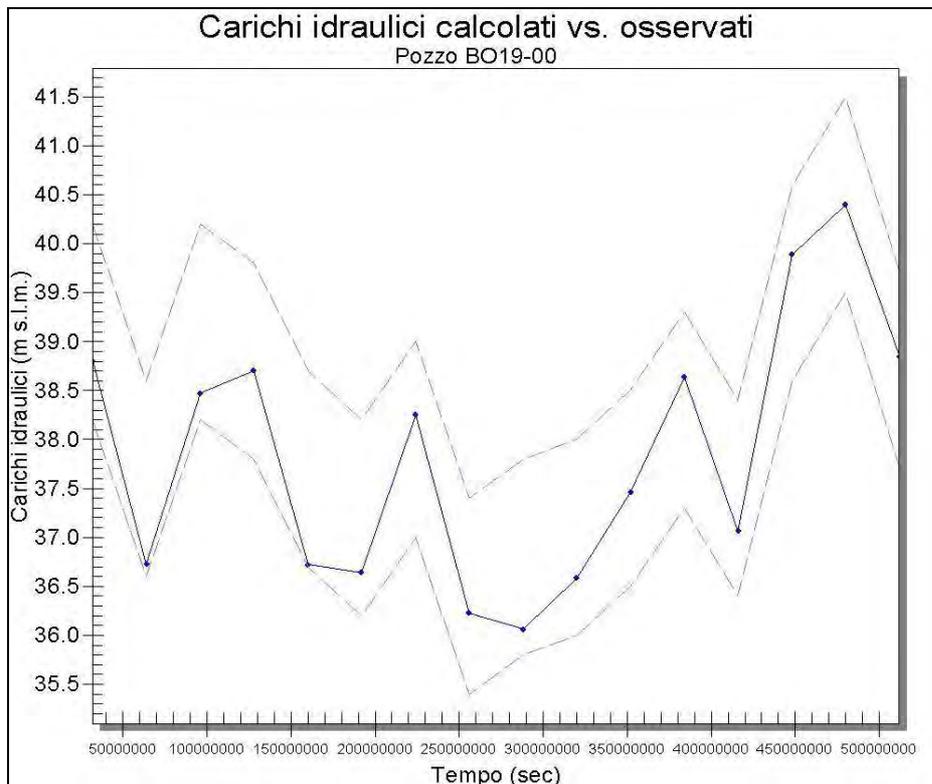


Figura 4-29: Distribuzione degli scarti al ciclo 5 (anno 1987)

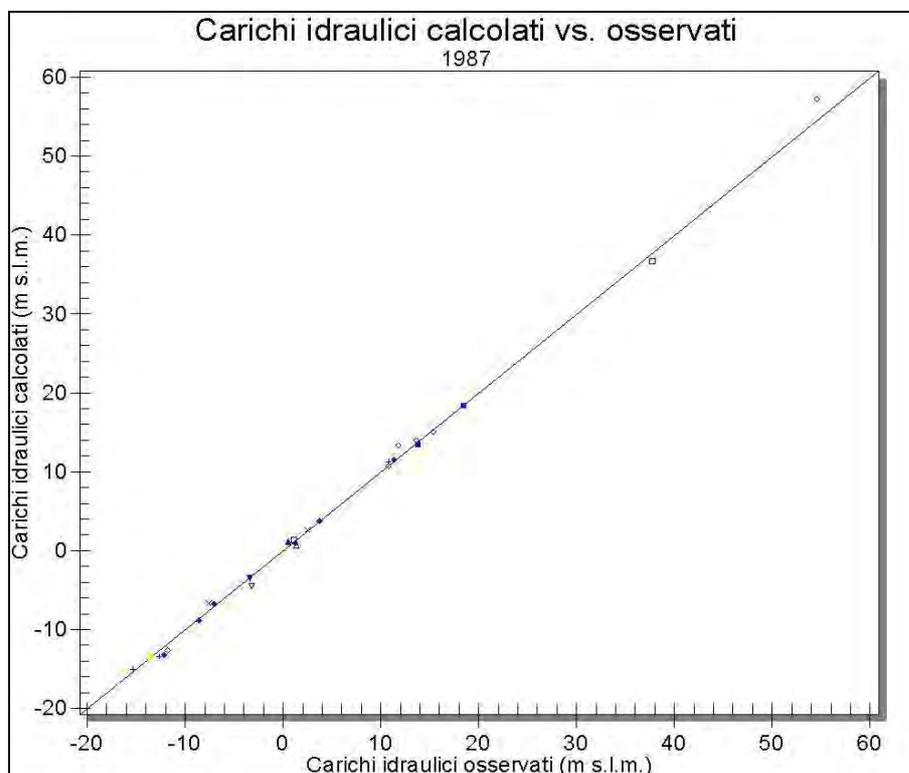


Figura 4-30: Distribuzione degli scarti al ciclo 10 (anno 1992)

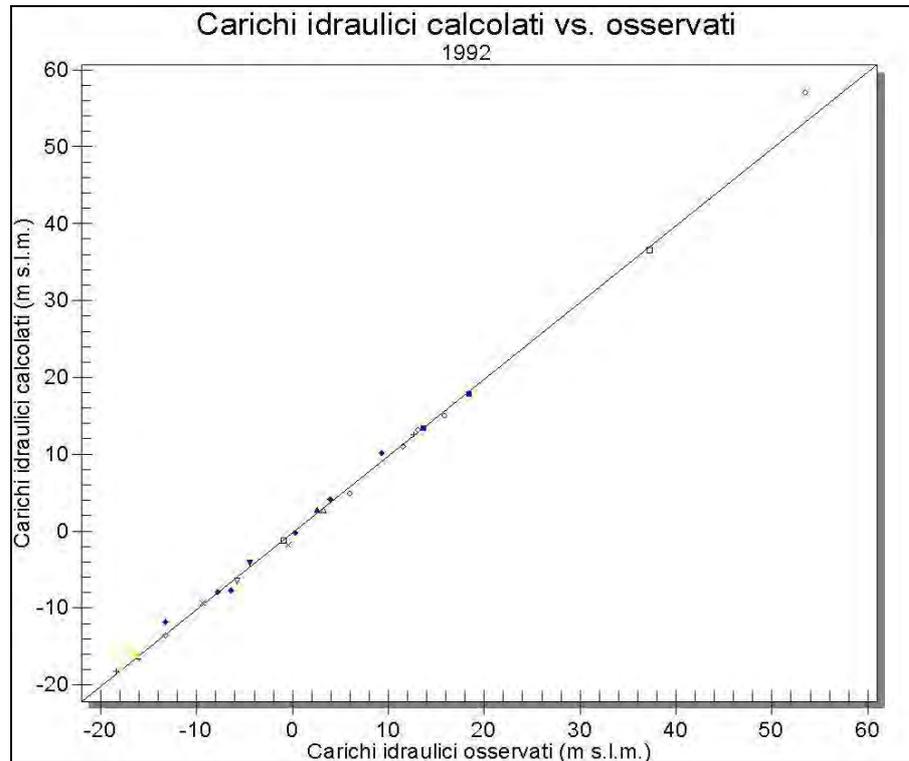
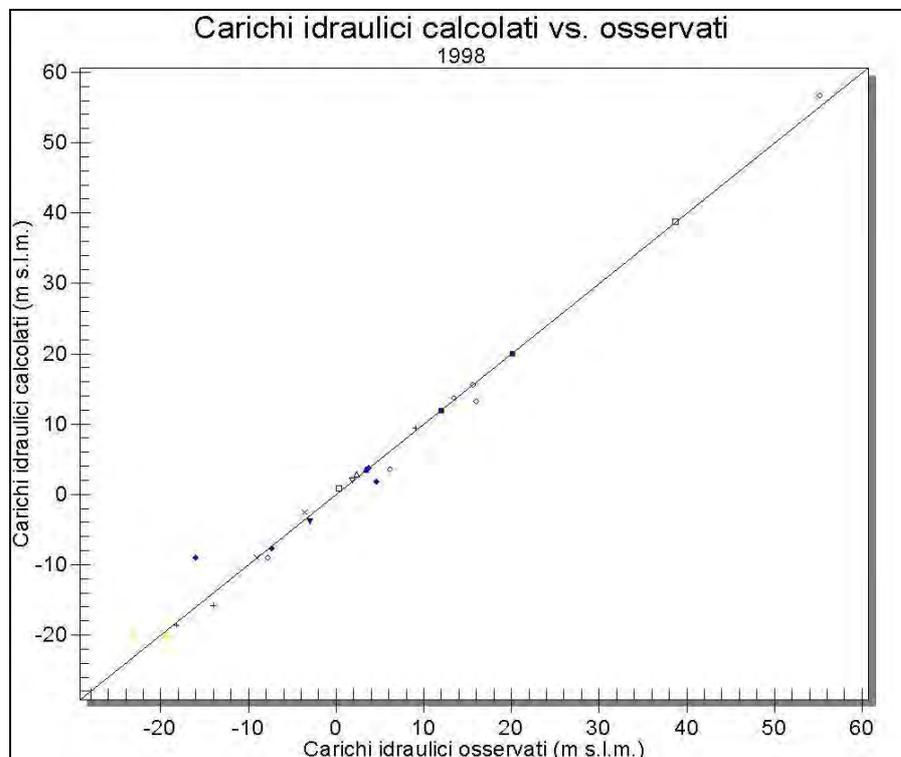


Figura 4-31: Distribuzione degli scarti al ciclo 16 (anno 1998)



4.6.2 Controllo del bilancio idrogeologico della Conoide alluvionale del Fiume Reno (Attività A2.1)

Un ulteriore controllo della bontà del modello matematico si effettua verificando il bilancio idrogeologico. In questo modo si può verificare se viene rispettata l'equazione del bilancio idrogeologico e i relativi termini che la compongono. Nel nostro caso il modello è in grado di restituire un valore annuo per ognuno dei 16 anni del periodo di taratura del modello che va dal 1983 al 1998 (Tabella 4-3). Le diverse voci di bilancio in ingresso ed uscita sono indicate sia in termini di portate medie per il singolo anno di simulazione (m³/s) sia in termini di volumi (milioni di m³) cumulati nei diversi anni. Nel dettaglio gli ingressi corrispondono alla ricarica (pioggia e fiume), alle entrate dai bordi ed alle variazioni positive del termine di immagazzinamento. Le uscite ai prelievi, alle uscite dai bordi e alle variazioni negative dell'immagazzinamento del sistema. Si nota quindi come nelle tabelle la quota di variazione dell'immagazzinamento messa a bilancio corrisponde se positiva ad un volume/portata di acqua che viene sottratta al sistema. Per tutti gli anni della simulazione si assiste ad un saldo di volume di immagazzinamento positivo che equivale al netto ad una diminuzione dell'acqua immagazzinata all'interno del sistema stesso.

Tabella 4-3: bilancio idrogeologico

Bilancio idrogeologico	Volumi (Mm ³)			Portate (m ³ /s)		
	Ingressi	Uscite	Saldo	Ingressi	Uscite	Saldo
Sorgenti						
Bilancio - anno 1983						
Immagazzinamento	30.4	10.4	20.0	0.95	0.33	0.63
Prelievi da pozzi	0.0	60.2	-60.2	0.00	1.88	-1.88
Limiti a carico imposto (tot)	1.8	14.6	-12.8	0.05	0.46	-0.40
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.05	7.2	-7.1	0.001	0.22	-0.22
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	1.5	3.2	-1.7	0.05	0.10	-0.05
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	0.2	4.4	-4.2	0.01	0.14	-0.13
Ricarica (tot)	53.8	0.0	53.8	1.68	0.00	1.68
<i>Fiume</i>	31.2	0	31.2	0.97	0	0.97
<i>Precipitazioni</i>	22.6	0	22.6	0.71	0	0.71
Totale	86.0	85.2	0.8	2.69	2.66	0.03
Bilancio - anno 1984						
Immagazzinamento	50.7	17.6	33.2	0.63	0.22	0.41
Prelievi da pozzi	0.0	125.1	-125.0	0.00	2.03	-2.03
Limiti a carico imposto (tot)	3.2	27.2	-24.0	0.05	0.40	-0.35
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.1	13.1	-13.0	0.002	0.18	-0.18
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	2.7	6.4	-3.7	0.04	0.10	-0.06
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	0.4	8.2	-7.8	0.01	0.12	-0.11
Ricarica (tot)	117.0	0.0	117.0	1.97	0.00	1.97
<i>Fiume</i>	75.0	0	75.0	1.37	0	1.37
<i>Precipitazioni</i>	42.0	0	42.0	0.61	0	0.61
Totale	171.0	170.0	1.0	2.65	2.65	0.01
Bilancio - anno 1985						
Immagazzinamento	63.4	22.1	41.3	0.40	0.14	0.25
Prelievi da pozzi	0.0	179.8	-180.0	0.00	1.71	-1.71

Bilancio idrogeologico	Volumi (Mm³)			Portate (m³/s)		
	Ingressi	Uscite	Saldo	Ingressi	Uscite	Saldo
Sorgenti						
Limiti a carico imposto (tot)	38.7	38.7	0.0	0.05	0.36	-0.30
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.2	18.3	-18.1	0.002	0.16	-0.16
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	4.2	9.2	-5.0	0.05	0.09	-0.04
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	0.6	11.8	-11.2	0.01	0.11	-0.11
Ricarica (tot)	172.1	0.0	172.1	1.72	0.00	1.72
<i>Fiume</i>	110.7	0	110.7	1.12	0	1.12
<i>Precipitazioni</i>	61.4	0	61.4	0.61	0	0.61
Totale	274.2	240.5	33.6	2.17	2.21	-0.03
Bilancio - anno 1986						
Immagazzinamento	73.2	25.3	47.9	0.31	0.10	0.21
Prelievi da pozzi	0.0	233.3	-233.0	0.00	1.67	-1.67
Limiti a carico imposto (tot)	6.8	49.0	-42.2	0.06	0.32	-0.26
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.3	22.8	-22.5	0.004	0.14	-0.14
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	5.8	11.8	-6.0	0.05	0.08	-0.03
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	0.8	15.2	-14.4	0.005	0.10	-0.10
Ricarica (tot)	227.6	0.0	227.6	1.73	0.00	1.73
<i>Fiume</i>	148.4	0	148.4	1.18	0	1.18
<i>Precipitazioni</i>	79.2	0	79.2	0.56	0	0.56
Totale	307.6	307.6	0.0	2.10	2.09	0.00
Bilancio - anno 1987						
Immagazzinamento	80.5	27.5	53.0	0.23	0.07	0.16
Prelievi da pozzi	0.0	288.8	-289.0	0.00	1.74	-1.74
Limiti a carico imposto (tot)	8.6	59.0	-50.4	0.06	0.31	-0.26
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.5	27.2	-26.7	0.005	0.14	-0.13
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	7.4	14.4	-7.1	0.05	0.08	-0.03
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	0.9	18.4	-17.5	0.004	0.10	-0.10
Ricarica (tot)	288.4	0.0	288.4	1.90	0.00	1.90
<i>Fiume</i>	185.3	0	185.3	1.15	0	1.15
<i>Precipitazioni</i>	103.1	0	103.1	0.75	0	0.75
Totale	377.6	375.4	2.2	2.19	2.12	0.07
Bilancio - anno 1988						
Immagazzinamento	86.8	29.8	57.0	0.20	0.07	0.13
Prelievi da pozzi	0.0	346.6	-347.0	0.00	1.81	-1.81
Limiti a carico imposto (tot)	11.4	69.7	-58.2	0.09	0.33	-0.24
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.5	31.8	-31.2	0.002	0.14	-0.14
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	9.9	16.6	-6.8	0.08	0.07	0.01
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	1.2	22.5	-21.4	0.01	0.13	-0.12
Ricarica (tot)	349.3	0.0	349.3	1.90	0.00	1.90
<i>Fiume</i>	226.3	0	226.3	1.28	0	1.28
<i>Precipitazioni</i>	123.0	0	123.0	0.62	0	0.62
Totale	447.6	446.1	1.5	2.19	2.21	-0.02
Bilancio - anno 1989						
Immagazzinamento	92.1	32.4	59.7	0.16	0.08	0.08
Prelievi da pozzi	0.0	407.0	-407.0	0.00	1.89	-1.89
Limiti a carico imposto (tot)	15.2	80.5	-65.2	0.12	0.34	-0.22
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.5	36.2	-35.7	0.001	0.14	-0.14
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	13.5	18.8	-5.3	0.11	0.07	0.05
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	1.3	27.0	-25.7	0.005	0.14	-0.13
Ricarica (tot)	414.7	0.0	414.7	2.04	0.00	2.04

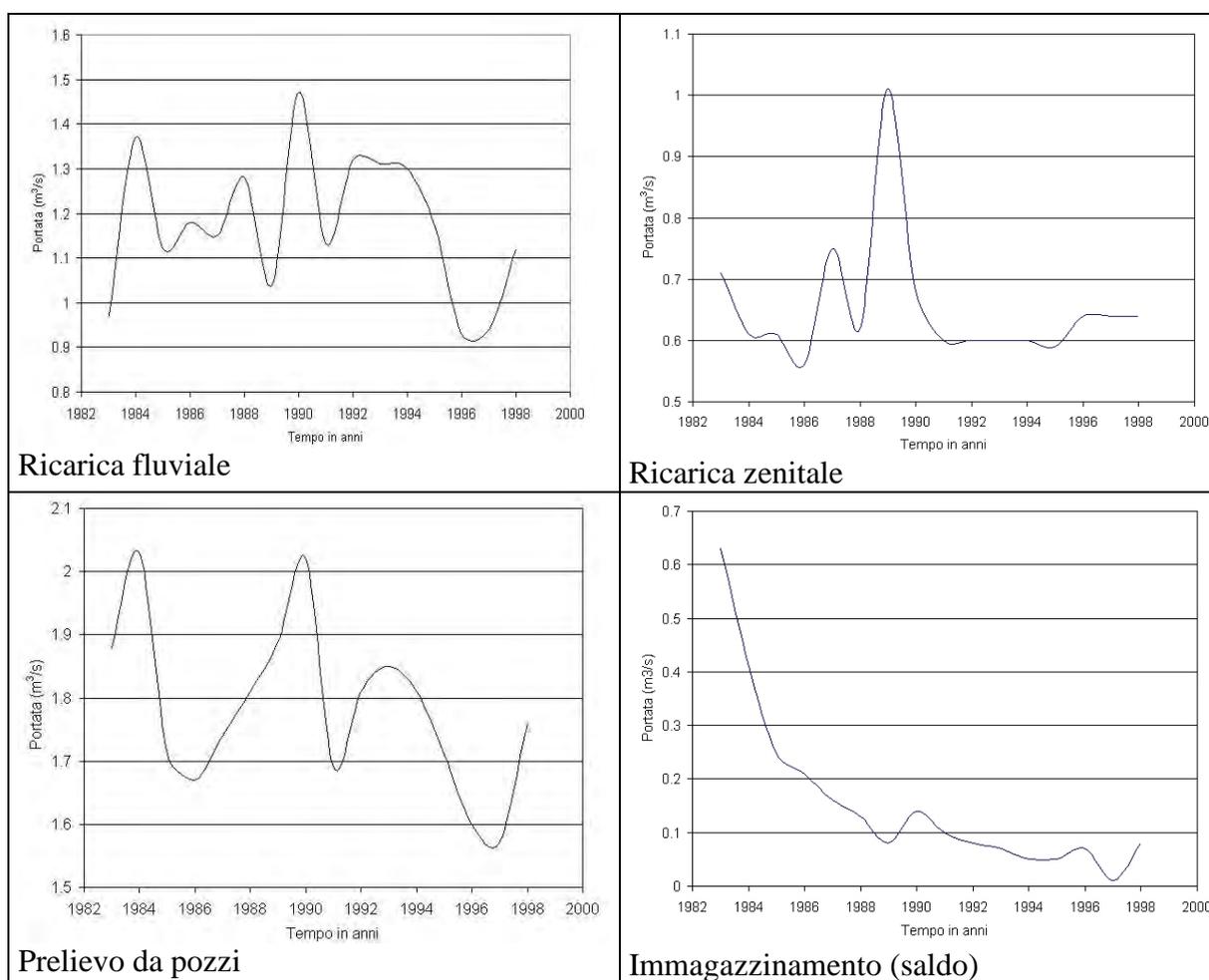
Bilancio idrogeologico	Volumi (Mm ³)			Portate (m ³ /s)		
	Sorgenti	Ingressi	Uscite	Saldo	Ingressi	Uscite
<i>Fiume</i>	259.5	0	259.5	1.04	0	1.04
<i>Precipitazioni</i>	155.2	0	155.2	1.01	0	1.01
Totale	522.0	519.9	2.2	2.33	2.31	0.02
Bilancio - anno 1990						
Immagazzinamento	98.0	33.9	64.1	0.18	0.05	0.14
Prelievi da pozzi	0.0	471.8	-472.0	0.00	2.02	-2.02
Limiti a carico imposto (tot)	17.5	89.9	-72.4	0.07	0.29	-0.22
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.6	40.0	-39.3	0.003	0.12	-0.11
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	15.6	21.2	-5.7	0.06	0.08	-0.01
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	1.4	30.3	-28.9	0.004	0.10	-0.10
Ricarica (tot)	483.5	0.0	483.5	2.15	0.00	2.15
<i>Fiume</i>	306.6	0	306.6	1.47	0	1.47
<i>Precipitazioni</i>	176.9	0	176.9	0.68	0	0.68
Totale	598.9	595.5	3.4	2.40	2.36	0.04
Bilancio - anno 1991						
Immagazzinamento	103.1	35.7	67.4	0.16	0.06	0.10
Prelievi da pozzi	0.0	526.0	-526.0	0.00	1.69	-1.69
Limiti a carico imposto (tot)	19.7	98.6	-78.9	0.07	0.27	-0.20
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.8	43.3	-42.6	0.004	0.11	-0.10
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	17.5	23.5	-6.1	0.06	0.07	-0.01
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	1.6	33.5	-31.9	0.01	0.10	-0.10
Ricarica (tot)	538.8	0.0	538.8	1.73	0.00	1.73
<i>Fiume</i>	342.8	0	342.8	1.13	0	1.13
<i>Precipitazioni</i>	196.1	0	196.1	0.60	0	0.60
Totale	661.7	660.3	1.3	1.96	2.02	-0.06
Bilancio - anno 1992						
Immagazzinamento	107.0	37.2	69.8	0.12	0.05	0.08
Prelievi da pozzi	0.0	584.0	-584.0	0.00	1.81	-1.81
Limiti a carico imposto (tot)	22.1	107.1	-85.0	0.07	0.27	-0.19
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	0.9	46.6	-45.7	0.004	0.10	-0.10
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	19.7	25.7	-6.0	0.07	0.07	0.00
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	1.7	36.7	-35.1	0.002	0.10	-0.10
Ricarica (tot)	600.2	0.0	600.2	1.92	0.00	1.92
<i>Fiume</i>	385.0	0	385.0	1.32	0	1.32
<i>Precipitazioni</i>	215.2	0	215.2	0.60	0	0.60
Totale	729.3	728.3	1.0	2.11	2.12	-0.01
Bilancio - anno 1993						
Immagazzinamento	110.6	38.5	72.1	0.11	0.04	0.07
Prelievi da pozzi	0.0	643.0	-643.0	0.00	1.85	-1.85
Limiti a carico imposto (tot)	24.9	114.5	-89.6	0.09	0.23	-0.14
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	1.1	49.6	-48.6	0.005	0.09	-0.09
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	22.1	27.6	-5.4	0.08	0.06	0.02
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	1.9	39.4	-37.5	0.01	0.08	-0.08
Ricarica (tot)	661.2	0.0	661.2	1.91	0.00	1.91
<i>Fiume</i>	426.9	0	426.9	1.31	0	1.31
<i>Precipitazioni</i>	234.3	0	234.3	0.60	0	0.60
Totale	796.7	796.0	0.7	2.11	2.12	-0.01
Bilancio - anno 1994						
Immagazzinamento	114.2	40.4	73.8	0.11	0.06	0.05
Prelievi da pozzi	0.0	700.9	-701.0	0.00	1.81	-1.81

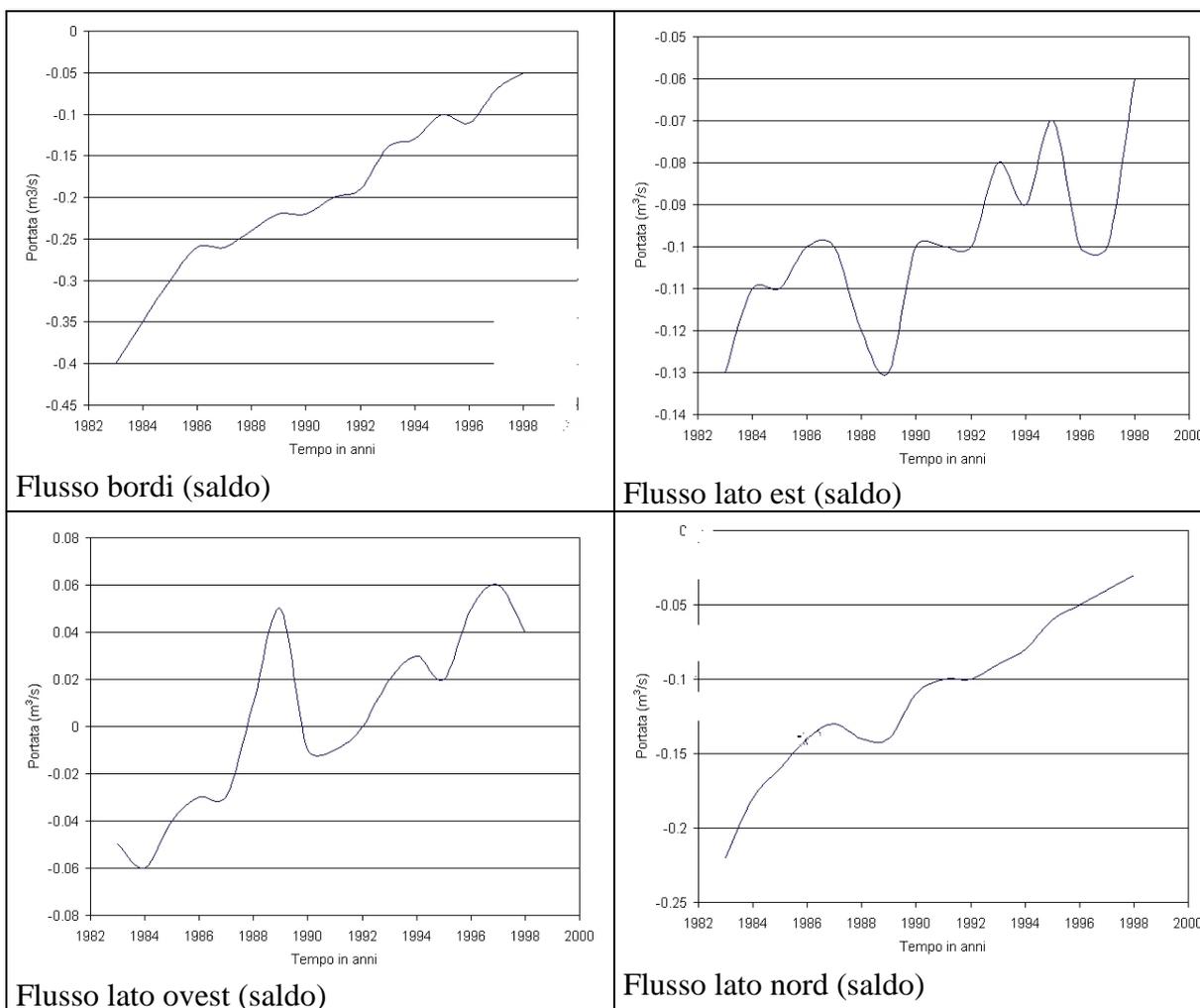
Bilancio idrogeologico	Volumi (Mm³)			Portate (m³/s)		
Sorgenti	Ingressi	Uscite	Saldo	Ingressi	Uscite	Saldo
Limiti a carico imposto (tot)	28.0	121.8	-93.8	0.10	0.23	-0.13
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	1.3	52.3	-51.0	0.01	0.08	-0.08
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	25.0	29.3	-4.3	0.09	0.05	0.03
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	2.0	42.4	-40.4	0.003	0.09	-0.09
Ricarica (tot)	722.0	0.0	722.0	1.90	0.00	1.90
<i>Fiume</i>	468.5	0	468.5	1.30	0	1.30
<i>Precipitazioni</i>	253.5	0	253.5	0.60	0	0.60
Totale	864.3	863.1	1.1	2.11	2.10	0.01
Bilancio - anno 1995						
Immagazzinamento	117.1	41.6	75.5	0.09	0.04	0.05
Prelievi da pozzi	0.0	755.7	-756.0	0.00	1.71	-1.71
Limiti a carico imposto (tot)	31.3	128.3	-97.0	0.10	0.20	-0.10
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	1.7	54.5	-52.8	0.01	0.07	-0.06
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	27.7	31.3	-3.6	0.09	0.06	0.02
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	2.2	44.7	-42.5	0.01	0.07	-0.07
Ricarica (tot)	778.5	0.0	778.5	1.76	0.00	1.76
<i>Fiume</i>	505.9	0	505.9	1.17	0	1.17
<i>Precipitazioni</i>	272.6	0	272.6	0.59	0	0.59
Totale	926.9	925.6	1.3	1.96	1.95	0.01
Bilancio - anno 1996						
Immagazzinamento	120.8	43.1	77.7	0.12	0.05	0.07
Prelievi da pozzi	0.0	807.0	-807.0	0.00	1.60	-1.60
Limiti a carico imposto (tot)	34.8	135.2	-100.0	0.11	0.22	-0.11
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	2.0	56.6	-54.5	0.01	0.06	-0.05
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	30.8	32.9	-2.1	0.09	0.05	0.05
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	2.3	48.1	-45.8	0.003	0.11	-0.10
Ricarica (tot)	828.6	0.0	828.6	1.57	0.00	1.57
<i>Fiume</i>	535.5	0	535.5	0.93	0	0.93
<i>Precipitazioni</i>	293.1	0	293.1	0.64	0	0.64
Totale	984.2	985.3	-1.0	1.79	1.87	-0.07
Bilancio - anno 1997						
Immagazzinamento	123.1	45.0	78.1	0.07	0.06	0.01
Prelievi da pozzi	0.0	857.4	-857.0	0.00	1.57	-1.57
Limiti a carico imposto (tot)	38.9	141.7	-103.0	0.13	0.20	-0.07
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	2.7	58.4	-55.8	0.02	0.06	-0.04
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	34.1	34.3	-0.1	0.11	0.04	0.06
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	2.4	51.4	-49.0	0.004	0.10	-0.10
Ricarica (tot)	879.2	0.0	879.2	1.58	0.00	1.58
<i>Fiume</i>	565.5	0	565.5	0.94	0	0.94
<i>Precipitazioni</i>	313.6	0	313.6	0.64	0	0.64
Totale	1041.2	1044.0	-2.8	1.78	1.83	-0.06
Bilancio - anno 1998						
Immagazzinamento	126.7	45.9	80.7	0.11	0.03	0.08
Prelievi da pozzi	0.0	913.8	-914.0	0.00	1.76	-1.76
Limiti a carico imposto (tot)	43.1	147.5	-104.0	0.13	0.18	-0.05
<i>Limiti a carico imposto: Nord</i>	3.5	60.2	-56.8	0.02	0.06	-0.03
<i>Limiti a carico imposto: Ovest</i>	37.2	35.9	1.3	0.10	0.05	0.04
<i>Limiti a carico imposto: Est</i>	2.9	53.8	-50.9	0.01	0.08	-0.06
Ricarica (tot)	935.6	0.0	935.6	1.76	0.00	1.76

Bilancio idrogeologico	Volumi (Mm ³)			Portate (m ³ /s)		
	Ingressi	Uscite	Saldo	Ingressi	Uscite	Saldo
Sorgenti						
<i>Fiume</i>	601.4	0	601.4	1.12	0	1.12
<i>Precipitazioni</i>	334.2	0	334.2	0.64	0	0.64
Totale	1105.4	1107.0	-1.9	2.01	1.98	0.03

In Figura 4-32 sono stati graficati i dati della tabella precedente in modo da evidenziare le portate per i singoli anni dei prelievi da pozzo a scapito dell'immagazzinamento, dei bordi e della ricarica. Si può subito evidenziare che nonostante i prelievi abbiano un trend in diminuzione nel tempo, vi sia però un richiamo di acqua dai bordi e quindi dalle zone circostanti e una riduzione dell'immagazzinamento del sistema.

Figura 4-32: evoluzione dei principali termini del bilancio idrico (valori in m³/s)





4.6.3 I risultati della modellizzazione

4.6.3.1 La distribuzione del carico idraulico

Nelle figure seguenti (Figura 4-33, Figura 4-34, Figura 4-35, Figura 4-36) è riportata la distribuzione del carico idraulico ottenuta al termine della taratura del modello; a titolo esemplificativo della distribuzione tridimensionale del carico idraulico sono stati effettuati alcuni tagli sia sul piano geografico e corrispondenti a diverse profondità del sistema acquifero, sia in sezione longitudinale.

Figura 4-33: carico idraulico layer 44, anni 1983, 1990 e 1998

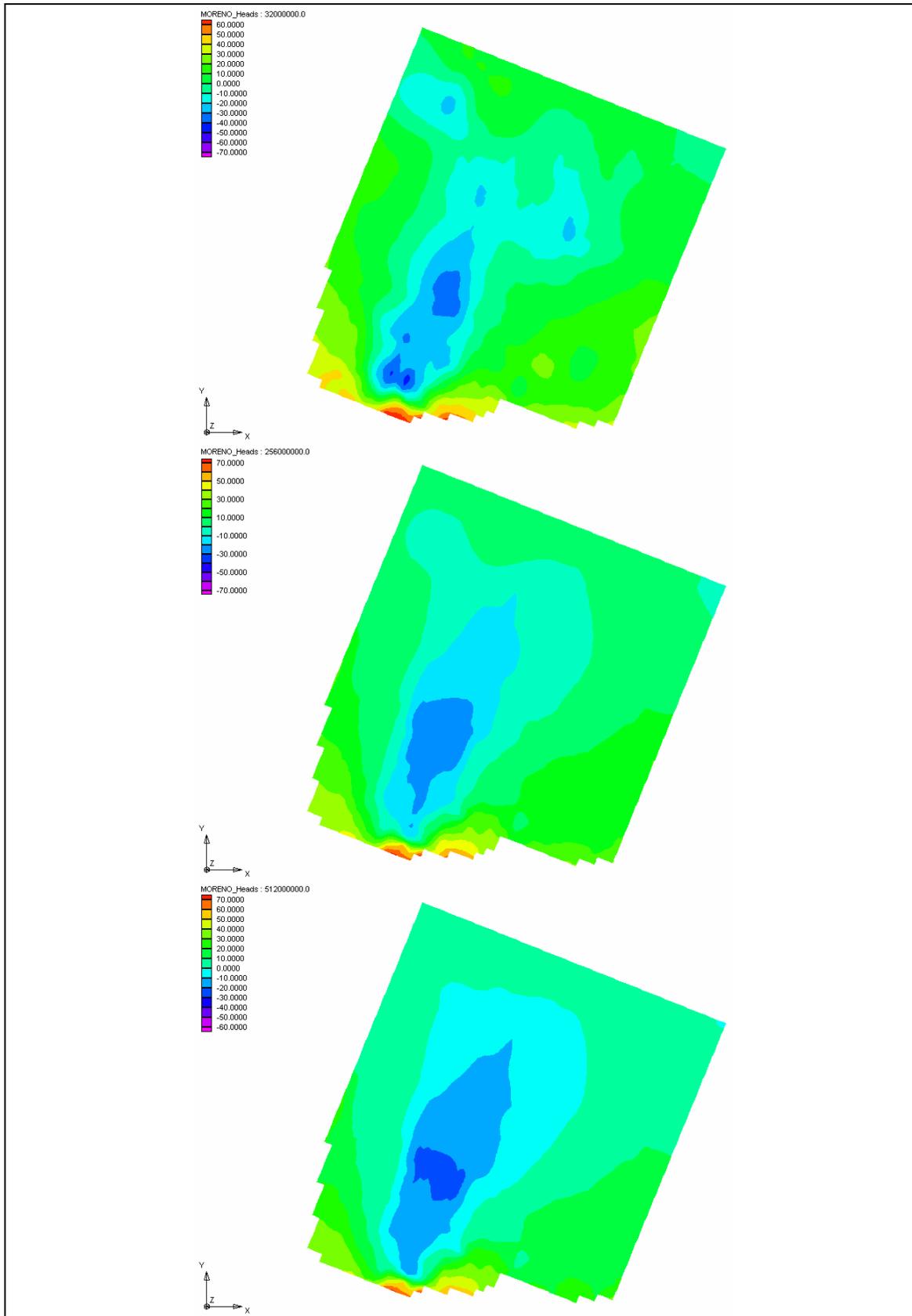


Figura 4-34: carico idraulico layer 13, anni 1983, 1990 e 1998

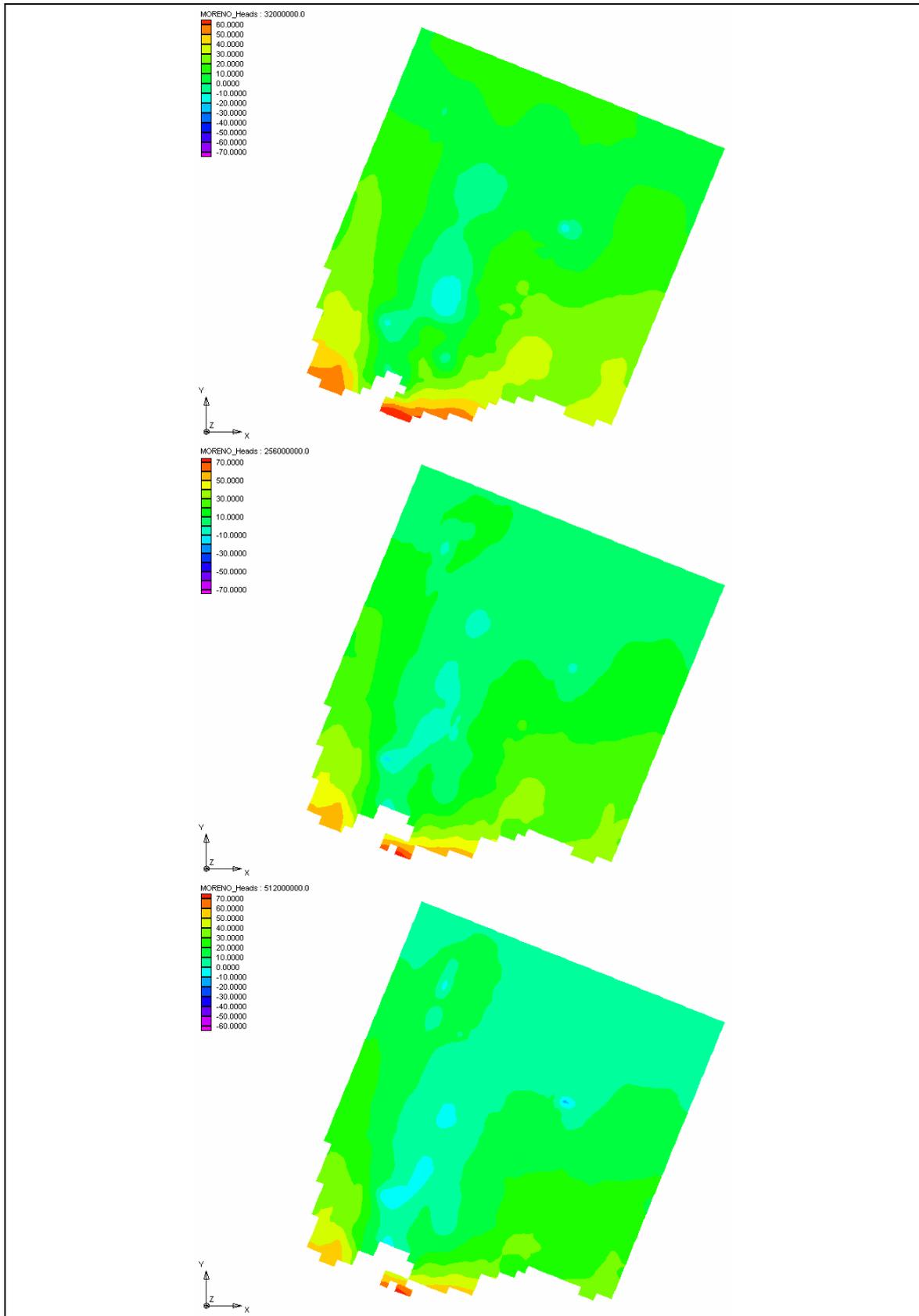


Figura 4-35: carico idraulico sezione 21, anni 1983, 1990 e 1998

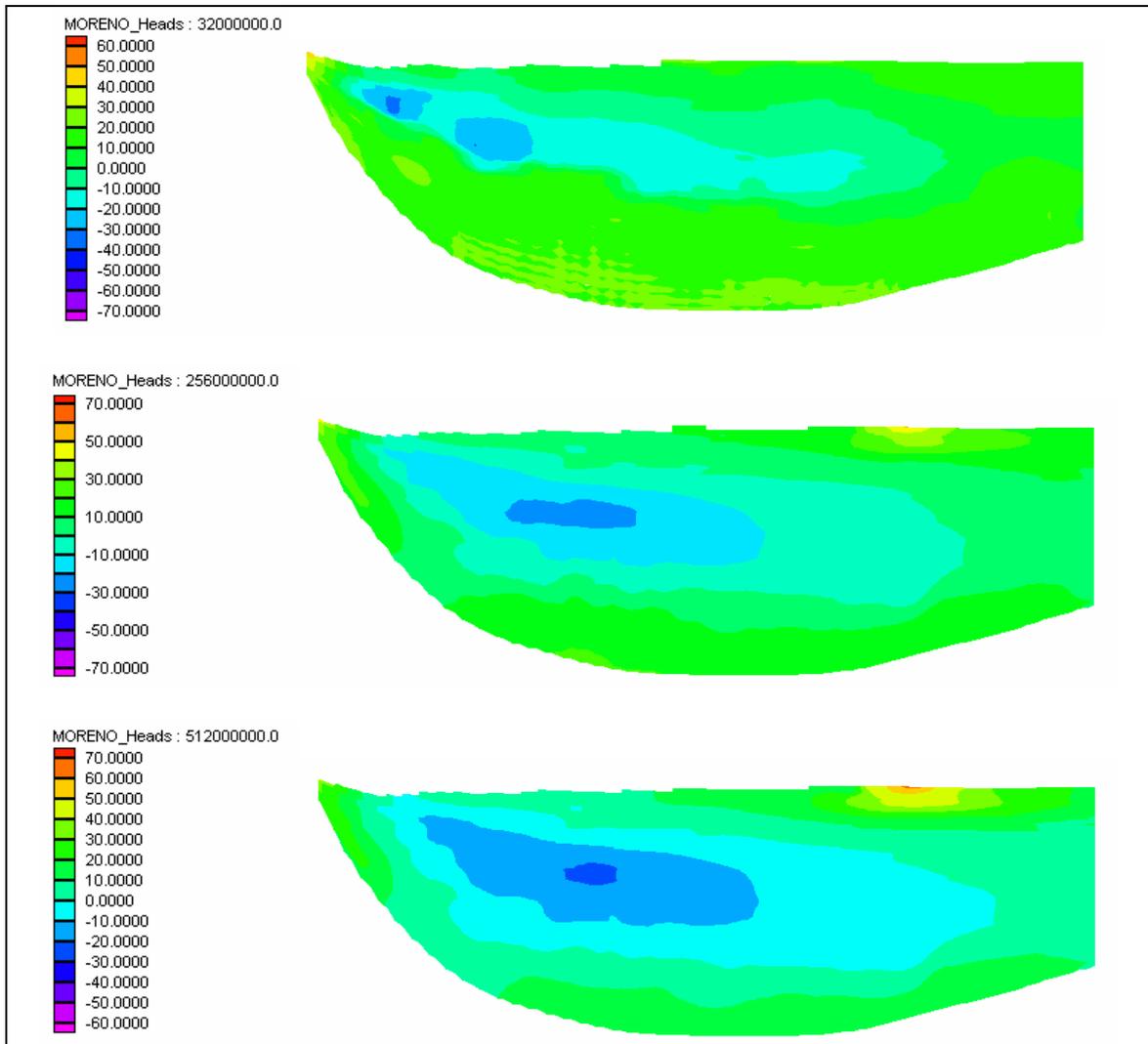
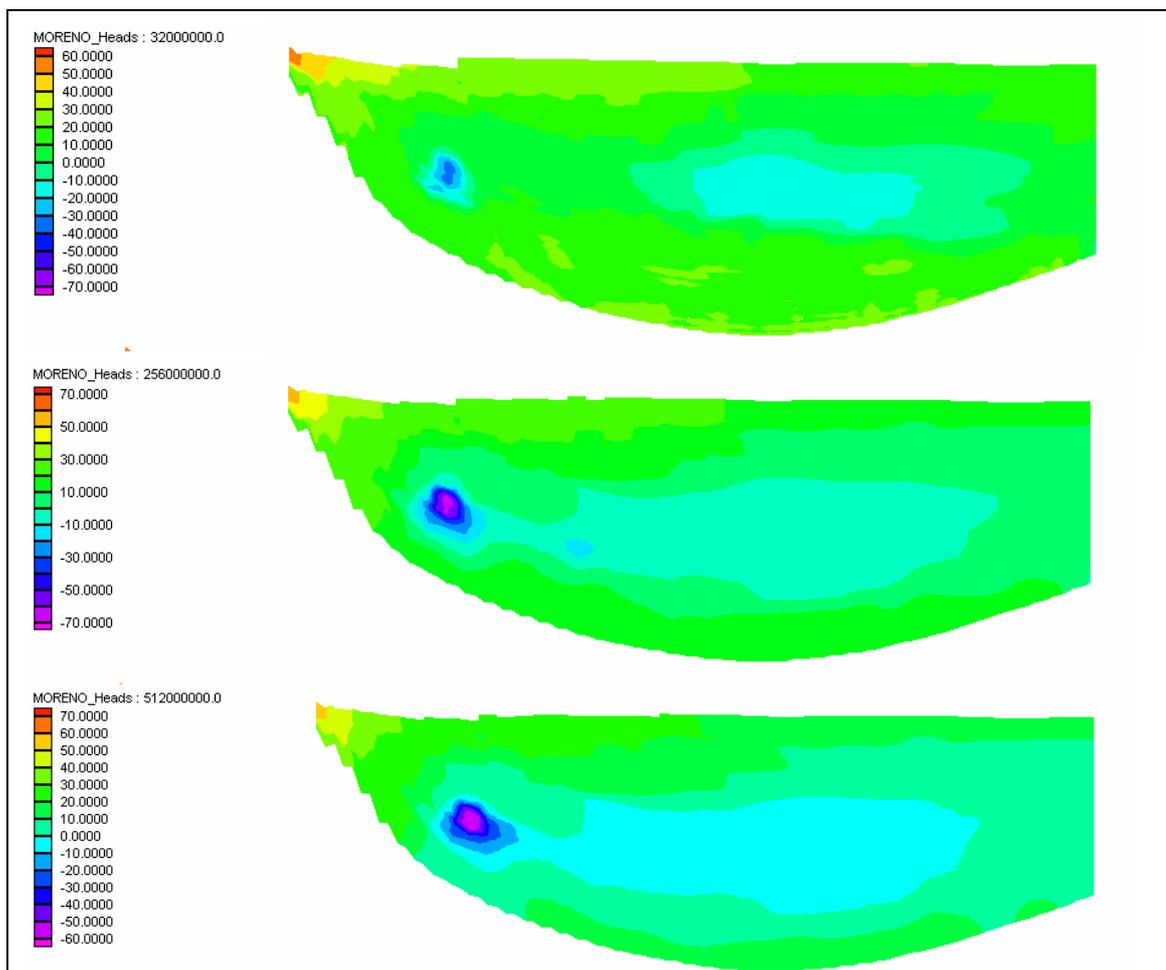


Figura 4-36: carico idraulico sezione 33, anni 1983, 1990 e 1998



4.6.3.2 *La distribuzione delle velocità di flusso*

La visualizzazione della velocità di flusso è forse il metodo migliore per mostrare l'aderenza dell'approssimazione numerica utilizzata allo schema concettuale che ci si era proposti di ottenere e gli schemi in sezione longitudinale sono quelli che meglio consentono di rappresentare questo aspetto. Nelle figure seguenti (Figura 4-37, Figura 4-38) le velocità sono espresse come intensità (parte scalare del vettore velocità di flusso). Come si vede, le aree con il flusso più elevato sono concentrate all'apice della conoide e nelle aree di bassa pianura in cui vi è una certa concentrazione di prelievi da pozzo.

Il campo delle velocità è quindi dominato dall'energia fornita attraverso l'estrazione da pozzo e, in misura molto minore dal trasferimento di acqua tra la parte sommitale dell'acquifero ed il reticolo idrografico.

Figura 4-37: carico idraulico sezione 32, anno 1984

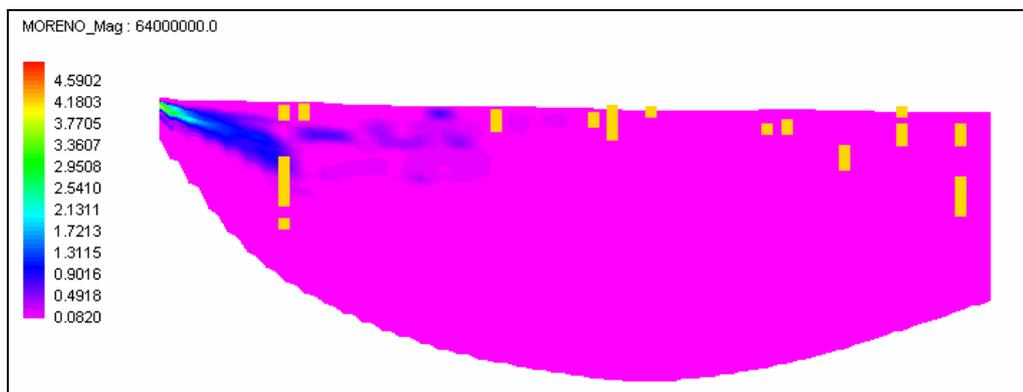
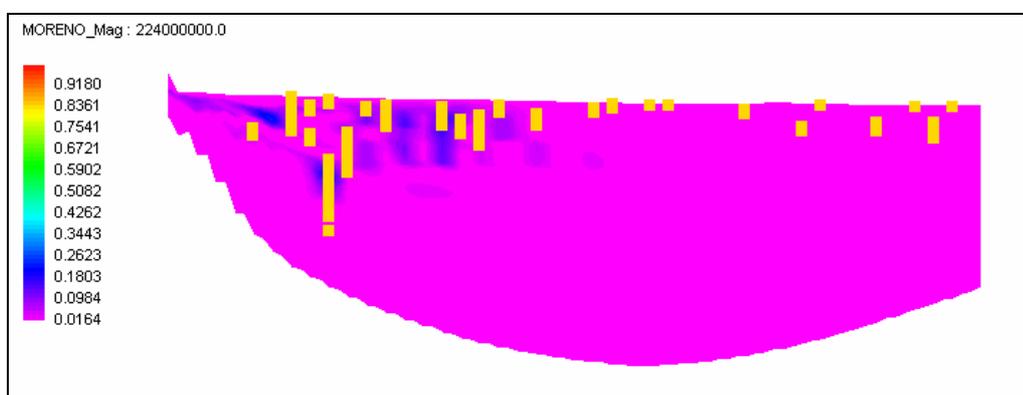


Figura 4-38: carico idraulico sezione 33, anno 1989



4.6.4 Taratura: conclusioni e raccomandazioni

Al termine dello sviluppo del modello di flusso, è stato possibile svolgere alcune considerazioni sia sui risultati ottenuti, sia sull'efficacia dimostrata del programma usato per svolgere i calcoli, anche se relativamente a questo secondo aspetto si tratta di ripetere caratteristiche già ben note in letteratura, dato che Modflow è in uso da molto tempo ed i suoi limiti e difficoltà sono ben note.

Comunque sia, è utile sottolineare che:

- la condizione iniziale è molto delicata e fonte di notevole instabilità, presumibilmente legata complessivamente al più ampio problema di stabilità delle soluzioni e delle difficoltà dei sistemi alle differenze finite a convergere facilmente quando si tratti di risolvere un numero molto elevato di equazioni con un campo di pressioni molto variabile;
- le condizioni al bordo sono invece un punto debole dal punto di vista delle osservazioni sperimentali: infatti, da un lato si tratta di una condizione necessariamente molto estesa (tre lati su quattro e per tutto lo spessore del sistema), dall'altro può essere ottenuta solo attraverso dei processi di regionalizzazione dei set di informazioni sperimentali disponibili. Tenendo conto che i punti d'acqua osservati raggiungono il gruppo di acquiferi A, solo

subordinatamente l'acquifero B e quasi mai l'acquifero C, ben si vede che l'affidabilità delle stime sui bordi è scadente per forza di cose.

- per lo stesso motivo, anche il controllo di qualità della taratura soffre moltissimo a causa del numero ridotto dei punti di controllo. Vi sono vasti volumi di roccia, entro il sistema considerato, per il quale la qualità della soluzione offerta deriva solo da un giudizio generale di coerenza del modello, di stabilità, di assemblaggio, ma non da una ricostruzione effettiva degli assetti idraulici per gruppi di maglie abbastanza circoscritti;
- un elemento di controllo, di tipo indiretto, è stato tuttavia derivato dal modello di subsidenza, che è terminato con una aderenza più che soddisfacente rispetto ai dati disponibili. Infatti, la presenza di gradienti idraulici verticali non adeguati, come pure una loro evoluzione nel tempo non risolta correttamente, costituiscono un ostacolo insuperabile ad una buona taratura della fase di compattazione, che da tali condizioni dipende in modo strettissimo. In questo modo, una verifica indiretta ma molto efficace è stata possibile;

5. **Calcolo delle riserve idriche permanenti (Attività A2.3)**

In sede di piano di lavoro, è stata a suo tempo predisposta un'attività specifica per il calcolo dei principali termini del bilancio ideologico in regime di equilibrio ed una stima delle cosiddette riserve permanenti; si tratta di una schematizzazione che viene usata per accompagnare le altre valutazioni di ordine idrogeologico, e che ha anche il compito di fissare i termini principali del bilancio per fornire un quadro preliminare di taratura dei modelli numerici in regime permanente.

Il rapido evolvere della tecnologia ha in qualche modo reso abbastanza inutile questo passaggio, dato che oggi si tende a realizzare la taratura dei modelli affrontando fin da subito il problema in condizioni di non equilibrio (o regime transitorio), come in effetti è avvenuto anche in questo caso. Gli schemi di calcolo all'equilibrio, che hanno comunque un senso fisico limitato, sono sempre meno utilizzati come base di partenza preliminare per la più complessa fase della simulazione in regime transitorio, dato che le risorse di calcolo oggi disponibili, ben maggiori, lo consentono.

Oltre a queste ragioni di carattere tecnologico e metodologico, vi è anche una ragione di tipo più fisico, che attiene al fortissimo grado di alterazione dello stato naturale della conoide del Reno: proprio il modello concettuale applicato nel corso di questo studio, a sua volta derivato da quello a scala regionale, ha mostrato il forte grado di commistione tra le acque recenti di origine meteorica e quelle più antiche (a vari livelli e gradi di età) che risiedono nelle parti più profonde del sistema, anche in corrispondenza dell'apice. Questa particolare situazione è stata dimostrata in via definitiva e in epoca recentissima attraverso le determinazioni isotopiche condotte per questo scopo e che sono descritte in altra parte di questo rapporto.

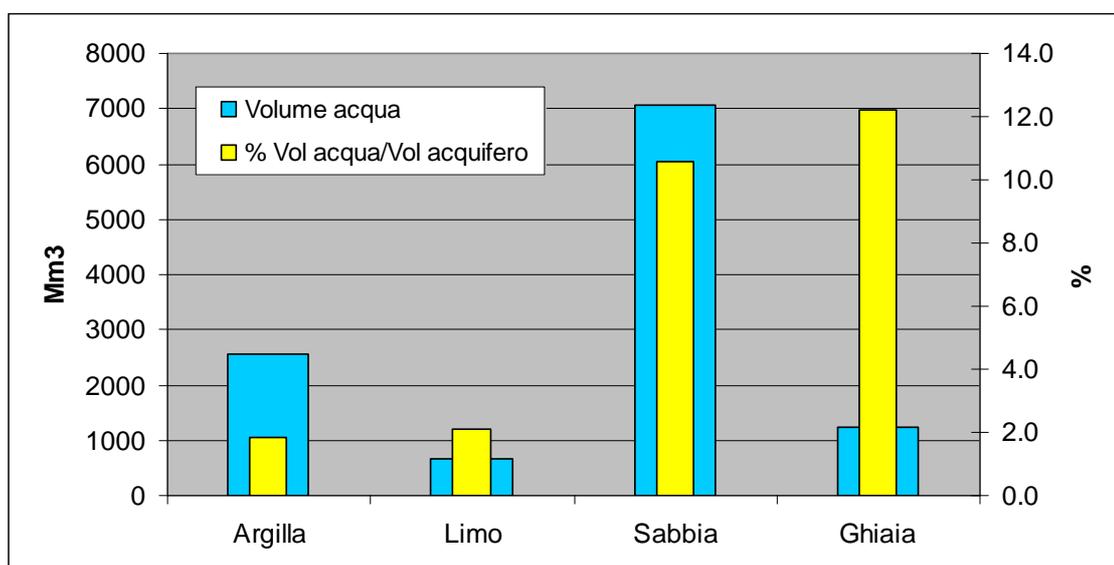
La valutazione delle riserve permanenti presuppone invece di poter distinguere in modo schematico l'assetto idrodinamico sulla base di una netta differenza di comportamento tra il regime di ricarica che interessa solo gli strati più superficiali del sistema e quello della circolazione profonda, caratterizzato da acque di diversa natura ed età. Nel corso delle attività che hanno portato al nuovo modello concettuale regionale e di quelle descritte in questo rapporto, è stato invece confermato che la produzione di acqua di falda ha rotto completamente con gli equilibri iniziali e quindi con gli schemi interpretativi precedenti alle ricerche stesse, consentendo di applicare i nuovi schemi fortemente confermati sulla base delle indagini isotopiche citate.

Oltre a questo, si deve poi considerare che, sul piano dei risultati ottenuti con il modello di flusso, sono oggi disponibili molte e più accurate informazioni relativamente alle modalità di ingresso e uscita dell'acqua, ivi comprese anche le modalità di trasferimento delle riserve tra porzioni diverse dello stesso sistema: ad esempio, è stato possibile riprodurre il flusso di acque profonde che alimentano da nord i centri di approvvigionamento di acqua potabile posti nella parte occidentale della conoide.

In ogni caso e con tutti i limiti sopra evidenziati, volendo giungere ad una quantificazione delle riserve idriche presenti all'interno del dominio modellizzato della conoide alluvionale del Fiume Reno, si può utilizzare l'approccio classico esplicitato in bibliografia (Castany, 1985) e recentemente in Riserve Idriche Sotterranee dell'Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998).

Si tratta di utilizzare i risultati del modello ovvero le porosità efficaci restituite per ogni cella del modello stesso e i coefficienti di immagazzinamento specifico. La moltiplicazione del volume di acquiferi liberi per il primo coefficiente sommata alla moltiplicazione del volume di acquiferi confinati per lo spessore e il coefficiente di immagazzinamento specifico ci danno il volume di acqua effettivamente disponibile nel nostro sistema. Il conteggio effettuato con i dati estratti dal modello all'anno 1998 quantifica la riserva in 11.544 Mm³, distribuita nelle litologie come indicato nella Figura 5-1. Complessivamente la percentuale di acqua disponibile rispetto al volume complessivo è del 4.6%.

Figura 5-1:distribuzione della riserva idrica per litologia



6. Approfondimento delle problematiche relative alla subsidenza (Attività C1)

6.1 IL FENOMENO DELLA SUBSIDENZA NELL'AREA DI STUDIO: I DATI DISPONIBILI DAL MONITORAGGIO

Il fenomeno della subsidenza nell'area della conoide alluvionale del Fiume Reno è stato sempre oggetto di studio, misure, e forte preoccupazione per gli effetti diretti sul patrimonio architettonico-monumentale ma anche su quello ambientale.

A questo proposito diverse sono stati gli enti che si sono attivati per misurare il fenomeno a partire dall'I.G.M.I., dall'Autorità di Bacino del Reno, dal Comune di Bologna, dalla Provincia di Bologna e dalla Regione Emilia-Romagna.

Oggi la rete di monitoraggio regionale della subsidenza viene gestita da Arpa e la Rete Provinciale si configura come un raffittimento della Rete Regionale: la sua progettazione ha puntato alla massima valorizzazione delle strutture presenti limitando il posizionamento di nuovi capisaldi a zone del territorio non coperte da altre reti.

L'area bolognese e in particolare quella della conoide del Fiume Reno risulta quindi coperta da numerosi caposaldi di livellazione e ad oggi, non considerando ancora la misura ultimata da poche settimane, disponiamo di almeno 3 periodi definiti da 4 misure effettuate negli anni 1983, 1987, 1992, 1999.

I dati elaborati individuano zone del territorio bolognese soggetto a valori di subsidenza media nei 16 anni che raggiungono i 5 cm/anno con abbassamenti in valore assoluto che nel periodo hanno raggiunto circa 1 m (Figura 6-1).

Il fenomeno è ancora più evidente se si osservano le velocità di abbassamento lungo la direttrice Bologna-Ferrara (Figura 6-2) dove la zona di Castel Maggiore è quella in forte depressione.

Osservando comunque gli abbassamenti del caposaldo di Castel Maggiore (Figura 6-3) si nota come il fenomeno sia in progressiva riduzione.

Ciò può essere dovuto ad una attenuazione naturale del fenomeno per effetto della via via minore compattazione del materiale, oppure è il risultato delle azioni di riduzione dei prelievi di fluidi dal sottosuolo.

Figura 6-1: subsidenza - abbassamento 1983-1999

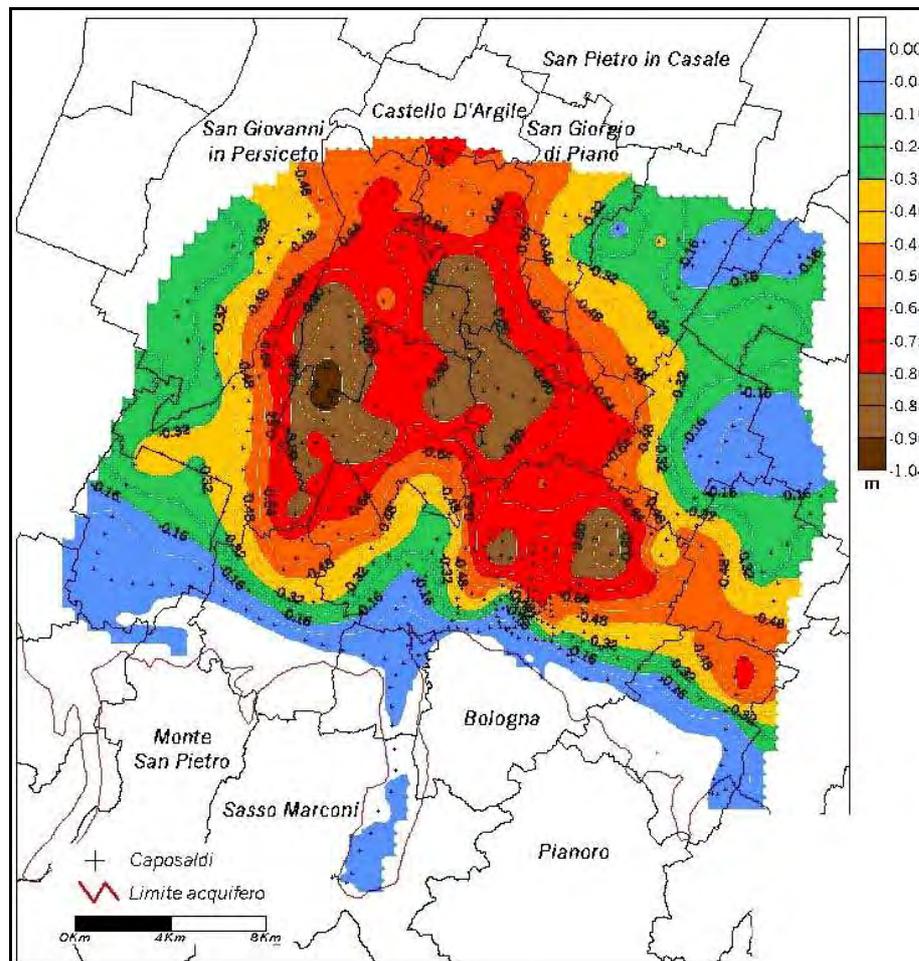


Figura 6-2: velocità di abbassamento nella direttrice Bologna-Ferrara

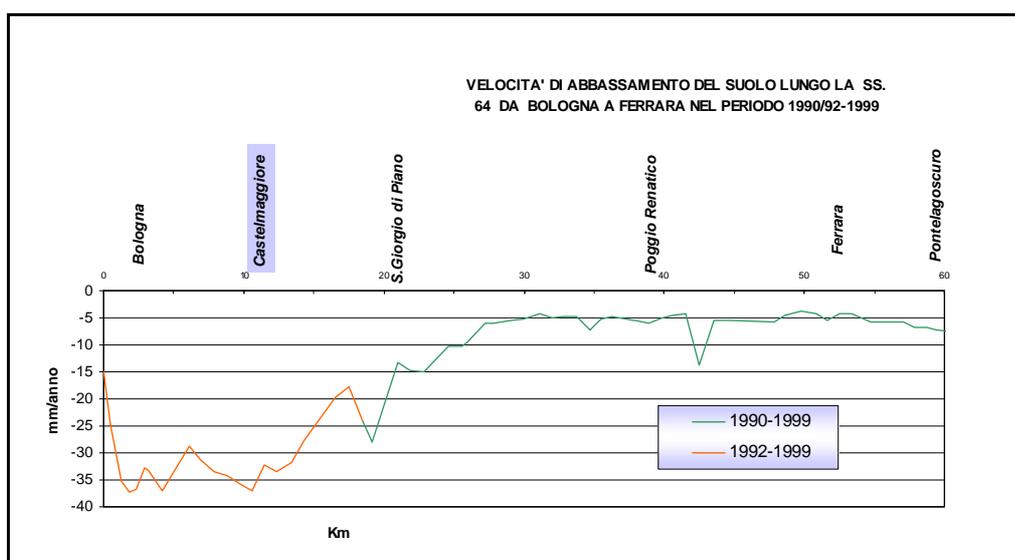
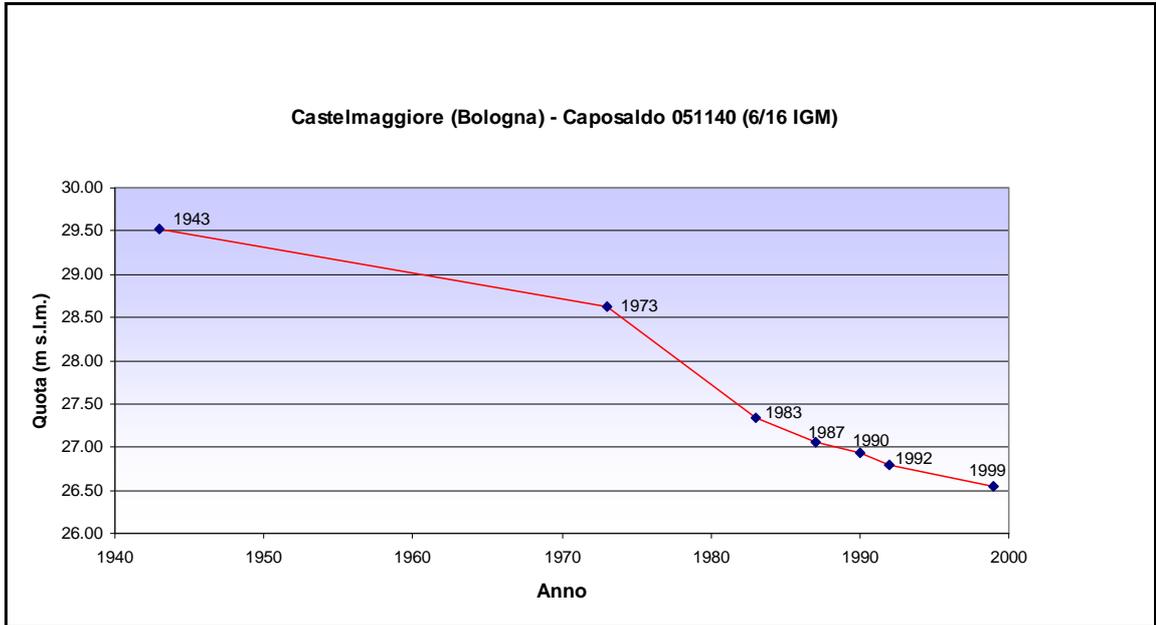


Figura 6-3: abbassamento del caposaldo di Castel Maggiore (BO)



6.2 IL MODELLO DI SUBSIDENZA

6.2.1 Metodologia

La relazione fondamentale che esprime il processo di consolidazione verticale di un ammasso poroso saturo è (Verruijt, 2004):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad \text{Equazione 6.1: equazione di governo del processo di consolidazione}$$

in cui:

- p = pressione
- t = tempo
- c_v = coefficiente di consolidazione

Il coefficiente di consolidazione, a sua volta, è espresso da:

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w (m_v + n\beta)}$$

in cui k è la permeabilità, m_v la compressibilità, γ_w il peso di volume dell'acqua, n la porosità e β la compressibilità dell'acqua.

L'equazione prevede le seguenti ipotesi-limitazioni:

- trascurabile la deformazione sul piano orizzontale, per cui il modello di compattazione è monodimensionale verticale;

- le dimensioni dell'elemento di volume ed i coefficienti caratteristici del mezzo (permeabilità, porosità e compressibilità) sono assunti costanti per tutta la durata del processo.

Si trascura infine il processo di consolidazione secondaria, dovuto alla deformazione permanente e a lungo termine del mezzo poroso (equivale allo stato in cui tutta l'acqua soggetta a moto gravitativo è defluita), che in genere fornisce un contributo molto modesto. In Idroser (1989), nel quadro della prima indagine della subsidenza di Bologna, questo contributo è stato stimato sulla base di test di laboratorio nella misura dello 0,2 %.

La soluzione dell'equazione (1) è integrata sia nello spazio sia nel tempo alle differenze finite (Verruijt, 2004) e prevede necessariamente la conoscenza dell'evoluzione della pressione nel corso del processo, conoscenza che nel caso specifico è stata derivata dal modello di flusso.

In generale è possibile associare le due equazioni e risolverle nel medesimo contesto; tuttavia, l'evoluzione della compattazione è molto diversa, in termini di tempo, da quella del flusso; non solo, la stabilità dell'integrazione nel tempo dipende fortemente dalla scelta del passo di integrazione (si veda per questo sempre Verruijt), che a sua volta dipende dal coefficiente di consolidazione, che esprime appunto la velocità del processo.

E' facile vedere quindi che, soprattutto all'inizio del processo, è necessario utilizzare intervalli di tempo molto piccoli, dell'ordine dei minuti o dei secondi, per poi passare abbastanza rapidamente ad intervalli maggiori. Sempre Verruijt suggerisce una progressione geometrica con ragione 1,2.

Questo schema di integrazione nel tempo è molto difficoltoso da applicare per un sistema idrogeologico così complesso: si è preferito quindi tenere separate le due fasi di calcolo, in modo da applicare l'equazione (1) alle soluzioni intermedie ottenute, preliminarmente, con Modflow.

Si vede poi, dall'analisi delle risposte (cfr. par. successivi), che la maggior parte della compattazione si esaurisce effettivamente nel giro di poche settimane, pochi mesi al massimo. In questo senso, la schematizzazione del modello idrogeologico non è coerente con il processo di consolidazione, dato che è stato sviluppato su base annuale, ma si tratta di una scelta di fondo assunta consapevolmente per due motivi non trascurabili:

1. a scala annuale, il sistema ha richiesto la taratura accurata su 16 intervalli di tempo in regime transitorio. A scala almeno stagionale, la taratura avrebbe dovuto essere sviluppata su 16 x 4 intervalli, con un appesantimento molto elevato dei tempi di produzione. Inoltre, lo sviluppo di Modflow con intervalli di tempo dell'ordine sopra indicato genera una mole di calcolo e di file in uscita di difficile gestione;
2. a scala stagionale, le informazioni sui prelievi da falda (che regolano quasi totalmente le variazioni di pressione nel sistema sotterraneo) non sono molto conosciute da poter effettuare un'approssimazione del genere. Si ricorda, infatti, che tutto lo studio si basa su tre stime dei prelievi, che sono disponibili rispettivamente al 1976, al 1985 e al 2002.

6.2.2 Distribuzione dei dati sperimentali

I dati osservati sono stati elaborati con strumenti geostatistici per ottenere le distribuzioni dei valori di subsidenza da utilizzare come obiettivo per la calibrazione della compressibilità. Nelle figure seguenti (Figura 6-4, Figura 6-5, Figura 6-6) sono riportati gli abbassamenti misurati negli anni 1987, 1992 e 1999 a partire dal 1983.

Figura 6-4: abbassamenti misurati nel periodo 1983-1987 (cm)

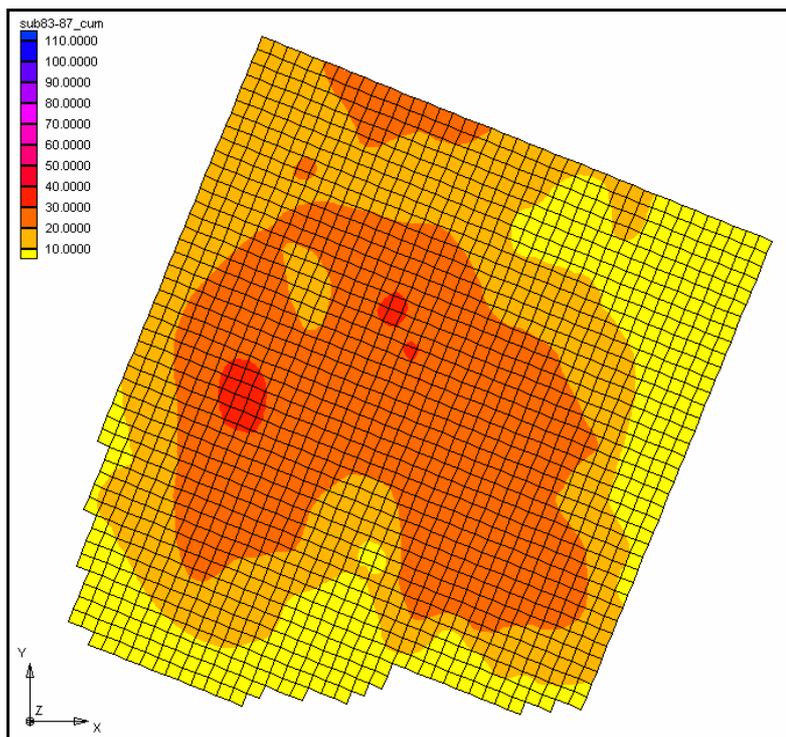


Figura 6-5: abbassamenti misurati nel periodo 1983-1992 (cm)

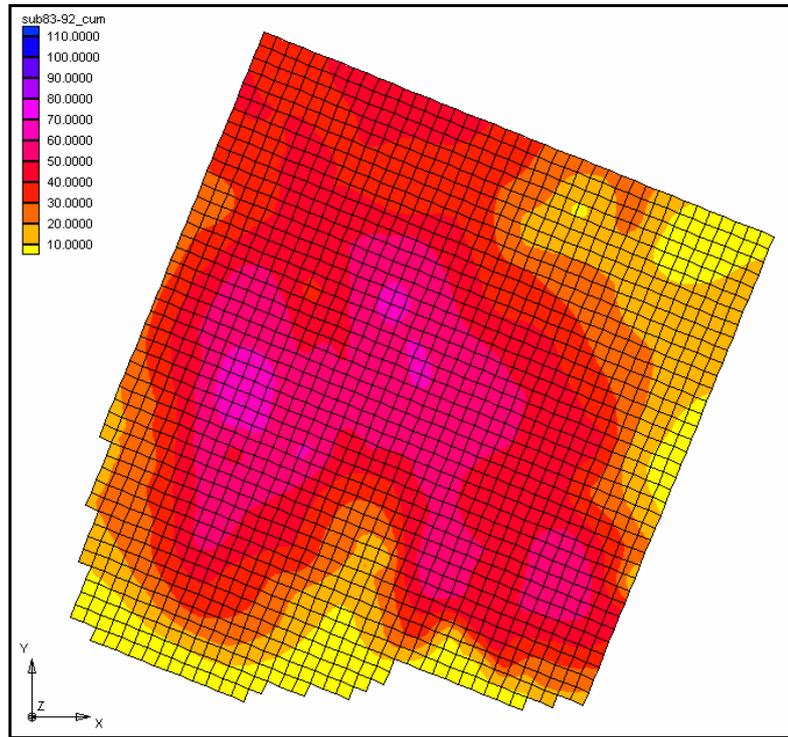
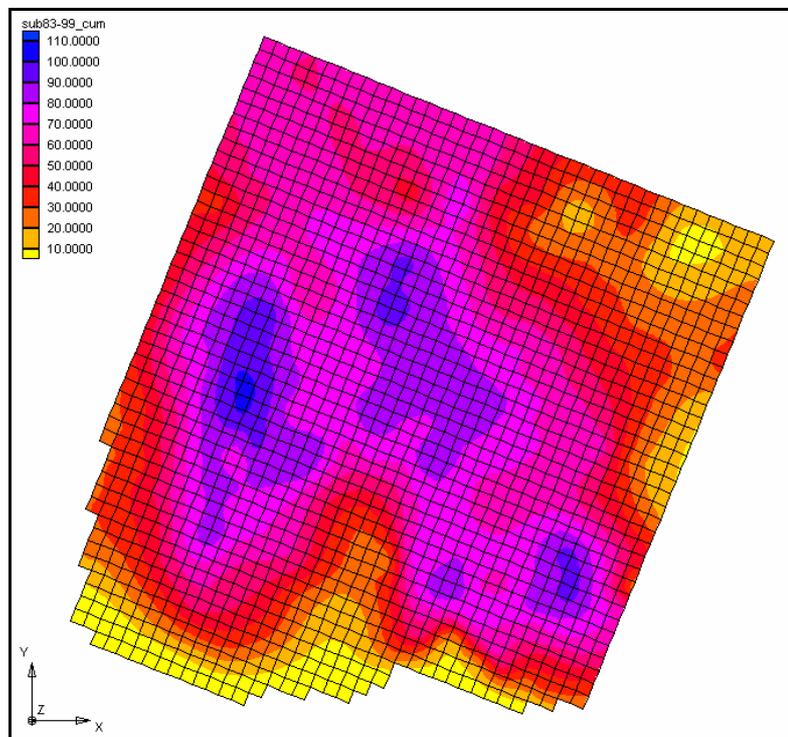


Figura 6-6: abbassamenti misurati nel periodo 1983-1999 (cm)



6.2.3 Taratura del modello della subsidenza

Come si è già ampiamente discusso, i modelli qui impiegati sono matematicamente *malposti*, qualcuno li chiama modelli *sporchi*, perché le equazioni numeriche che vengono impiegate prevedono la conoscenza di un insieme di dati che in realtà conosciuti non sono: è il caso della permeabilità nel modello di flusso, per esempio, oppure della compressibilità nell'ambito del processo di stima della subsidenza. La soluzione di tutti questi sistemi è quindi rappresentata dagli insiemi dei coefficienti che vengono impiegati per eseguire i calcoli: permeabilità, porosità e immagazzinamento (per il flusso), compressibilità (per la subsidenza), dispersione longitudinale e trasversale (per il trasporto in soluzione), coefficiente di diffusione (per i modelli densità-dipendenti, come le acque salate).

Per quello che riguarda il flusso, la taratura si avvale delle osservazioni idrauliche, come la quota d'acqua in falda, delle prove di portata in pozzo, del chimismo dell'acqua ecc. Si tratta di una base di conoscenze molto estesa che, se ben utilizzata, consente di realizzare modelli di buon livello. Nel caso invece della consolidazione, i dati di base sono particolarmente scarsi: infatti, la taratura avviene solo sulla base della variazione totale di altimetria al suolo (che a sua volta si ottiene mediante le livellazioni topografiche di precisione), per cui non è possibile alcuna forma di controllo sul contributo alla subsidenza generato dalla roccia in funzione della profondità e dello spessore degli strati. Inoltre, i dati di laboratorio, che forniscono in qualche caso la compressibilità, sono estremamente rarefatti, tanto che non sono in grado altro che di fornire alcune indicazioni di larga massima.

Questi sono limiti strettamente connessi alla metodologia corrente: i modelli deterministici di questo tipo hanno capacità molto elevate di approssimare effettivamente le fenomenologie di interesse, ma dipendono da un insieme di informazioni che, nella maggior parte dei casi, sono rarefatte, talvolta aleatorie. Il processo di taratura tende ad ovviare, nei limiti del possibile, a queste limitazioni, ma dipende comunque dalla base di conoscenze esistenti.

Vi è poi un altro limite, di tipo più metodologico, che attiene alle modalità con cui i modelli vengono rappresentati matematicamente ed i relativi sistemi di equazioni vengono risolti: nel primo caso, si tratta in genere di limitazioni che riguardano il fenomeno in sé (per simulare il trasporto di un contaminante, ad esempio, sono necessarie due equazioni, una per il flusso ed una per la concentrazione ecc.), mentre nel secondo caso vi sono i limiti legati al tipo di tecniche che vengono impiegate per risolvere il sistema di equazioni una volta assegnato.

Tenendo conto di tutti questi aspetti, appare evidente che il numero dei gradi di libertà di questi sistemi è estremamente elevato e che, in linea di principio, le combinazioni di coefficienti (permeabilità, porosità ecc.) che possono dare soluzioni apparentemente ragionevoli/accettabili sono moltissime. La taratura serve appunto a circoscrivere il numero di queste combinazioni e a proporre, sulla base di riscontri fisici obiettivi, quelle che hanno effettivamente la possibilità di rispondere ai requisiti di interesse.

Nel caso della simulazione del flusso, che in questo caso è la prima parte del problema, vi è una discreta disponibilità di informazioni (discreta in termini relativi) e la taratura che è stata realizzata del flusso può essere considerata di ottimo livello. Questo anche perché vi è la disponibilità di un numero elevato di informazioni di tipo "indiretto" (pioggia, idrologia fluviale, prelievi da falda ecc.) che, messe assieme, consentono di

restringere il campo delle soluzioni da quelle *numericamente possibili* a quelle *fisicamente accettabili*.

Nel caso invece della subsidenza, ciò non è vero per almeno due ordini di ragioni a carattere generale:

- la prima è la mancanza di informazioni di tipo disaggregato per la valutazione degli effetti: come detto, l'unico riscontro sperimentale avviene alla superficie del suolo sotto forma di deformazione totale, mentre è ancora abbastanza improponibile la valutazione della deformazione in termini tridimensionali su un numero appena accettabile di punti. Da questo punto di vista, la seconda esperienza in corso a Bologna mediante l'installazione di due assestimetri, mostra tutta l'efficacia ma anche tutti i costi che ne seguono;
- la seconda è la mancanza di informazioni di tipo diretto per caratterizzare il mezzo poroso dal punto di vista della meccanica delle deformazioni, obiettivo che si raggiunge in genere mediante l'esecuzione di prove edometriche. Quelle disponibili oggi sono pochissime e comunque concentrate entro i primi 40-80 metri di profondità, dato che derivano per la maggior parte da indagini di tipo geotecnico realizzate per la costruzione di manufatti e infrastrutture.

Da queste considerazioni segue che le soluzioni in grado di dare un ragionevole grado di minimizzazione degli scarti sono molto più numerose di quanto non accade in genere con un modello di flusso; il campo di incertezza, di conseguenza, resta decisamente elevato.

Ciò premesso, i risultati qui presentati sono stati ottenuti calibrando il sistema di calcolo sulla base di due diversi criteri, entrambi legati in qualche modo alla risposta elastica del mezzo poroso: è noto infatti che la diminuzione di volume che segue ad una variazione di pressione negativa non corrisponde ad una variazione di volume di pari entità in presenza di una variazione di volume di segno positivo. Né è possibile, con il sistema di calcolo qui impiegato, tenere conto della deformazione del mezzo durante i calcoli. Per sviluppare alcune verifiche di fattibilità anche in questo senso, tuttavia, la taratura è stata eseguita variando i criteri a base del calcolo per organizzare le seguenti situazioni:

1. *criterio 1*: taratura separata su tre periodi distinti (1983-1987, 1987-1992, 1992-1999), in modo da ottenere tre diverse distribuzioni della compressibilità e, indirettamente, condizioni di deformazione del mezzo poroso (ovviamente a carico solo della compressibilità, essendo la geometria sempre costante per evidenti ragioni pratiche), considerando nullo il ritorno dovuto alle variazioni positive di pressione;
2. *criterio 2*: taratura sull'intero periodo di dati sperimentali altimetrici disponibili (1983-1999), considerando nullo il ritorno dovuto alle variazioni positive di pressione;
3. *criterio 3*: taratura sull'intero periodo di dati sperimentali altimetrici disponibili (1983-1999) considerando al 100% il ritorno dovuto alle variazioni positive di pressione.

I risultati ottenuti, in tutti e tre i casi sono di buon livello; il caso 3) è quello che mostra i risultati peggiori, ma presumibilmente, dovrebbe essere affrontato avendo a disposizione una quantità di tempo maggiore, dato che in tali condizioni il problema è più complesso e l'assestamento più difficile da ottenere.

Se la ricostruzione della subsidenza al livello del suolo è decisamente buona, non vi è modo di verificare su basi sperimentali, dirette o indirette:

- la distribuzione verticale dei contributi parziali all'abbassamento totale;
- l'aderenza della compressibilità stimata alla compressibilità attesa per ciascun elemento di volume.

La bontà della distribuzione verticale è tutta legata alla bontà della distribuzione verticale del carico idraulico, ma vi possono essere eterogeneità notevoli anche della compressibilità e di queste ultime non si riesce a tenerne conto, almeno con le conoscenze oggi disponibili. Per lo stesso motivo, anche quanto legato al punto successivo ha indubbiamente dei limiti.

Nel costruire la taratura con i criteri 2 e 3 si è visto anche che l'evoluzione nel tempo della subsidenza non è sempre rispettata: infatti, se il controllo avviene solo alla fine del periodo noto (1983-1999) è difficile garantire a priori i risultati nelle fasi intermedie: nel calcolo della compattazione, infatti, non vi è un meccanismo di condizioni al bordo come accade, per analogia, nel modello di flusso, che può essere così condizionato ad "agganciarsi" periodicamente a condizioni assegnate su base sperimentale.

E' per questo motivo che è stato applicato anche il criterio 1, cioè per verificare l'esistenza di soluzioni accettabili al livello dei periodi di osservazione intermedi; si è trovato che tali soluzioni esistono e che sono qualitativamente più che accettabili.

Come anticipato, per ottenere una migliore riproduzione della consolidazione nel tempo, la fase di calibrazione è stata condotta all'interno di ciascuno dei tre intervalli di tempo compresi tra le misurazioni disponibili (1983-1987, 1987-1992 e 1992-1999). In tal modo si è anche ottenuto il vantaggio di poter almeno parzialmente sopperire ad una delle limitazioni del modello, che considera costante nel tempo la compressibilità.

Le immagini che seguono documentano i risultati che sono stati ottenuti nei casi descritti. A questo proposito va notato che anche le immagini riportate come "subsidenza osservata" derivano da un modello, nel senso che sono il prodotto di una regionalizzazione di krigaggio ordinario. Poiché una regionalizzazione di questo tipo tende a smussare i minimi ed i massimi relativi denunciati dalle osservazioni sperimentali, non è detto che gli scarti tra i due modelli siano sempre a carico del modello di subsidenza. Anzi, nella riproduzione di tali massimi e minimi proprio il modello di subsidenza potrebbe dare risultati migliori.

Nella Figura 6-7, Figura 6-8 e Figura 6-9 sono riportati per ciascun periodo (criterio 1) i confronti tra i dati sperimentali ed i dati ricostruiti dal modello.

Figura 6-7: confronto tra dati osservati (a sx) e ricostruiti dal modello (a dx) nel periodo 1983-1987, criterio 1 (cm)

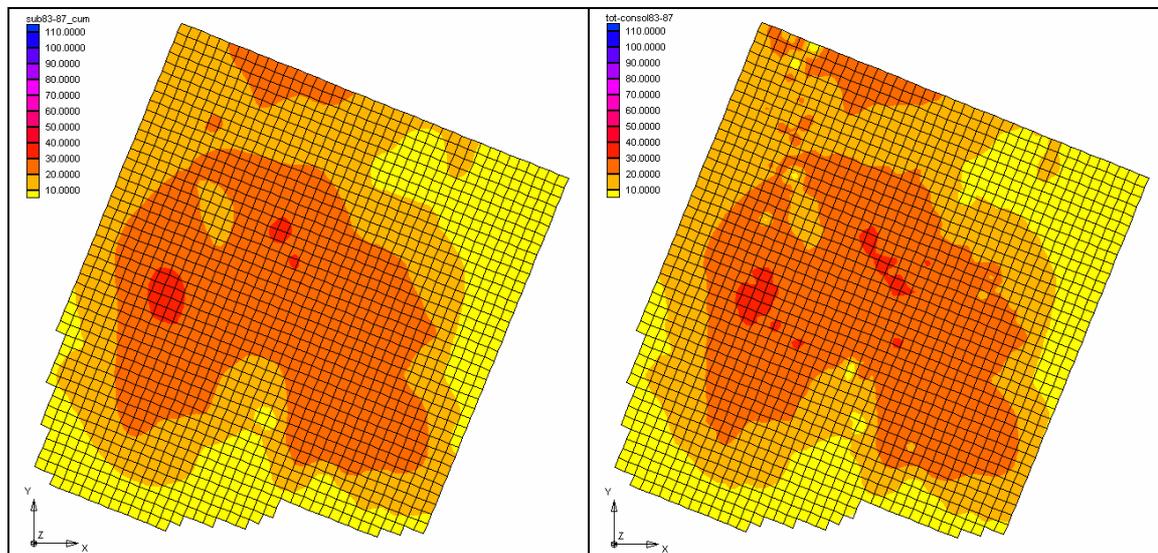


Figura 6-8: confronto tra dati osservati (a sx) e ricostruiti dal modello (a dx) nel periodo 1987-1992, criterio 1 (cm)

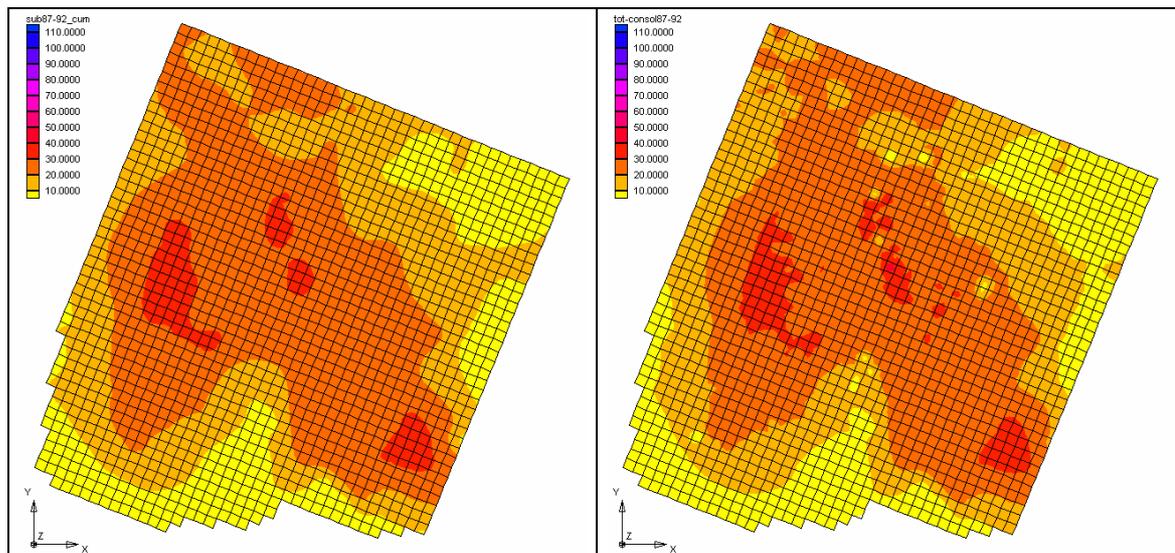
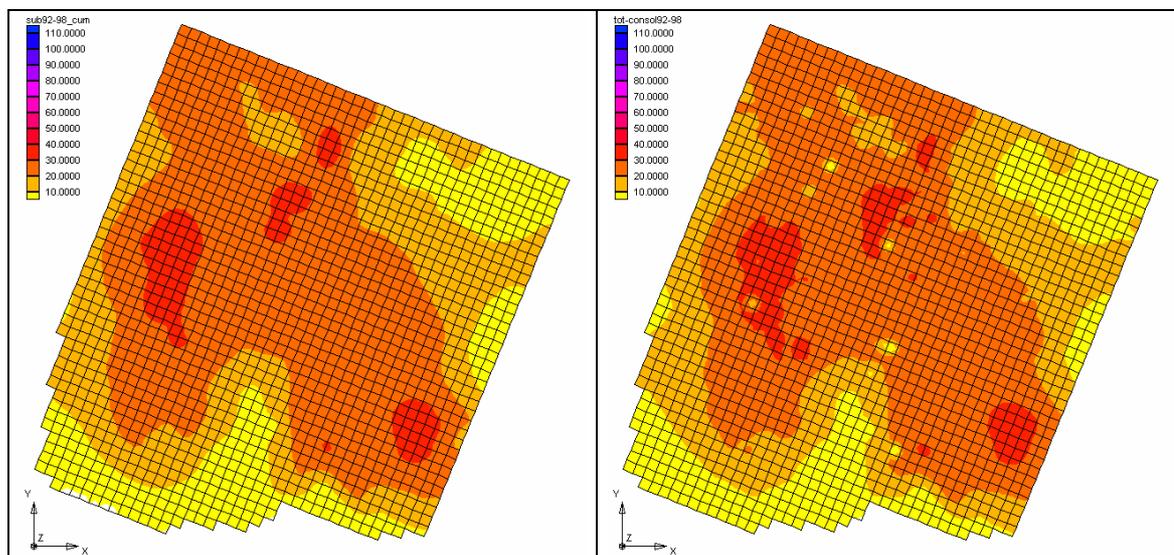
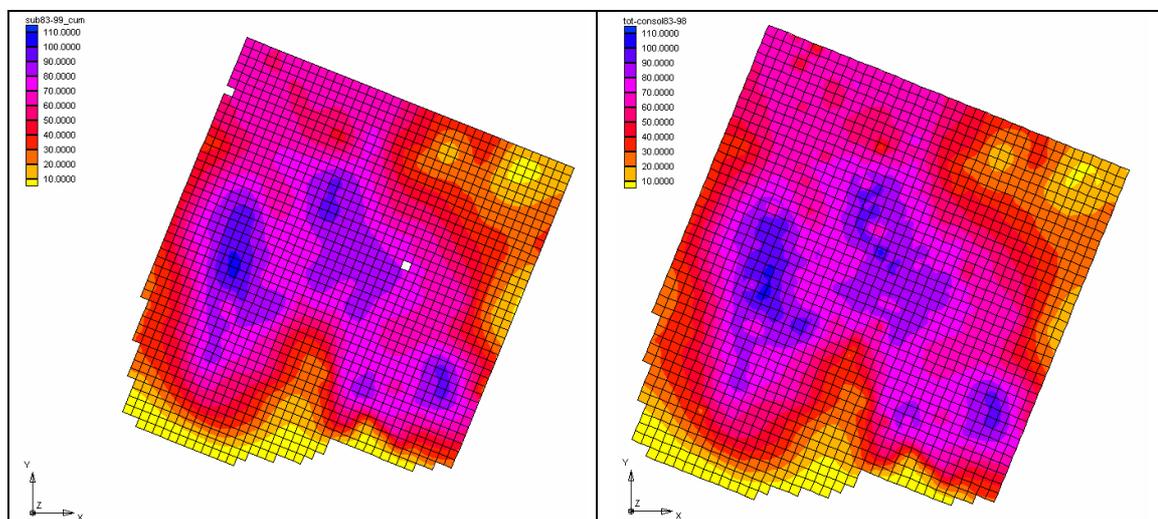


Figura 6-9: confronto tra dati osservati (a sx) e ricostruiti dal modello (a dx) nel periodo 1992-1999, criterio 1 (cm)



Nella Figura 6-10 è riportato lo stesso confronto ma relativo all'intero periodo di simulazione 1983-1999, corrispondente alla calibrazione realizzata con il criterio 2.

Figura 6-10: confronto tra dati osservati (a sx) e ricostruiti dal modello (a dx) nel periodo 1983-1999, criterio 2(cm)



Nelle successive tre figure (Figura 6-11, Figura 6-12 e Figura 6-13) sono riportati invece alcuni punti dell'area di studio aventi la peculiarità di ricadere nelle vicinanze (nel piano geografico) sia di un caposaldo di livellazione sia di un pozzo della rete di controllo utilizzata per la calibrazione del modello di flusso. Per questi punti sono riportati i diagrammi (i) dell'evoluzione nel tempo dell'intero processo di consolidazione stimato con il modello e (ii) le serie delle quote d'acqua, osservate (linee tratteggiate) e calcolate (linea continua). Le osservazioni (linee tratteggiate) sono in realtà riportate sotto forma di intervallo di confidenza (valore osservato ± 1 metro).

Nell'analisi delle figure si deve tener presente anche che i dati della subsidenza sono cumulati sulla verticale mentre quelli della piezometria fanno riferimento alla specifica profondità dei filtri.

Figura 6-11: evoluzione degli abbassamenti del suolo in alcuni punti del dominio di calcolo, criterio 1 (cm) e relativi carichi idraulici

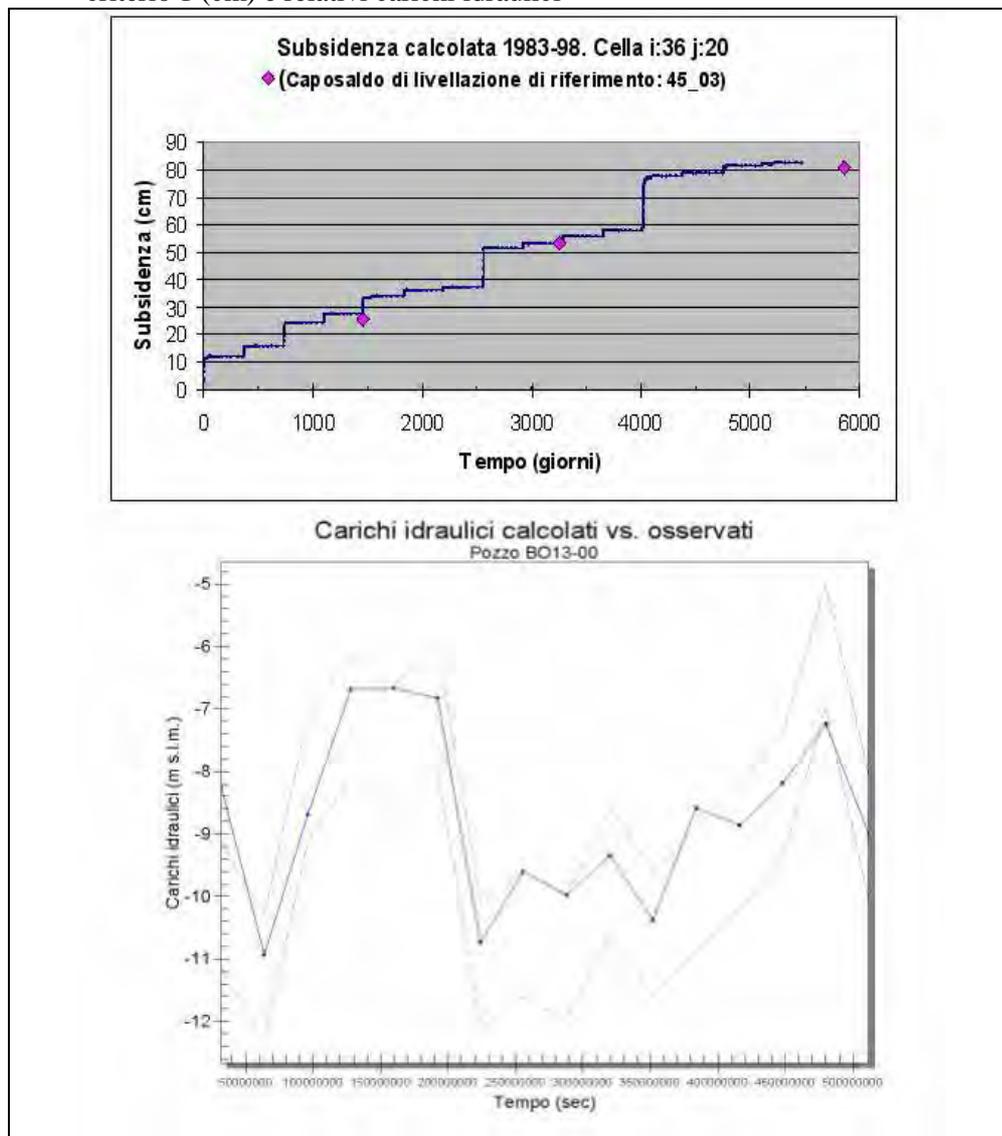


Figura 6-12: evoluzione degli abbassamenti del suolo in alcuni punti del dominio di calcolo, criterio 1 (cm) e relativi carichi idraulici

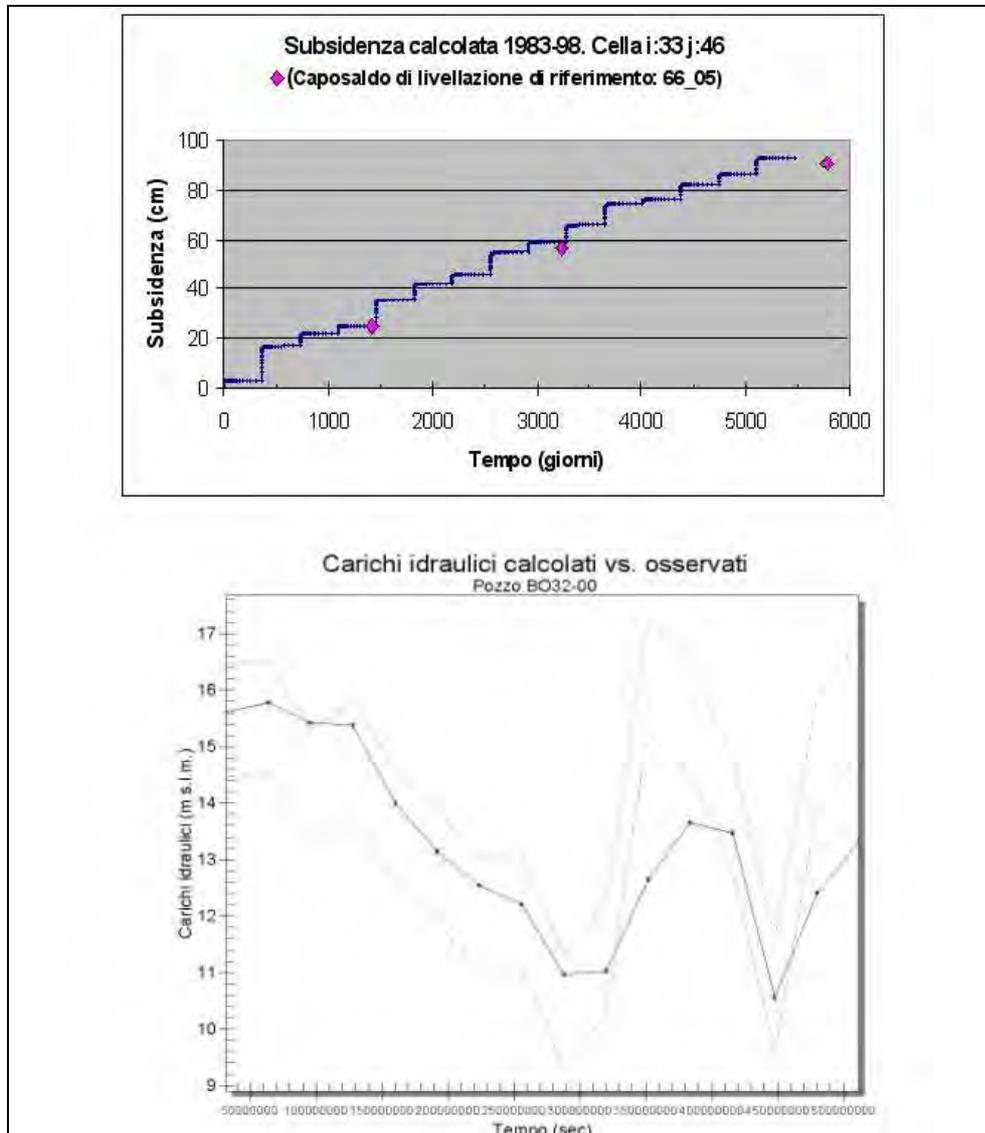
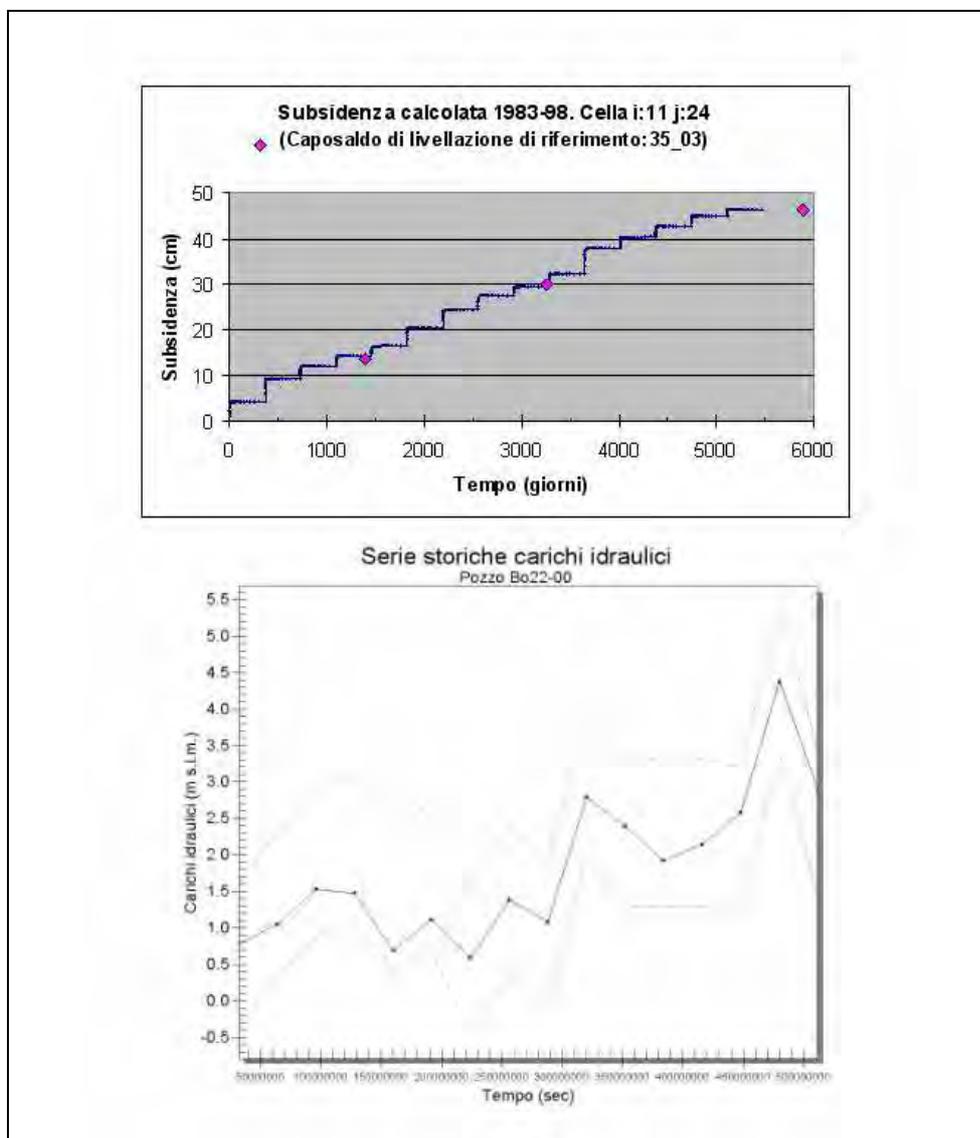


Figura 6-13: evoluzione degli abbassamenti del suolo in alcuni punti del dominio di calcolo, criterio 1 (cm) e relativi carichi idraulici



Lo strumento di calcolo è stato inoltre costruito in modo tale da fornire anche i diversi contributi alla compattazione totale riferiti alle diverse fasce di profondità. Nelle Figura 6-14 sono riportati i contributi dei tre gruppi acquiferi per l'intero periodo simulato mentre nella Figura 6-15 quelli dei diversi complessi acquiferi appartenenti al gruppo acquifero A.

Figura 6-14: contributi alla consolidazione totale dei diversi gruppi acquiferi nel periodo 1983-1999, criterio 2 (cm)

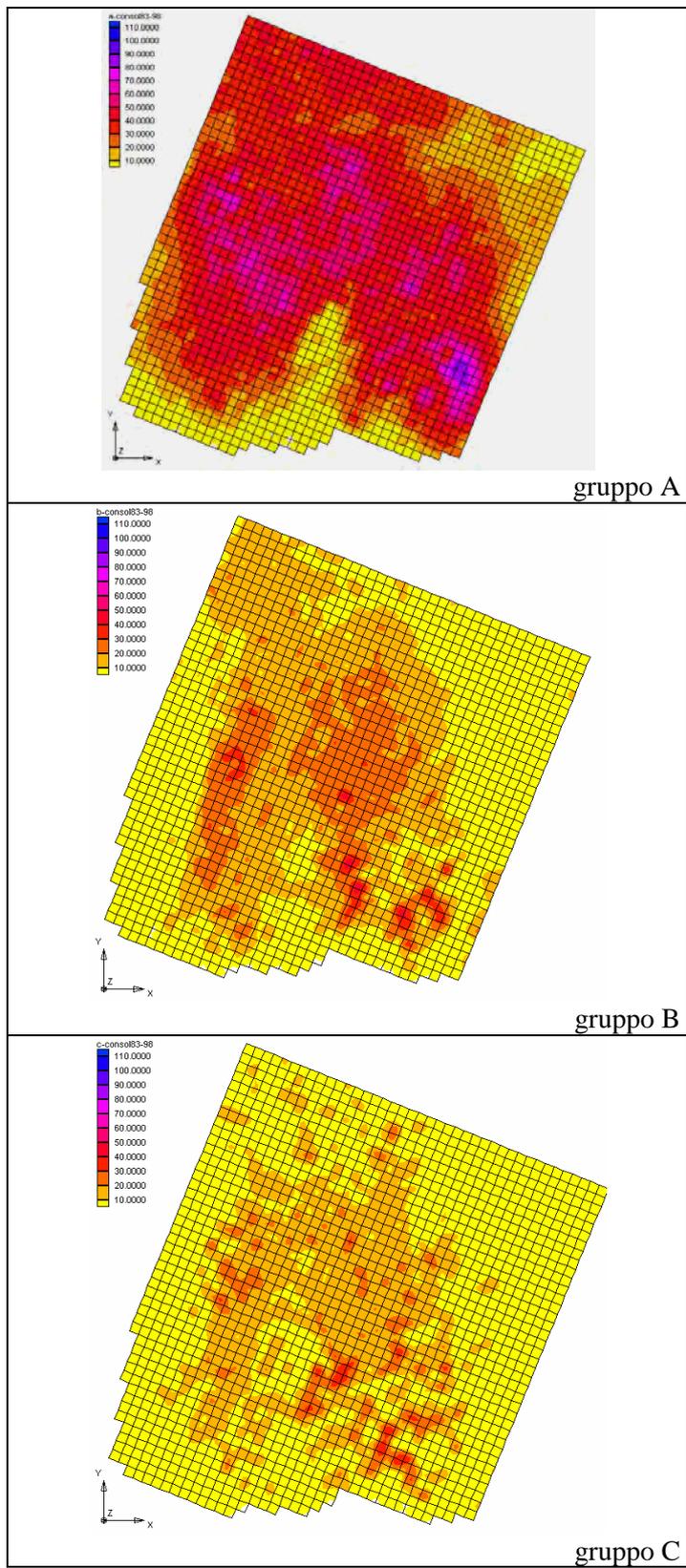
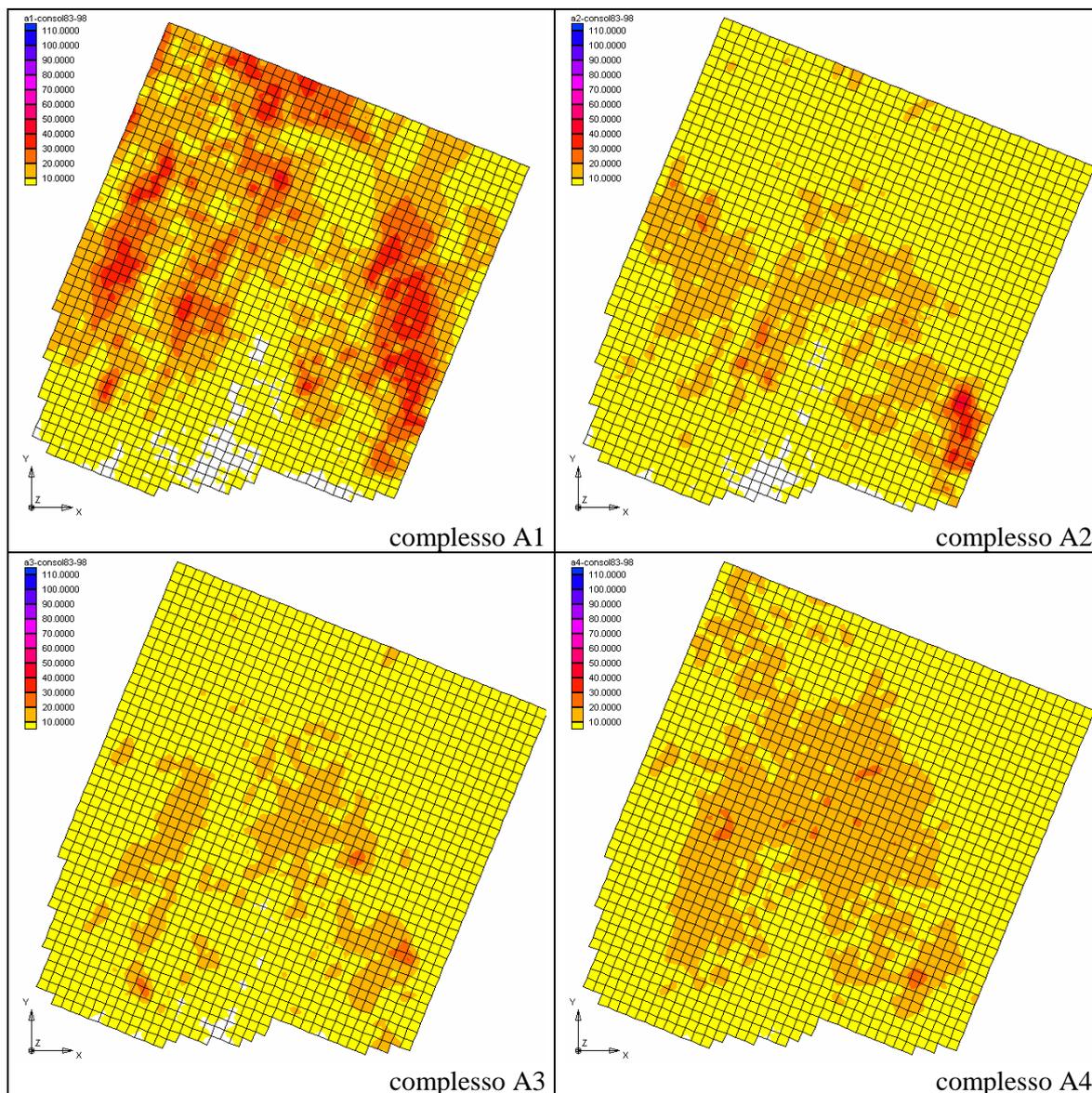


Figura 6-15: Contributi alla consolidazione totale dei complessi acquiferi del gruppo acquifero A nel periodo 1983-1999, criterio 2 (cm)



Dall'analisi della Figura 6-14 è possibile attribuire diversi valori di subsidenza correlabili ai singoli gruppi acquiferi. Si può vedere che rispetto alla subsidenza totale, il gruppo A è quello che concorre in maniera maggiore a tale fenomeno con una percentuale per lo più variabile tra il 45% ed il 60%, fatta eccezione per le porzioni apicali di conoide caratterizzate da una subsidenza ugualmente distribuita fra i gruppi A, B e C.

Analizzando i soli gruppi acquiferi più profondi B e C, si può constatare una diminuzione della subsidenza. I valori riscontrati per il settore centrale sono compresi fra i 10 e 40 cm (in 16 anni) per B, con diminuzione intorno ai 20-30 cm per C. Le

rimanenti aree laterali sono invece caratterizzate da valori di subsidenza più bassi inferiori ai 10 cm e distribuiti fra i diversi gruppi acquiferi.

Per quanto riguarda i singoli complessi acquiferi del gruppo A (Figura 6-15), si può osservare che A1, lungo tre fasce disposte SO-NE, concorre maggiormente agli abbassamenti del suolo rispetto ad A2, A3 e A4 con una percentuale che supera anche il 70% rispetto all'intero gruppo A. La porzione centrale dell'area di studio è invece caratterizzata da una subsidenza abbastanza distribuita fra i complessi A.

6.2.4 Considerazioni conclusive sulla taratura

La taratura del modello di subsidenza consiste, fondamentalmente, nell'individuazione di un insieme di valore della compressibilità adeguato a rappresentare la fenomenologia, essendo le variazioni di pressione definite attraverso la simulazione del flusso.

Si è visto anche che, per circoscrivere il campo delle possibilità, sono stati eseguiti diversi tentativi, con l'intento di sfruttare al meglio e al massimo tutte le informazioni a disposizione, compresa una breve sintesi di quanto noto in letteratura relativamente alle stime della compressibilità (Tabella 6-1). Il numero dei tentativi effettivamente realizzato è poi molto superiore a quelli qui riportati.

Tabella 6-1: Valori tipici della compressibilità in cm²/kg

Fonte	Litotipo	Min	Max	Gruppi	
				Min	Max
1	Argilla dura	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-1}$
3	Argilla dura	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$		
1	Argilla media	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$7.0 \cdot 10^{-3}$		
3	Argilla mediamente dura	$6.8 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$		
3	Argilla plastica	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$2.0 \cdot 10^{-1}$		
1	Argilla molle	$4.0 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-2}$		
1	Argilla molto molle	$7.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-2}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-2}$
1	Limo	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-2}$		
1	Sabbia limosa	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
1	Sabbia compatta	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$		
3	Sabbia densa	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$		
2	Sabbie (addensamento variabile)	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$		
1	Sabbia sciolta	$4.0 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$		
3	Sabbia sciolta	$5.1 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$
1	Sabbia e ghiaia (compatta)	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$		
1	Sabbia e ghiaia (sciolta)	$7.0 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$		
3	Sabbia e ghiaia addensata	$5.1 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$		

Fonti: (1) Bowles (1991), (2) Lancellotta (1997), (3) Rieke & Chilingarian (1974)

In questo paragrafo, per fornire una sintesi di quanto è stato fatto, sono quindi riportate due tipi di informazioni:

- in Figura 6-16 e in Figura 6-17 vi sono i diagrammi con le principali classi di frequenza della compressibilità ottenuti attraverso l'intero processo di taratura. I diagrammi sono accompagnati dalle classi di compressibilità dei materiali e sono inoltre riportati alcuni dei risultati di laboratorio disponibili, ricavati dal sondaggio eseguito in via Stalingrado a Bologna;
- le figure successive, invece, riportano sia in pianta che in sezione, la distribuzione della compressibilità adottata nei due casi principali (criterio 2 e criterio 3).

Figura 6-16: classi di frequenza della compressibilità e riferimenti di letteratura (taratura criterio 2). In ascisse la compressibilità in cm^2/kg , in ordinate il numero delle celle nel modello.

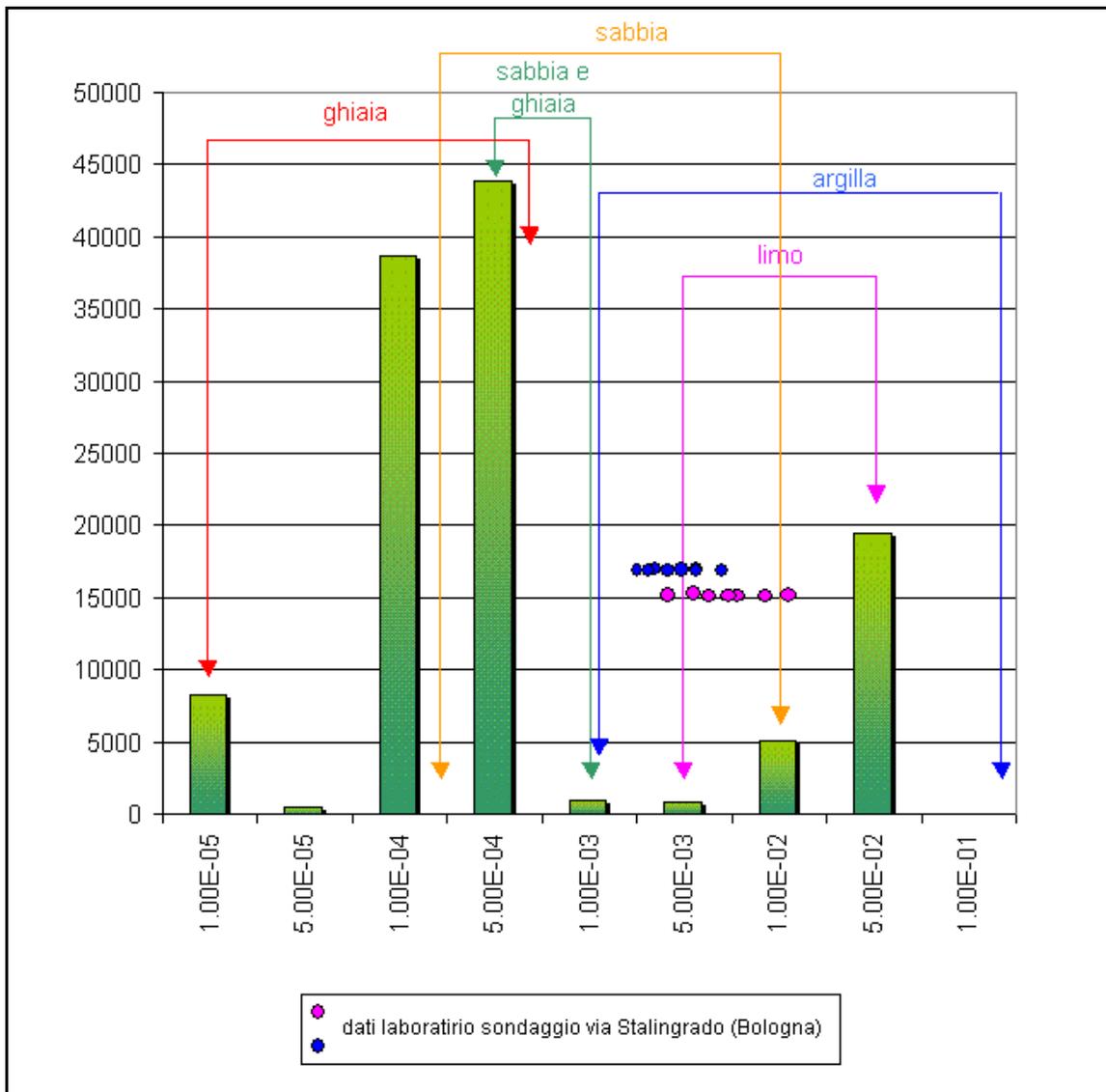


Figura 6-17: classi di frequenza della compressibilità e riferimenti di letteratura (taratura criterio 3). In ascisse la compressibilità in cm^2/kg , in ordinate il numero delle celle nel modello.

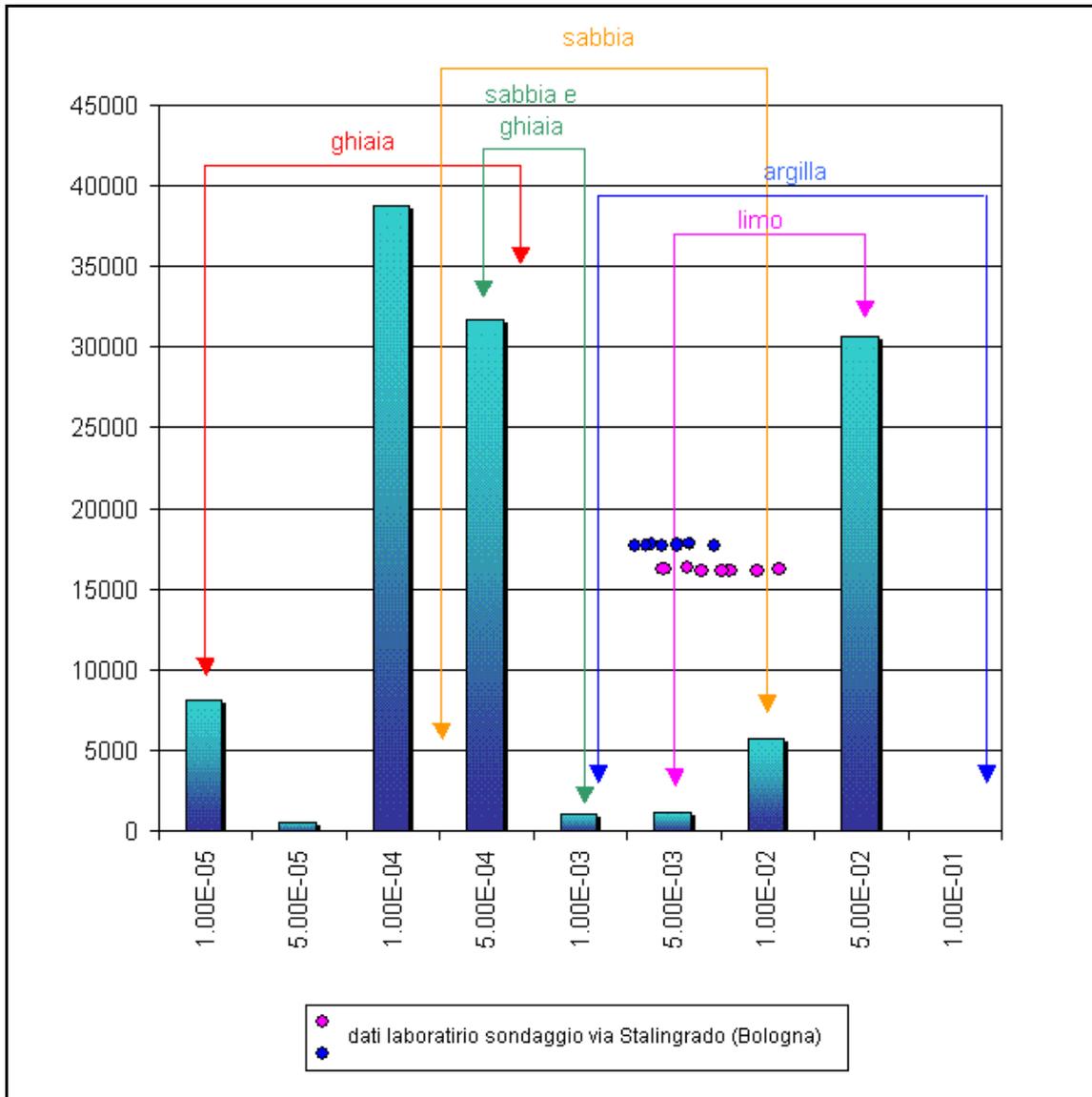


Figura 6-18: distribuzione della compressibilità in pianta e in sezione (criterio 2)

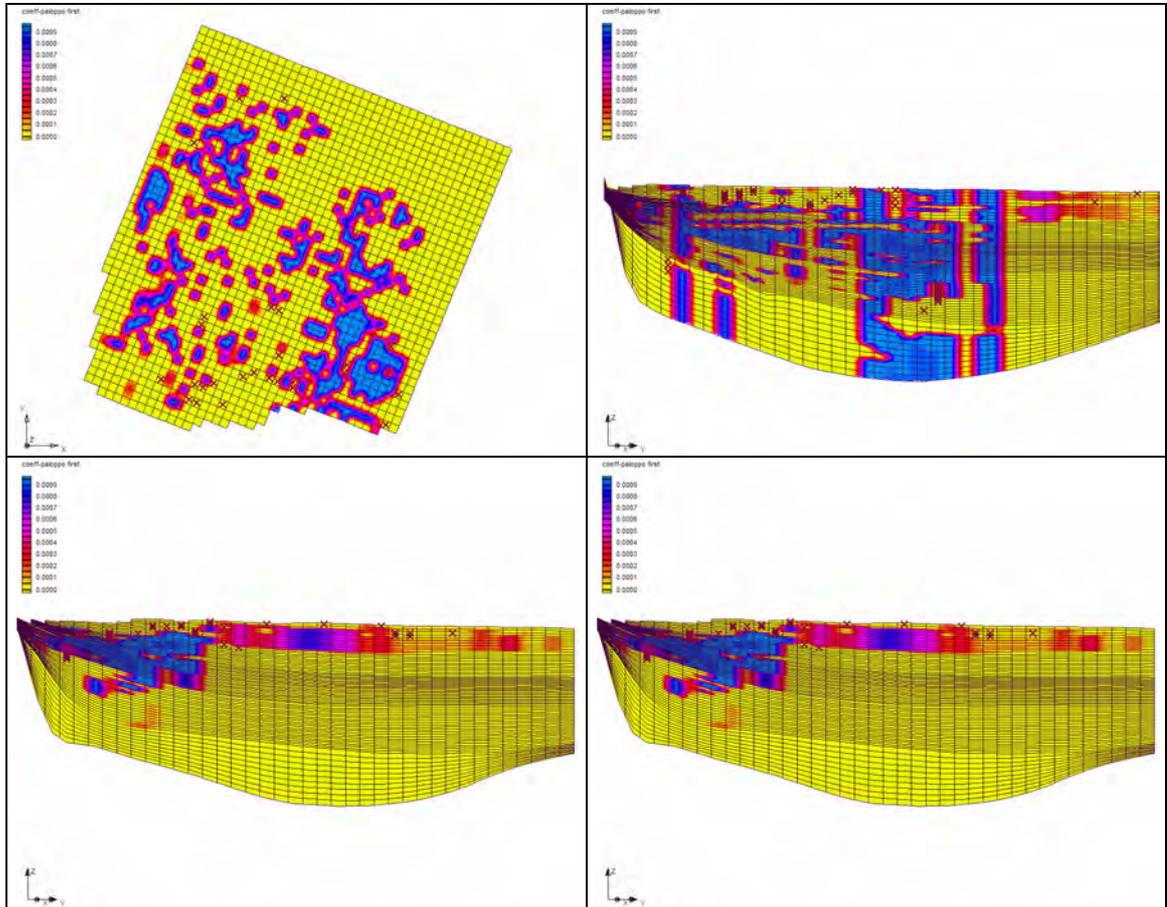
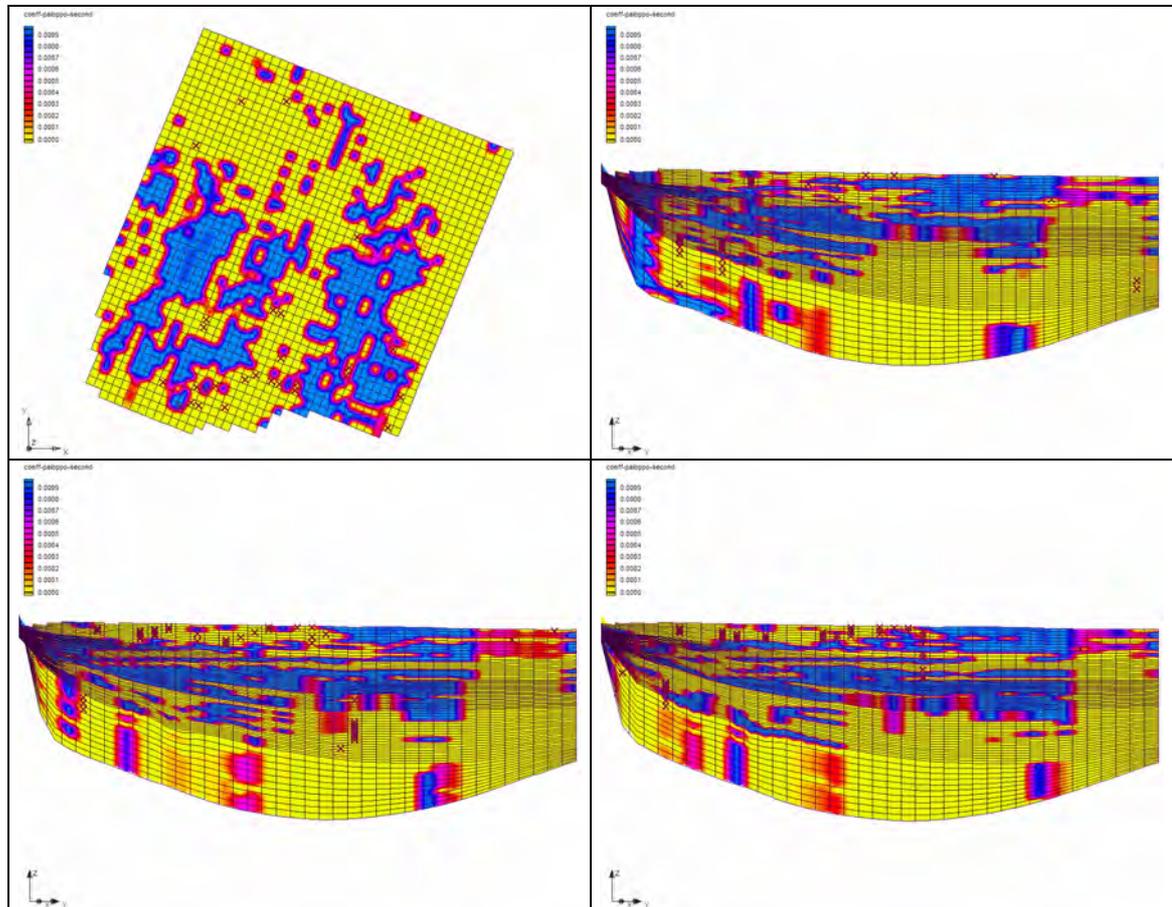


Figura 6-19: distribuzione della compressibilità in pianta e in sezione (criterio 3)



7. Indagine geognostica e caratterizzazione fisico-meccanica tridimensionale (Attività C2)

Al fine di definire le caratteristiche geomeccaniche del sistema è stato realizzato un nuovo sondaggio geognostico profondo 200 m in una area strategica della conoide individuata sulla base dei criteri che verranno successivamente richiamati. Il sondaggio è stato successivamente attrezzato con la posa di assestometro per la misurazione degli assestamenti lungo lo spessore attraversato. Le operazioni connesse all'attività sono state predisposte da ARPA e coordinate dal Servizio Geologico, Sismico dei Suoli della Regione Emilia - Romagna.

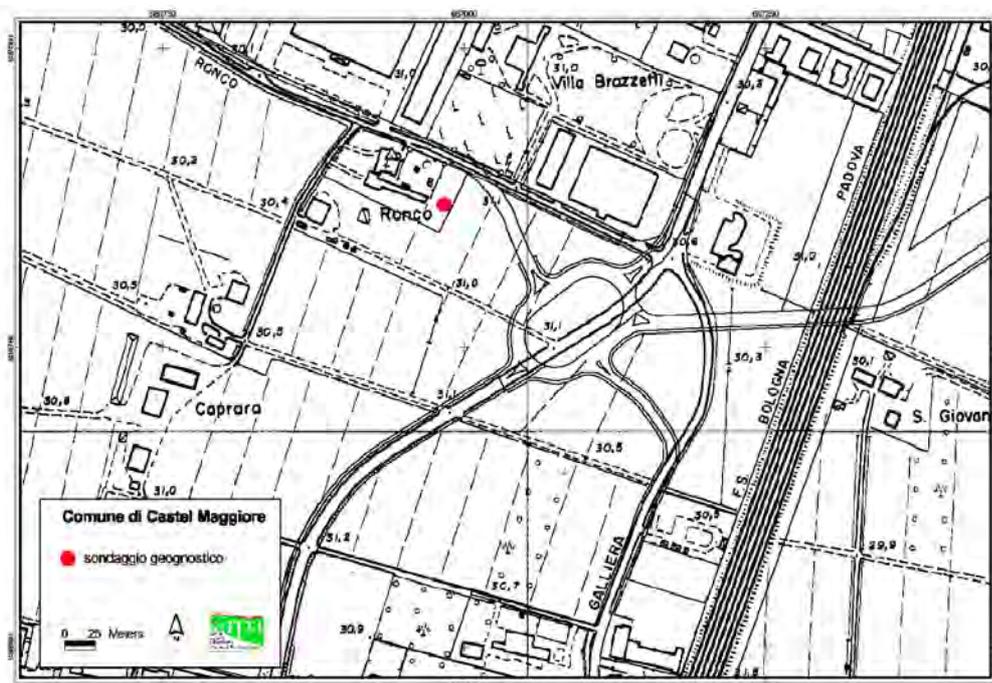
7.1 PREDISPOSIZIONE, ASSEGNAZIONE ED ESECUZIONE DELLE ATTIVITÀ

Per la realizzazione del sondaggio geognostico completato con la posa di assestometro profondo (-200 m p.c.), è stata indetta a luglio del 2004 (Determinazione Dirigenziale n°33 del 29/07/04 della Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale – ARPA) una trattativa privata (comprensiva di capitolato d'oneri, disciplinare tecnico e offerta economica) per l'affidamento della fornitura. Sono state invitate a partecipare cinque Ditte specialistiche del settore che dovevano presentare un'offerta economica sulla base dei prezzi unitari compilando l'Allegato 2 (Offerta economica) al Capitolato d'oneri. In seguito, è pervenuta un'unica offerente che, una volta esaminata, è stata giudicata idonea secondo quanto definito nel capitolato d'oneri. Pertanto a settembre del 2004 (Determinazione Dirigenziale n°38 del 24/09/04 della Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale – ARPA) è stata approvata l'assegnazione della fornitura alla Ditta S.P.G. Sacchetto Perforazione Geotecnica s.r.l. di Adria (RO).

L'area ritenuta idonea su cui effettuare l'esecuzione del sondaggio è stata individuata nel Comune di Castel Maggiore in Via Ronco (Figura 7-1) sulla base dei seguenti criteri:

- essere possibilmente di proprietà pubblica per motivi logistici e di sicurezza della strumentazione;
- essere in zona con valori elevati di subsidenza;
- essere possibilmente vicino ad un caposaldo della rete di monitoraggio della subsidenza.

Figura 7-1 Ubicazione del sondaggio



I lavori sono stati seguiti, in qualità di Direzione Lavori, dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e sono iniziati a gennaio del 2005 e terminati a giugno del 2005.

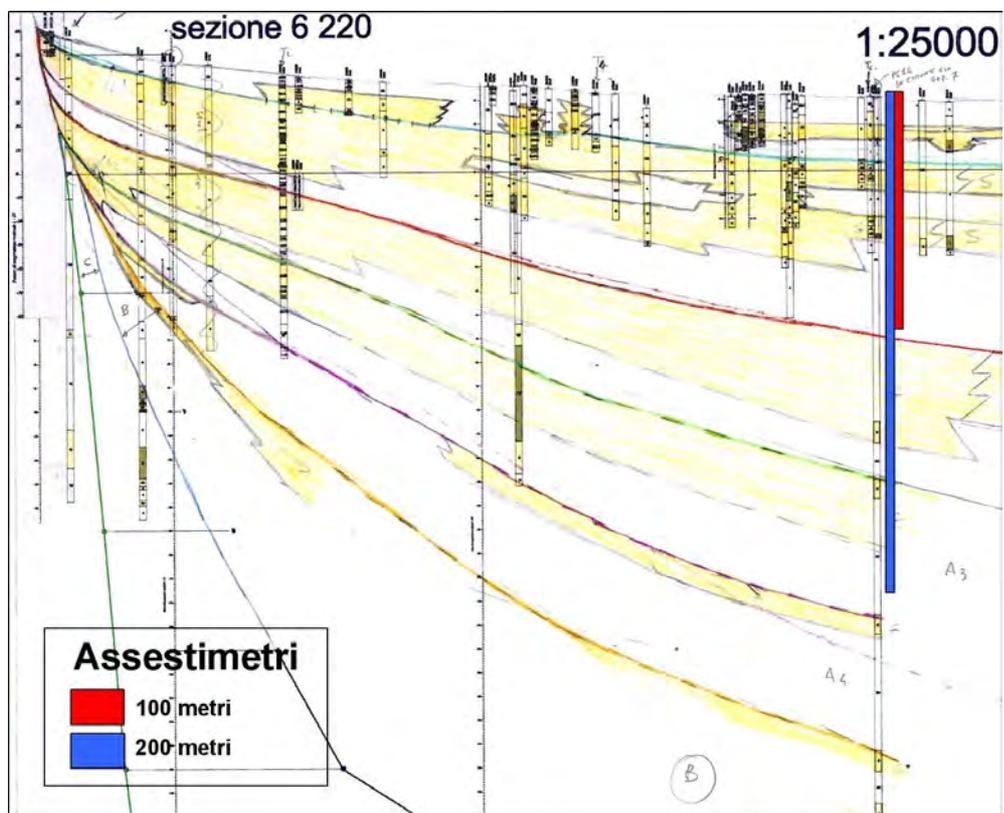
Contemporaneamente, nell'ambito dello stesso Progetto, la Provincia di Bologna e l'Autorità di Bacino del fiume Reno, hanno installato un secondo assestometro in prossimità di quello più profondo che misurerà gli abbassamenti relativi ai primi 100 metri dal p.c. (Figura 7-2, Figura 7-3). In questo modo sarà fornito un monitoraggio completo degli abbassamenti del sottosuolo.

Per rendere ancora più economico il sistema tutti i sensori dei due assestimetri sono stati collegati ad un'unica centralina di proprietà di ARPA.

Figura 7-2 Strutture di ricovero degli assestimetri.



Figura 7-3: visualizzazione in sezione dei due assestimetri



7.1.1 Installazione della strumentazione

Per la posa dell'assestometro profondo, è stato eseguito un sondaggio impegnando una perforatrice ATALAS COPCO MUSTANG A66 opportunamente modificata per la perforazione con recupero a fune "wire-line" Ø 130 (Figura 7-4).

Il lavoro è stato svolto secondo le seguenti fasi:

- predisposizione del cantiere e creazioni di piste d'accesso, allacciamento di linea di adduzione di acqua per la perforazione, ecc.;
- perforazione con colonna Ø 180 mm fino a circa -20 m p.c.;
- perforazione con colonna di rivestimento Ø 130 fino a quota -200 m p.c. impiegando, in alternativa i seguenti utensili (sempre a recupero "wire-line"):
 - utensile per la perforazione a distruzione di nucleo "tricornio" impiegato congiuntamente con la diagrafia dei parametri di perforazione MWD;
 - sistema CPTWD (Cone Penetration Test While Drilling);
 - campionatore e/o carotiere;
- posizionamento dell'assestometro profondo a -200 m p.c.
- collocamento di struttura di protezione per lo strumento di misura dell'assestometro, il sistema di trasmissione dati remoto via GMS.

Figura 7-4: perforatrice ATALAS COPCO MUSTANG A66 durante la perforazione a Castel Maggiore



7.1.1.1 Descrizione della diagrafia dei parametri di perforazione (MWD)

Questo tipo di interpretazione, deriva dall'applicazione di metodi largamente impiegati nel settore delle perforazioni petrolifere definita in molti modi a seconda della Ditta costruttrice, ma comunemente è chiamata Monitor While Drilling (MWD).

Ad una sonda idraulica a rotazione vengono applicati dei sensori di pressione nel circuito idraulico, sensori di profondità, misuratori di pressione e volume. I segnali dei sensori vengono opportunamente condizionati ed amplificati ed entrano nella ENVI Geoprinter (essenzialmente un microcomputer dedicato), dove vengono memorizzati e stampati in tempo reale durante la perforazione.

Le grandezze misurate possono essere tutte quelle in gioco durante la perforazione, e nello specifico sono state considerate:

- Pressione di spinta;
- Pressione di coppia;
- Pressione del fluido di circolazione;
- Velocità di avanzamento.

La diagrafia è stata impegnata nella perforazione “ a distruzione” e il rilievo combinato dei parametri di perforazione unito all'esame del cutting ha permesso una buona definizione stratigrafica, come evidenziato nelle figure che seguono (Figura 7-5, Figura 7-6, Figura 7-7, Figura 7-8).

Figura 7-5: diagrafia MWD e stratigrafia profondità 0-50m

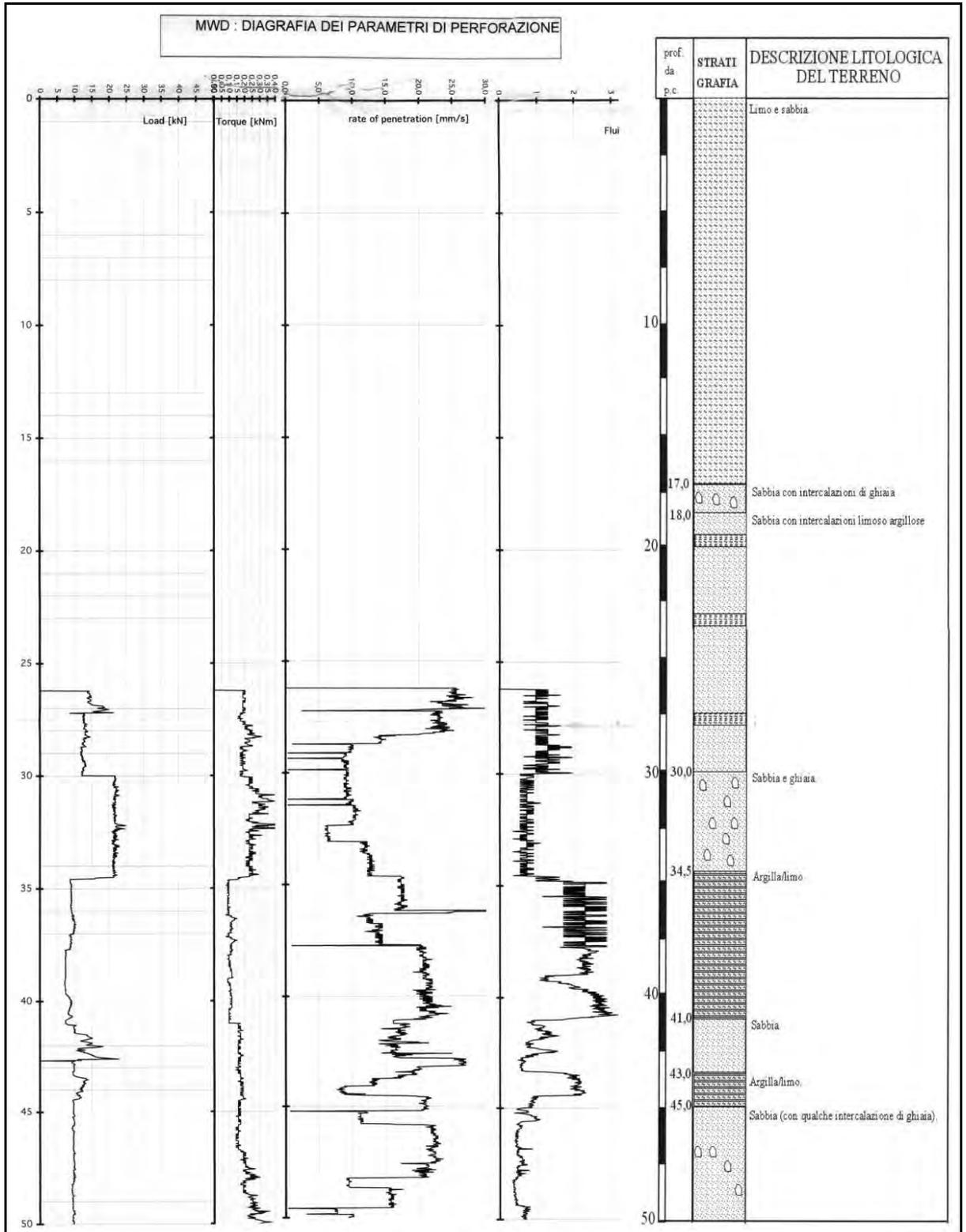


Figura 7-6:diagrafia MWD e stratigrafia profondità 50-100m

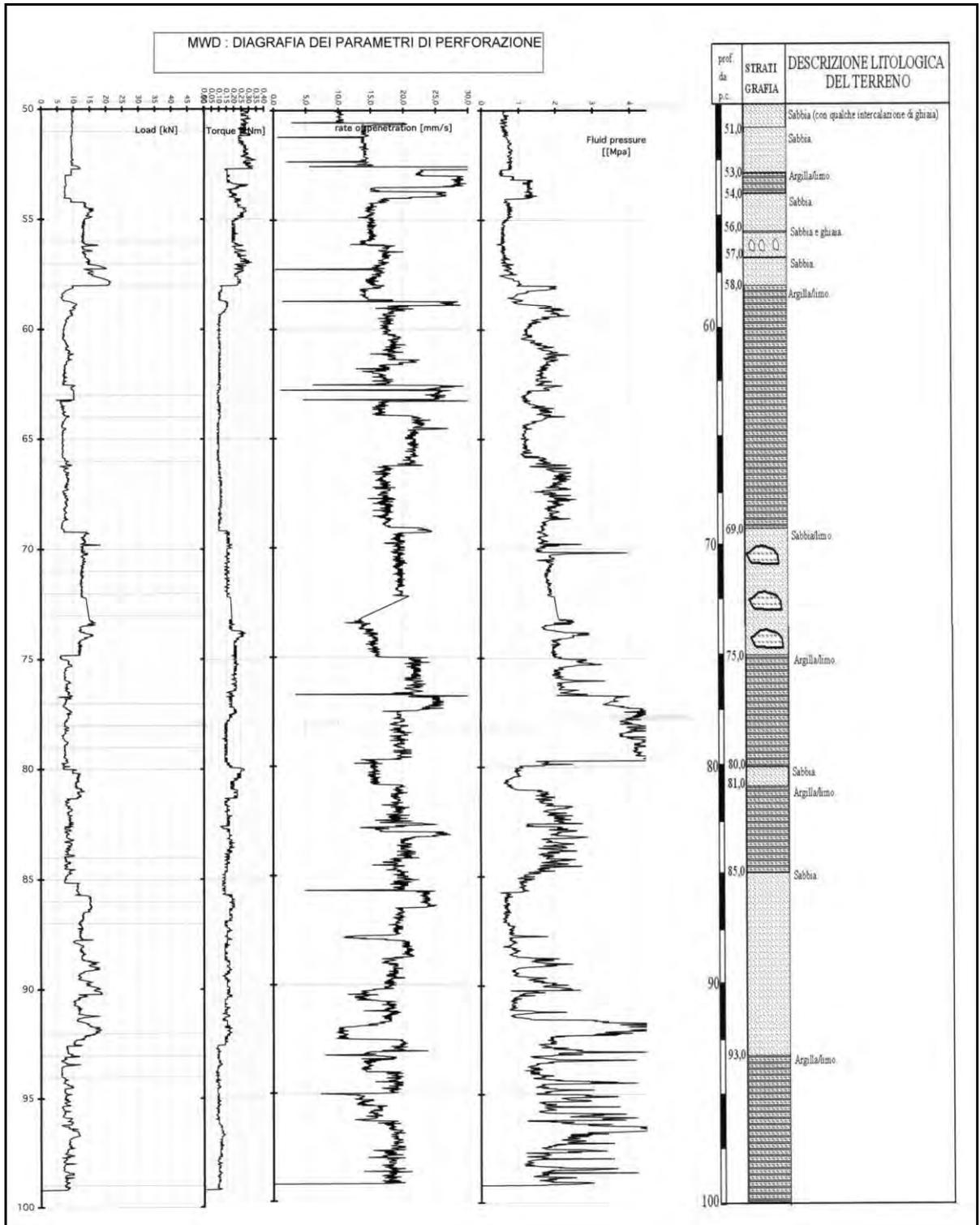


Figura 7-7: diagrafia MWD e stratigrafia profondità 100-150m

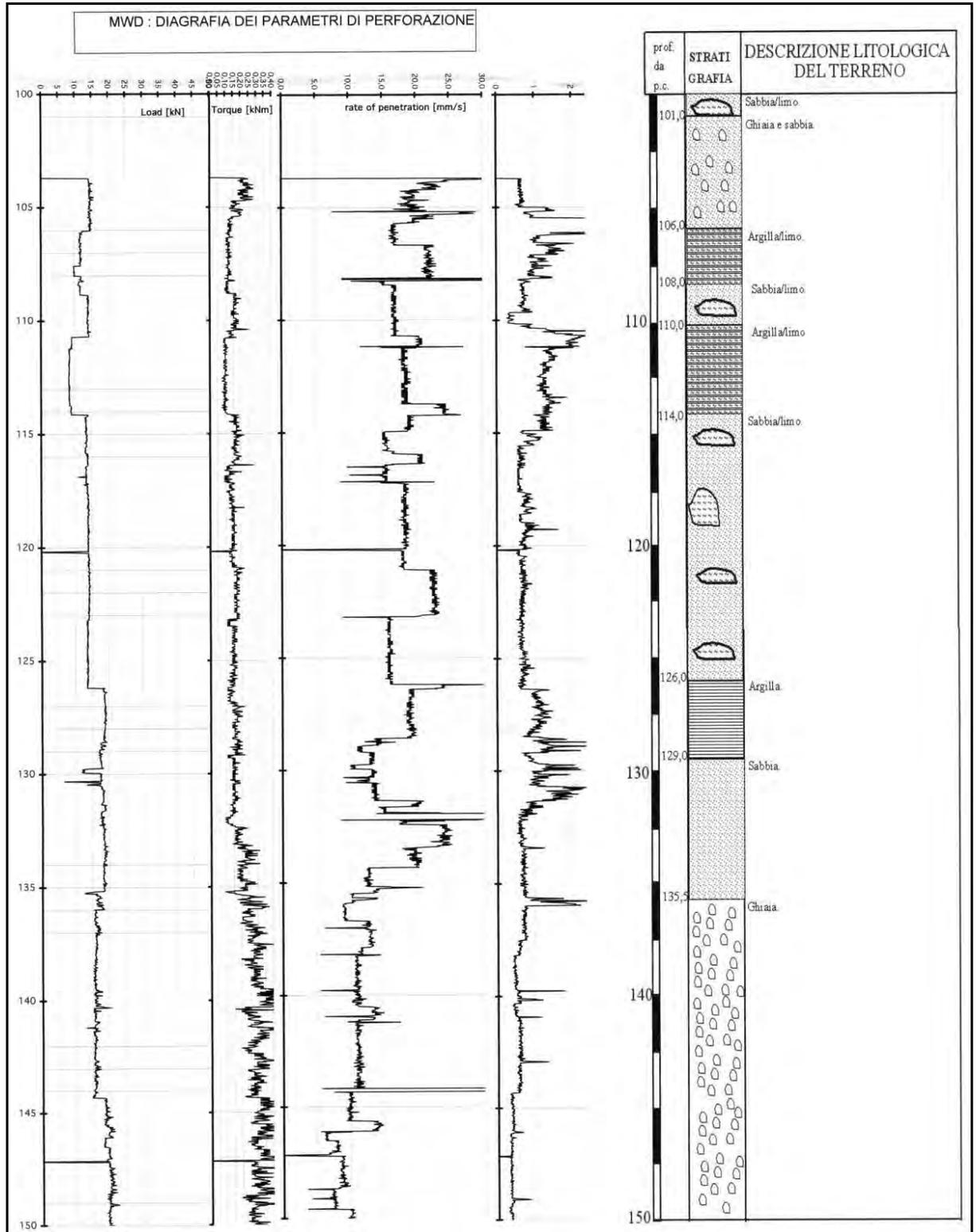
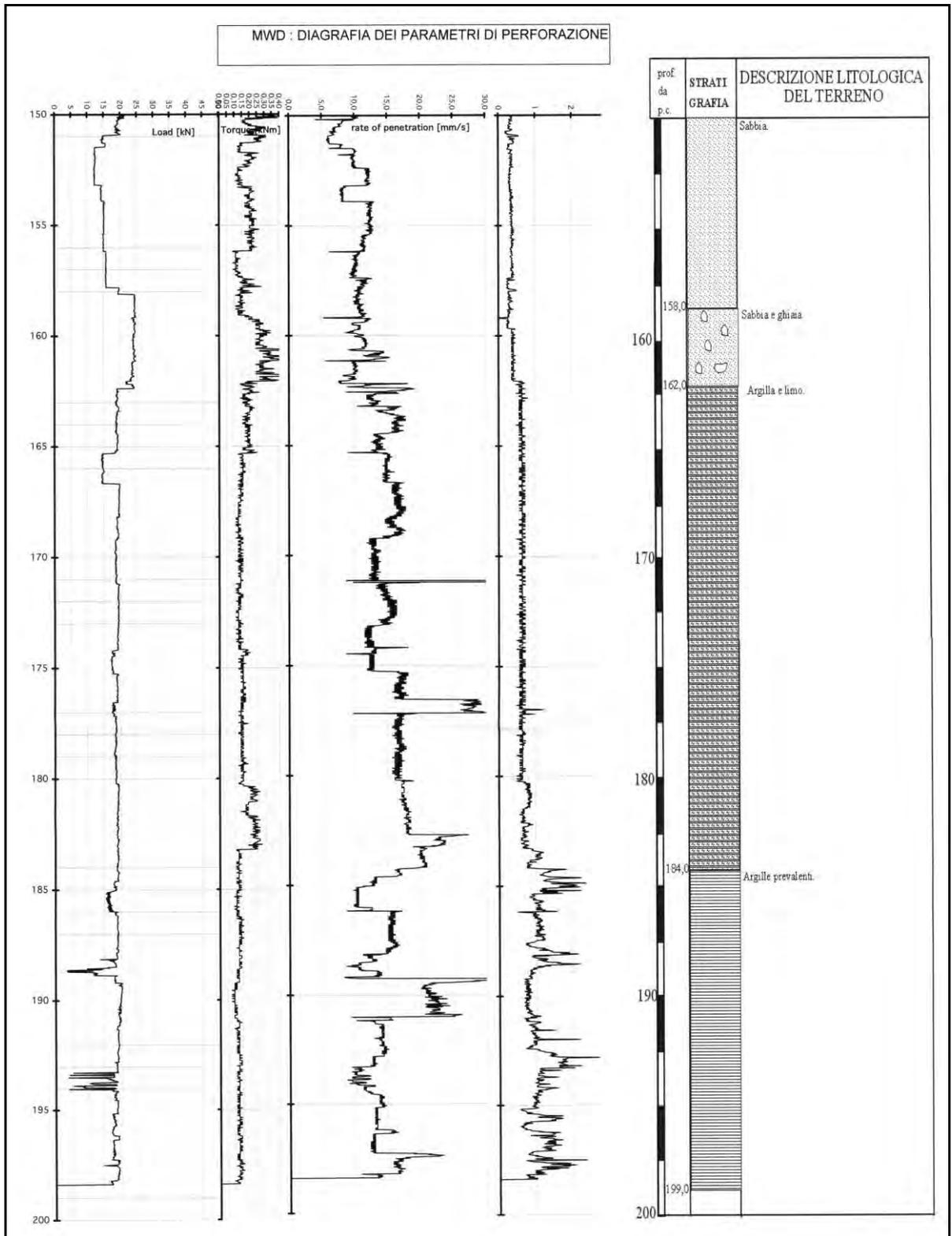


Figura 7-8:diagrafia MWD e stratigrafia profondità 150-200m



7.1.1.2 *Descrizione dell'assettimetro*

Lo strumento installato, per il monitoraggio della subsidenza, è un assettimetro con doppio tubo, centratori interni ed esterni e verticale di misura tesata mediante sistema a bilanciere (Figura 7-9, Figura 7-10).

Questo risulta costituito da:

- **Una tubazione esterna in PVC**, di protezione dell'asta di misura interna. Per mantenere la tubazione il più verticale possibile all'interno del foro, sono stati adottati dei centratori speciali ogni sei metri, per evitare che si disponesse in modo "casuale" all'interno del foro.
- **Una base di misura** costituita da aste in acciaio con centratori antifrizione ogni 1.5 metri. Gli ultimi 5 metri della verticale sono costituiti da aste in NIVAR, caratterizzate da un bassissimo coefficiente di dilatazione termica, in quanto il terreno ha un notevole effetto coibentante e già oltre i quattro metri non vi sono variazioni di temperatura correlabili con il gradiente termico dell'ambiente esterno.
- **Un sistema meccanico di tesatura dell'asta di misura**, formato da una struttura in acciaio zincato con fune in acciaio, pulegge di rinvio e contrappesi. La forza imposta dal sistema di tesatura ha direzione verticale verso l'alto e modulo poco inferiore al peso proprio della batterie d'aste. Questo significa che la zavorra che funge da contrappeso è stata dimensionata in funzione della lunghezza dell'asta di misura ed è stata realizzata in modo da potere incrementare i pesi fino al raggiungimento della forza necessaria. Il bilanciere è stato progettato in modo tale che la forza di tesatura applicata non ha componenti orizzontali significative.
- **Un ancoraggio profondo speciale.**
- **Un sistema di misura in testa** costituito da n°1 trasduttore induttivo senza contatto con fondo scala (F.S.) da 50 mm, dotato di sistema di regolazione della corsa. Si tratta di un tipo di trasduttore ampiamente utilizzato in sistemi analoghi che presenta le seguenti caratteristiche:
 - elevata stabilità di temperatura
 - elevata ripetitività della misura (<0,05% del F.S.)
 - elevata accuratezza (0,1% del F.S.)
 - costruzione robusta e grado di protezione IP 67.

Trattandosi di un trasduttore senza contatto presenta inoltre il vantaggio di una risposta pressoché immediata alle variazioni di distanza dal bersaglio. Questo ultimo è stato realizzato in acciaio zincato. Il trasduttore è tarato su un banco di taratura utilizzando comparatori ad alta precisione ed è stato fornito con proprio foglio di calibrazione. I parametri della curva così ottenuta vengono inseriti nell'unità di acquisizione dati; in questo modo la trasformazione tra unità elettriche e unità fisiche avviene operando sulla curva reale, riducendo al secondo ordine l'errore di linearità così trascurabile ai fini della misura. La taratura avviene utilizzando lo stesso bersaglio che poi è stato utilizzato nell'installazione.

La precisione globale della catena di misura (sensore + acquisizione dati) che si ottiene, è intorno a qualche centesimo di millimetro, con la riduzione del centesimo.

- **Un sensore di temperatura** da accoppiare alla meccanica della testa dell'assestometro per la compensazione della componente termica. La depurazione avviene al momento dell'elaborazione dei dati mediante appositi algoritmi.

I dati vengono acquisiti tramite una centralina automatica EOSLAB comprensiva di modem GSM alimentata a batterie, fornita di un software per la gestione del sistema (Figura 7-11). La registrazione dei dati avverrà fino ad aprile 2006. L'apparecchiatura è stata fornita dalla Società AGISCO s.r.l. di Liscate (MI).

Figura 7-9 Assestometro ubicato a -200 mt.



Figura 7-10 Bilanciere dell'assestimetro ubicato a -200 mt



Figura 7-11 Centralina di monitoraggio EOSLAB



7.2 I DATI DI SUBSIDENZA DISPONIBILI

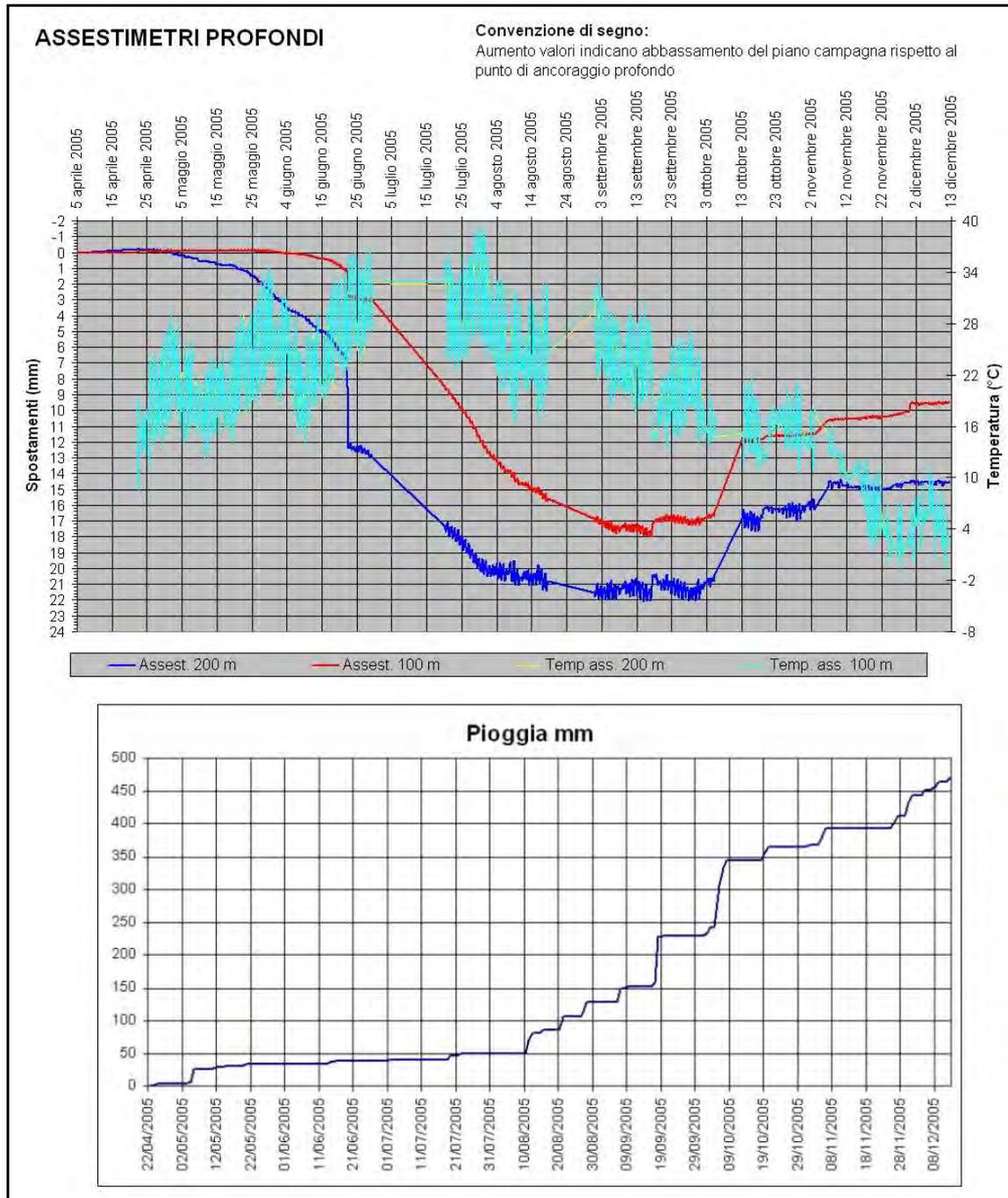
A seguito dell'installazione degli assestimetri che acquisiscono le differenze relative di quota ogni 2 ore si presentano ad oggi i risultati pervenuti.

I due assestimetri dopo un periodo estivo in forte abbassamento relativo, praticamente si possono considerare paralleli, all'inizio dell'autunno hanno incominciato a risalire mostrando anche bruschi salti di quota sia positivi che negativi.

Al momento la possibile spiegazione di questo fenomeno può essere relegata ad un periodo iniziale di assestamento e di possibile ripercussione sulle misure dei primi

decimetri di terreno argilloso sottoconsolidato che risente comunque dell'effetto delle precipitazioni. Sono infatti evidenti alcune correlazioni dell'andamento deidue assestimetri con le precipitazioni (Figura 7-12).

Figura 7-12: assestimetri profondi e precipitazioni



Queste considerazioni scaturiscono anche dagli esiti delle prime elaborazioni della livellazione a livello regionale che ARPA – Struttura di Ingegneria Ambientale sta

svolgendo nell'ambito del progetto "Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Stralcio di attività finalizzate alla misura di una rete di livellazione a supporto dell'analisi interferometrica". I dati preliminari indicano che l'area di Castel Maggiore, al pari di altre aree storicamente critiche del bolognese, sia ancora interessata, nel periodo 1999-2005, da un tasso di subsidenza ben lontano a quello ascrivibile ad un fenomeno di tipo naturale. Viene tuttavia confermata per tale area e, più in generale per l'intero territorio bolognese, la tendenza alla progressiva diminuzione degli abbassamenti, già osservata con le precedenti campagne di misura. Al momento non è possibile fornire informazioni più dettagliate essendo ancora in corso operazioni di verifica per la validazione finale delle misure realizzate nel periodo giugno-settembre 2005

8. Strumento informatico di supporto alle concessioni (Attività B)

Il problema fondamentale che pone la subsidenza, quello cioè di poter indicare un valore di soglia a fronte del quale lo sfruttamento della risorsa è accettabile o non accettabile, attiene alla categoria dei problemi di tipo non strutturato che vengono in genere affrontati attraverso i metodi di tipo decisionale.

Si tratta di un argomento vasto e complesso, che ha in qualche modo sostituito ed ampliato la ricerca operativa nata negli anni '30 e '40 e poi sviluppatasi negli altri trenta o quaranta anni successivi. Non è qui il caso di poter presumere di affrontare l'argomento in modo compiuto; è tuttavia necessario porre alcuni assunti fondamentali per circoscrivere quanto delle teorie decisionali possono essere utili in questa specifica circostanza e per caratterizzare il problema subsidenza in termini corrispondenti, e quindi praticabili.

Va notato innanzitutto che il termine subsidenza sottintende un insieme di cause ed effetti che è, per propria natura, alquanto difficile ridurre ad una proposizione semplice e diretta: non è un caso che la “*semplice*” riproduzione della fenomenologia fisica sia possibile solo a prezzo di sofisticati sistemi di calcolo e quantità assai notevoli e di dati e di conoscenze.

Detto questo, vi è poi da stabilire un sistema di corrispondenze tra la subsidenza in sé, come causa (a sua volta dipendente da un insieme di altre cause e concause), ed i suoi effetti, ciascuno dei quali teoricamente necessita di un proprio ambito di valutazione di misura. Questa complessità concettuale trova riscontro nel fatto che si tende a valutare il fenomeno in termini genericamente negativi (ciò che è vero), ma in assenza di più specifiche valutazioni di tipo quantitativo. Si possono citare i casi più noti e conclamati di effetti territoriali e ambientali negativi legati alla subsidenza:

- i più noti ed evidenti sono quelli tipici dei territori costieri: Venezia, Ravenna, Cervia e Cesenatico ne sono la prova evidente. In questo caso l'evidenza è percepibile direttamente, ma tuttavia manca un sistema di valutazione (si intende un sistema di numeri che quantificano le relazioni) tra l'intensità del fenomeno ed i suoi effetti nel contesto costiero;
- altri, meno noti al pubblico, ma ben noti agli specialisti di settore, sono quelli che si riversano sui sistemi di drenaggio e che, nel tempo, hanno reso meno efficienti le bonifiche della pianura emiliano-romagnola: anche in questo caso, sono genericamente noti gli effetti negativi, tuttavia manca un inquadramento del problema espresso almeno nei termini di un sistema di valori-limite, tali da indicare quanto dell'abbassamento sia accettabile (e a che prezzo di efficienza idraulica) e quanto non lo sia;
- altri ancora sono più dettagliati e sono noti non tanto per la causa subsidenza in sé, quanto perché gli effetti si riversano sul patrimonio storico monumentale, con un effetto di coinvolgimento dell'attenzione molto maggiore. Questi sono i ben noti casi dei centri storici di Bologna e di Modena. Nuovamente, tuttavia, una valutazione delle condizioni al limite non esiste.

In tutti questi casi, come pure in altri in cui la subsidenza può essere veicolo di interferenza con le risorse ambientali, territoriali e monumentali, si dovrebbe poter formalizzare costruzioni del tipo:

1. quale è la relazione di causa ed effetto tra subsidenza e rischio idraulico in un territorio costiero? Oppure: quale è tale relazione nei confronti dell'efficienza idraulica del sistema di drenaggio di un comprensorio pianeggiante? Oppure, quale è tale relazione in termini di stabilità di un manufatto?
2. Se i quesiti precedenti sono affrontabili in termini relativamente semplici, diventa invece molto più complicato porre il problema in termini di valore al limite, che è invece la questione fondamentale che si pone in moltissimi problemi di tipo decisionale. La domanda diviene invece: quale è il limite accettabile (nel caso specifico si tratta di una variazione del livello del suolo) di subsidenza per il rischio idraulico? Quale, per i monumenti? Quale, se si tratta di più necessità concomitanti?

Se il problema viene posto in termini di valore limite, la soluzione è molto più sfuggente, tanto più se il limite da considerare deve tenere conto di più di un traguardo. Si noti che questa è una condizione tipica delle valutazioni di impatto ambientale e delle valutazioni di sostenibilità ambientale.

Entro certi limiti, la tecnologia fornisce una risposta a problemi non strutturati (cioè non programmabili) di questo tipo e gli strumenti di modellistica implementati e descritti in questo rapporto (modello di flusso e modello di subsidenza) ne costituiscono il basamento fondamentale, anche se non risolutivo. Bisogna infatti distinguere:

- il supporto informatico, costituito dall'insieme delle basi di dati e di modelli che affrontano nel dettaglio le fenomenologie di interesse e che rappresentano la parte strutturata del problema;
- il supporto decisionale, costituito dall'insieme degli algoritmi e delle informazioni il cui obiettivo è quello di avvicinare il valore soglia (in questo caso, in altri casi il problema può essere posto in modo diverso) sulla base del quale viene applicata la decisione.

Per quello che riguarda il primo aspetto, va detto che le attività sviluppate nel corso del presente studio, raggiungendo tutti gli obiettivi prefigurati, tale supporto informatico è stato realizzato ed è operativo; è invece ancora da costituire il sistema di supporto decisionale che, basandosi sul sistema dati-modelli informatizzato, consente di modulare il passaggio verso la seconda condizione.

Si può schematizzare questa situazione anche in un altro modo, associando:

- questo sistema di supporto informatico alla fase della pianificazione delle risorse (può trovare il suo corrispettivo in una VAS/VALSAT);
- un eventuale sistema di supporto decisionale, nel senso stretto del termine, alla fase del rilascio di una concessione allo sfruttamento dell'acqua sotterranea (che può corrispondere ad una VIA).

Nel primo caso, infatti, si valuta una situazione di scenario, come quello presentato di seguito in questo rapporto a titolo di esempio (riduzione del 35 % dei prelievi da falda a partire dal 1992); nel secondo, invece, si valuta in dettaglio l'effetto di un progetto vero e proprio, come è in una VIA.

La tecnica di valutazione mediante scenario è utile fino al punto in cui la decisione può essere associata ad una stima degli effetti in termini relativi: se la valutazione di scenario (la riduzione dei prelievi nel 1992, nell'esempio) produce una riduzione consistente della subsidenza in termini relativi, allora, quello scenario è politicamente perseguibile e quindi rappresenta un target da conseguire. Per affinare la percezione, è consuetudine generare più di uno scenario e, sempre attraverso il confronto relativo, formare una parere di merito. In tal caso, questo parere corrisponde alla decisione che viene presa sulla materia.

Nel caso di un progetto invece è preferibile avere la possibilità di potersi confrontare con un valore limite: sono ben noti i casi delle emissioni in atmosfera, ad esempio, per le quali esistono specifici riferimenti in termini di valori di soglia. L'uso di un valore limite rende più semplice l'applicazione della decisione al livello dell'applicazione della decisione, che è in genere quella di un ufficio di tipo tecnico-amministrativo. Se, nel caso della subsidenza fosse disponibile un limite del genere, allora l'applicazione della decisione potrebbe diventare di ordinaria amministrazione.

Come anticipato, tuttavia, è proprio la definizione del valore limite il nucleo del problema decisionale e per poterne circoscrivere le connotazioni sotto tutti i principali profili fenomenologici di interesse occorre quindi:

- a livello di pianificazione, disporre di un supporto di tipo puramente informatico, che corrisponde in questo caso ad un sistema di dati e di modelli numerici, può fornire il necessario supporto per la definizione delle politiche che, in via di linea generale, possono essere applicate. Gli scenari che possono essere realizzati corrispondono, in linea di massima a:
 - diverse geometrie del prelievo (i pozzi sono stati realizzati effettivamente nelle località migliori per minimizzarne gli effetti negativi?);
 - diverse distribuzioni del prelievo nel tempo (il prelievo può essere modulato meglio, in funzione di certe ciclicità degli acquiferi?);
 - accentuazione della ricarica naturale delle falde mediante la realizzazione di aree di raccolta e diffusione dell'acqua (banalmente, immagazzinare e disperdere verticalmente l'acqua nei periodi di morbida);
- a livello di progettazione, invece, deve essere definito un sistema di valori di criticità, opportunamente modulato nello spazio, tale da costituire il riferimento decisionale applicabile in sede amministrativa. Questo secondo aspetto va sviluppato in modo opportuno.

8.1 SIMULAZIONI

Nel quadro di un'attività di pianificazione, come sopra delineato, la costruzione di uno scenario di simulazione avviene in due fasi:

1. nella prima si definiscono le condizioni di flusso di interesse sotto forma di variazioni dell'acqua estratta da pozzo, in più o in meno rispetto alla situazione di partenza, e si ricalcola la distribuzione delle pressioni che ne segue;
2. nella seconda si parte dalla distribuzione delle pressioni così calcolata e se ne ottengono le deformazioni.

Il primo passaggio è per certi versi il più critico, data la forte dipendenza del problema dalla distribuzione della pressione dell'acqua, come già accennato in precedenza e tale criticità è tanto maggiore quanto più ampi sono i limiti con cui la simulazione può essere realizzata. In questo caso essi derivano a loro volta da alcune dipendenze che sono:

- il termine che si riferisce alla ricarica fluvio/zenitale: se le simulazioni vengono riferite ad un intervallo di tempo (nel futuro o nel passato) per il quale il termine climatico non è conosciuto, si deve considerare che questa mancanza di conoscenze si riflette sulla qualità della simulazione. Se, dovendo simulare uno scenario proiettato nel futuro un buon modello meteoroclimatico può ovviare a questo problema, ma deve poi essere a sua volta collegato ad un modello adeguato per l'idrologia fluviale;
- il termine che si riferisce alle condizioni di carico idraulico imposto (condizione di Neumann). Nel caso in esame, quest'ultimo termine è rilevante, perché impegna tre dei quattro lati del volume di roccia su cui è stato complessivamente basato il modello. Questa condizione viene assegnata sulla base delle osservazioni sperimentali delle quote d'acqua in falda, opportunamente regionalizzate per aver un valore stimato su ciascun nodo dei bordi. Al modello vengono fornite queste condizioni per ciascuno degli istanti di tempo per cui sono disponibili/utili le informazioni sperimentali e ne segue che lo stesso tipo di informazione dovrebbe essere fornito contestualmente all'imposizione di un nuovo assetto dei prelievi.

In pratica, il meccanismo di calcolo è il seguente: il sistema viene organizzato sulla base delle condizioni imposte, sia al bordo sia in termini di ingressi/uscite, poi attraverso il calcolo viene elaborata la distribuzione del carico idraulico nello spazio e nel tempo. L'evoluzione nel tempo dipende dall'evoluzione del sistema ingressi/uscite e da quanto questo a sua volta evolve; in linea di principio, si ammette che se tale evoluzione porta a configurazioni diverse da quelle iniziali, allora anche le condizioni al bordo devono essere riassegnate per poter garantire la congruità dell'intero sistema di dati.

Quando si simula uno scenario di tipo ipotetico, è ovvio trovarsi invece in condizioni non congruenti, dato che è possibile ipotizzare il dato di scenario (in questo caso la variazione dei prelievi), ma non la corrispondente condizione al bordo, dato che diviene essa stessa uno dei termini del problema da risolvere. Tanto più lo scenario da simulare diverge da quello di partenza, tanto più la condizione al bordo utilizzata (legata ad un assetto fisico osservato) non rappresenta adeguatamente la soluzione del problema.

Per ovviare a questa difficoltà si fa ricorso ad una condizione al bordo più flessibile di quella "rigida" di Neumann, cosiddetta *flessibile* (condizione di Cauchy), che consente di deviare, entro certi limiti, dal carico imposto utilizzando una sorta di valore al bordo della permeabilità (la *conduttanza*). L'obiettivo è quello di raggiungere un diverso assetto sul bordo attraverso una approssimazione che deriva in parte dall'evoluzione del sistema nel suo complesso, e in parte dal tentativo di fornire al bordo una condizione meno rigida. La bontà del risultato dipende comunque da quanto la soluzione attesa diverge da quella possibile nelle condizioni assegnate.

È da notare, avendo già chiaro fin dall'inizio questo tipo di problema, che l'intero modello è stato organizzato con una condizione di tipo flessibile, ma che la capacità di Modflow di sfruttare questa condizione è più limitata di quanto non sarebbe lecito

attendarsi; infatti, un maggiore grado di libertà del sistema di calcolo si traduce in genere in una maggiore tendenza all'instabilità numerica.

Tornando quindi allo scenario sviluppato per il Reno, la simulazione qui presentata prevede fondamentalmente:

- riduzione dei prelievi da falda per una quota pari al 35 % a partire dal 1992. Utilizzando una riduzione percentuale, sono fatte salve le variazioni di carattere stagionale;
- nessuna variazione degli ingressi da pioggia e fiume;
- nessuna variazione delle condizioni idrauliche al bordo, che quindi vengono mantenute coerenti con l'assetto osservato nel periodo 1992-1998, salvo la possibilità di oscillare entro i limiti della conduttanza.

Sul versante della stima della subsidenza, invece, non devono essere previste condizioni particolari, dato che l'assetto del mezzo poroso (permeabilità e coefficiente di consolidazione) è considerato costante.

I risultati sono costituiti dall'evoluzione della pressione nel tempo a partire dall'istante in cui è stata applicata la variazione di prelievo, che è il 1992, e dalla evoluzione della subsidenza corrispondente e sono riportati nella Figura 8-1. Il "guadagno" (Figura 8-2) è riprodotto in modo fisicamente sensibile ed ovviamente è concentrato nelle aree a subsidenza maggiore (non nelle aree con i minimi di pressione).

Figura 8-1: abbassamenti calcolati nel periodo 1983-1999 nella simulazione di scenario (cm)

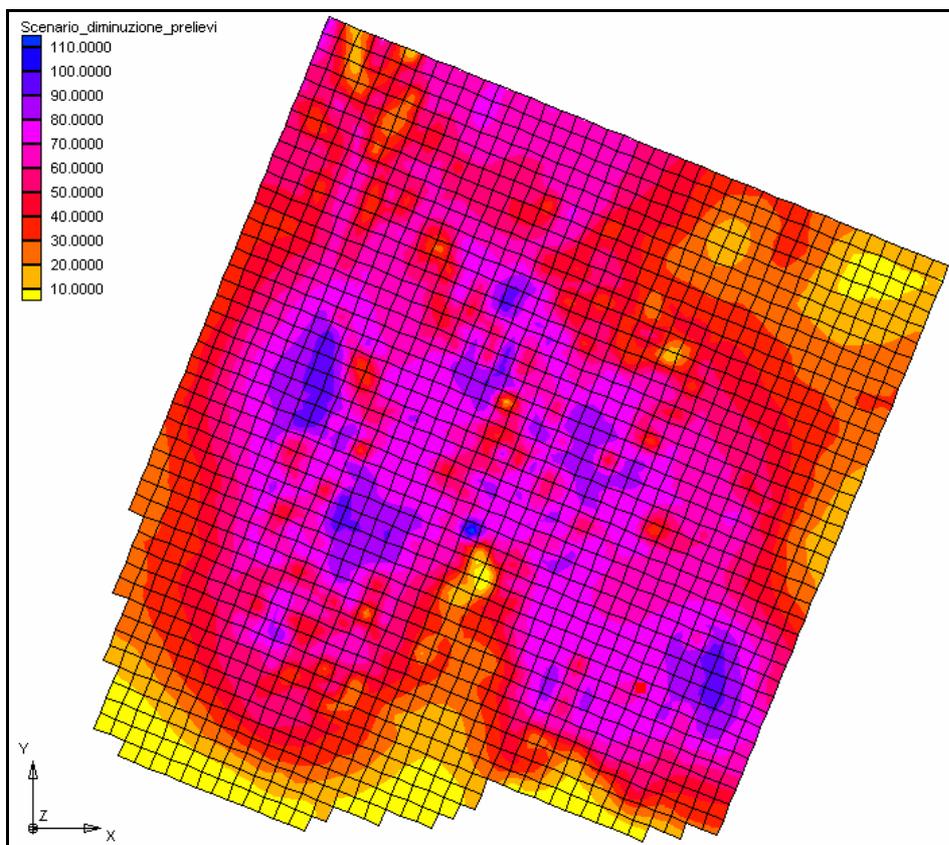
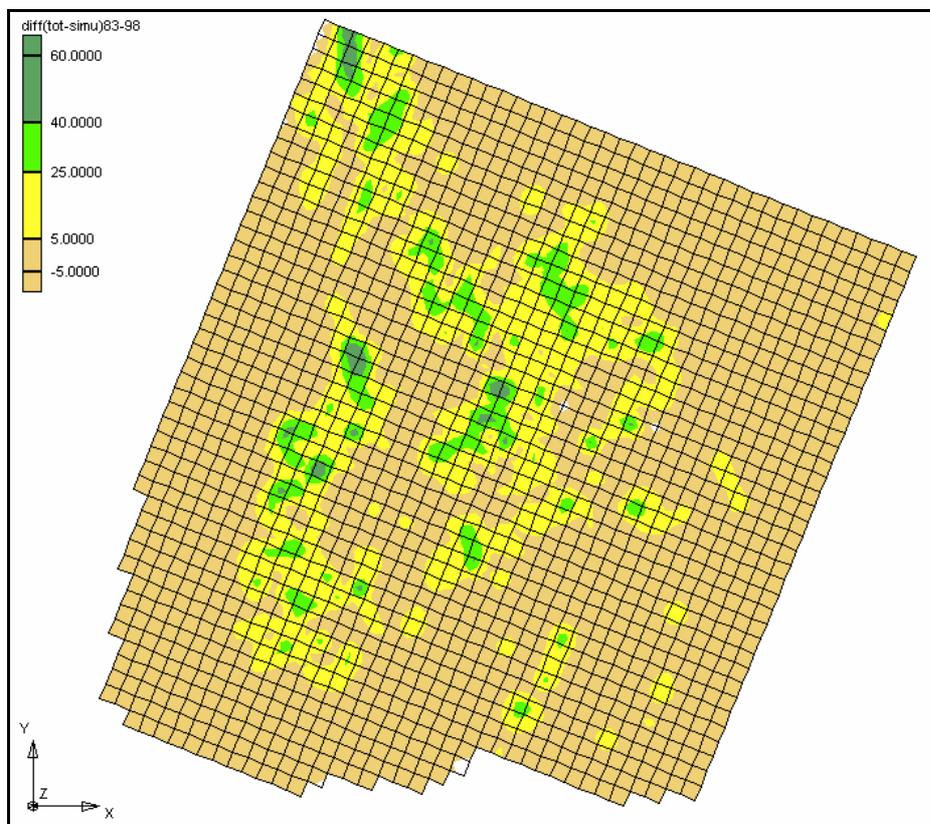


Figura 8-2: differenza degli abbassamenti calcolati nel periodo 1983-1999 con la simulazione di scenario (cm)



9. Convegni, seminari e pubblicazioni (Attività D)

Le numerose attività previste nello studio della conoide alluvionale del Fiume Reno hanno previsto di fatto numerosi incontri informali tra i diversi partecipanti: riunioni necessarie a condividere alcuni passaggi critici nell'impostazione del lavoro e nella valutazione preliminare dei risultati.

Nel corso dello svolgimento dello studio sono comunque stati effettuati due incontri seminariali come previsto dalla convenzione, il primo a dicembre 2003 dove è stato presentato il modello geomorfologico e geologico della conoide del Reno da parte del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, il secondo nel giugno 2005 dove sono stati analizzati i risultati preliminari del modello di flusso e i primi dati degli assestimetri.

E' previsto un seminario finale di cui sono già pronti i materiali ampiamente estratti da questa relazione, per la cui data si rimane a disposizione della Direzione di progetto che presumibilmente prevederà comunque di farlo entro la prossima primavera prevedendo anche in quella sede la distribuzione di una pubblicazione che contiene la raccolta dei contributi pervenuti dai diversi soggetti pubblici che hanno partecipato al Progetto stesso.

10. Considerazioni conclusive

Al termine dello studio, è possibile trarre alcune conclusioni, i cui contenuti sono peraltro già stati resi evidenti nella stesura del rapporto che precede.

La più consistente, ma anche la più ovvia e consueta come sempre al termine di esperienze del genere, è che attraverso le cognizioni acquisite sarebbe possibile ripetere immediatamente l'esperienza stessa con la convinzione di riuscire a maneggiare molto meglio l'intero problema.

Dato che questo non è possibile, bisogna tentare di sintetizzare i pro ed i contro, in modo da orientare per il futuro sia le applicazioni pratiche, sia lo sviluppo di altre ricerche sul medesimo tema.

Limiti delle informazioni

Nel corso degli ultimi venti o trent'anni il patrimonio di conoscenze che è stato possibile mettere assieme in materia di idrogeologia è certamente notevole; tra queste conoscenze è più carente il quadro delle informazioni di base, con particolare riferimento alle quote d'acqua in falda, al controllo dei prelievi, alla dinamica tra falda e fiume. Si tratta d'altro canto di valutazioni di tipo relativo, che dipendono dall'esigenza di alimentare di dati un sistema di calcolo di notevoli dimensioni, che inevitabilmente genera una richiesta di dati di base dello stesso livello.

Sul versante della subsidenza, invece, il quadro è molto diverso, perché in questo caso le informazioni sono effettivamente scarse; questo dipende in parte dalla quantità minore di indagini sull'argomento specifico, ma anche e forse soprattutto dal costo enormemente maggiore: se rilevare la quota d'acqua in pozzo è attività relativamente semplice, riuscire a definire il comportamento meccanico di un terreno passa attraverso l'esecuzione di un sondaggio e le analisi di laboratorio, con un insieme di costi largamente maggiore.

Senza ripetere le considerazioni di dettaglio già riportate più sopra, va comunque ricordato che molta dell'incertezza di cui soffre la calibrazione del modello di subsidenza dipende proprio da quest'ultimo aspetto.

Limiti metodologici

Nel quadro delle limitazioni e delle incertezze, quelli metodologici sono forse i limiti di peso minore: l'aver trascurato le tensioni sul piano orizzontale e la consolidazione secondaria appaiono fattori del tutto minori rispetto a quelli qui riportati. D'altro canto, con un quadro di dati di base così ristretto, la possibilità di considerare anche questi aspetti sembra del tutto fuori questione, se non per puro esercizio.

Tra i limiti di carattere metodologico, non è possibile dimenticare gli aspetti di tipo strettamente computazionale, e in particolare l'applicazione dello schema alle differenze finite con Modflow come software applicativo.

Al di là della ben nota instabilità del programma, la presenza in piena conoide di un vasto volume di mezzo poroso non saturo ha costretto a realizzare l'applicazione con una serie di forzature che, soprattutto nelle simulazioni, ha mostrato tutti i suoi limiti.

Limiti applicativi (taratura)

I limiti delle conoscenze sono anche i limiti della taratura; il problema vero è che non solo sono scarsi i dati veri e proprio (i.e., le determinazioni di laboratorio), ma sono quasi assenti dati o informazioni anche di tipo indiretto in grado di circoscrivere il campo delle soluzioni accettabili. Questo aspetto è particolarmente importante nella ripartizione della deformazione secondo la verticale.

Non è un caso, quindi, l'aver presentato i risultati di più di una configurazione della compressibilità, dato che essa risente delle modalità con cui si è tentato di rappresentare una variabilità naturale di per sé sconosciuta.

Si noti anche, a questo proposito, che i pochi dati di laboratorio disponibili sono:

- concentrati (ovviamente) solo sulle parti più fini dell'intero complesso idrogeologico;
- apparentemente non correlati con la litologia.

Questo secondo aspetto è particolarmente significativo, perché toglie la possibilità di approcciare il problema con una taratura del tipo "facile", cioè attraverso l'attribuzione della compressibilità su base analogica con il tipo litologico prevalente.

Aspetti positivi

Gli aspetti positivi che derivano dallo studio non sono trascurabili. In linea di principio si è potuto mostrare la correttezza delle ipotesi di lavoro assunte a base dello studio, con particolare riferimento:

- alla necessità di sviluppare il modello con uno schema tridimensionale;
- alla necessità di applicare a questo schema la variabilità massima possibile (modello disomogeneo) dei coefficienti di controllo (permeabilità ecc.);
- alla necessità di svolgere le simulazioni in regime di non equilibrio.

L'applicazione di questi criteri ha certamente favorito la qualità dei risultati raggiunti, soprattutto la qualità della taratura del modello di flusso.

Considerazioni pratiche

E' possibile utilizzare il modello per costruire e simulare scenari riferiti alla pianificazione delle risorse idriche per ottenerne anche la risposta presumibile in termini di subsidenza. Ovvio che, trattandosi di approssimazioni ed essendo ben presenti i limiti descritti più sopra, si tratta di applicazioni da condursi con la necessaria attenzione e giusto grado di conservatività.

Operativamente, dovrebbe fin d'ora essere possibile sviluppare scenari per la descrizione degli effetti, ad esempio, di una fase di ricarica (naturale o artificiale che sia) delle falde. Infatti, si può distinguere il contributo (sempre sulla base delle assunzioni già ripetutamente descritte) dei complessi acquiferi più superficiali da quelli più profondi.

Su questo, nell'ambito del gruppo di lavoro, sono già stati avanzati quesiti in ordine alle possibili risposte del sistema alle variazioni di assetto; il quesito più interessante riguarda ovviamente la stima dell'evoluzione della subsidenza dal momento in cui avviene una diminuzione del prelievo.

La risposta deve tenere conto che la fenomenologia avviene sempre su due piani non necessariamente concomitanti tra loro nel tempo. Infatti, un arresto (o diminuzione che sia) del prelievo produce una ripressurizzazione dell'orizzonte acquifero; se l'acquifero è confinato completamente, la variazione di pressione locale incide poco sul bilancio generale, ma se si tratta di un sistema che viene alimentato anche attraverso la ricarica

esterna (es. i campi acquedottistici di Bologna), allora il minor prelievo produce immediatamente un incremento della quota d'acqua negli strati superficiali, consentendo al limite anche di riallagare gli strati superficiali già drenati. Questa variazione, a sua volta, coincide con un maggior peso della massa d'acqua immagazzinata, peso che deve essere sopportato dall'acquifero che non si è ancora ripressurizzato adeguatamente.

Sintetizzando, è possibile che la variazione di prelievo debba essere studiata con una certa attenzione, dato che è necessario distinguere questo duplice comportamento: da ciò deriva poi che un arresto dei prelievi possa essere seguito, in molte località, anche da un leggero incremento della subsidenza dipendente dal riaccumulo di riserve nelle parti più alte del sistema idrogeologico.

11. Bibliografia

- Amorosi A., Farina M., Severi P., Preti D., Caporale L. & Di Dio G.**, (1996). *Genetically related alluvial deposits across active fault zones: an example of alluvial fan-terrace correlation from the upper Quaternary of the southern Po Basin, Italy*. *Sedimentary Geology*, 102, 275-295.
- Bear J.**, (1972). *Hydraulics of Groundwater*. Mc Graw Hill Ed., N.Y., pp. 555.
- Bissoli R., Chahoud A., Martinelli G.**, (2000). *Progetto "monitoraggio acque": il programma Sina*; ARPA Rivista N.5 Settembre – Ottobre 2000.
- Bowles J. E.**, (1991). *Fondazioni*. Mc Graw Hill Italia, Milano, 1991, pp. 1126.
- Carle S. F.** (1999). *T-PROGS: Transition Probability Geostatistical Software version 2.1*, University of California, Davis.
- Carlin F., Magri G., Cervellati A., Gonfiantini R.**, (1975). *Use of environmental isotopes to investigate the interactions between the Reno river and groundwater (northern Italy)*. In: *Isotope ratios as pollutant source and behaviour indicators*. I.A.E.A-S.M-191/6, Vienna, 179-194.
- Castany G.** (1985) *Idrogeologia – Principi e Metodi*. Dario Flaccovio Editore, Palermo, 243pp.
- Comune di Bologna, Regione Emilia-Romagna, Idroser S.p.A.**, (1989). *Studio sul fenomeno della subsidenza nel territorio bolognese*.
- Francavilla F., Colombetti A.**, (1980). *Lineamenti idrogeologici della pianura della provincia di Bologna*.
- Francavilla F., D’Onofrio S., Toni G.**, (1980). *Caratteri idrogeologici, strutturali e paleoecologico-stratigrafici del conoide del fiume Reno (Bologna)*.
- 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.
- Hoffmann J., Leake S.A., Galloway D.L. & Wilson A. M.**, (2003). *MODFLOW-2000 Ground-Water Model - User Guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction (SUB) Package*. U.S. Geological Survey Ground-Water Resources Program, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Tucson, Arizona., Open-File Report 03—233
- Lancellotta R.**, (1997). *Geotecnica*. Zanichelli, Bologna, 1997, pp. 555.
- Mc Donald 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.
- Pignone R., Berrè F., Bianchi P., Carnevali G., Centineo M. C., Di Dio G., Draghetti T., Frassinetti G., Giapponesi A., Guermandi M., Laruccia N., Piazza P., Sarno G., Severi P.**, (2002). *Nuova Carta Regionale della Vulnerabilità: Aspetti Metodologici*. *Direzione Ambiente e Difesa del Suolo e della Costa della Regione Emilia-Romagna*, determinazione n. 6636 del 6/7/2001. Rapporto interno, pp. 38.
- Regione Emilia-Romagna & ARPA - Ingegneria Ambientale**, (1997). *Elaborazione delle serie storiche dei dati relativi alle caratteristiche quali-quantitative dell’acquifero sotterraneo*.

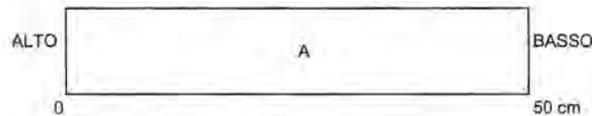
- Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP**, (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. Di Dio, Selca Firenze.
- Regione Emilia-Romagna & Idroser S.p.A.**, (1978). *Progetto di piano per la salvaguardia e l'utilizzo ottimale delle risorse idriche in Emilia-Romagna*.
- Regione Emilia-Romagna, Arpa-IA** (2003), *Bilanci idrici: aggiornamento dello stato attuale, scenari evolutivi e di azioni e misure di razionalizzazione, risparmio e riutilizzo*, Elaborato di supporto alla Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia Romagna.
- Regione Emilia-Romagna, Arpa-IA**, (2003). *Creazione di una banca dati informatizzata per la parametrizzazione idrodinamica degli acquiferi*, Completamento del Quadro Conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna - Attività C.
- Regione Emilia-Romagna, Arpa-IA**, (2003). *Individuazione e disciplina delle aree di salvaguardia delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano*, Completamento del Quadro Conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna - Attività G
- Regione Emilia-Romagna, Arpa-IA**, (2003). *Le acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna: modello concettuale*, Completamento del Quadro Conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna - Attività B.
- Regione Emilia-Romagna, Arpa-IA**, (2003). *Modello matematico di simulazione delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Emiro3D)*, Elaborato di supporto alla Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia Romagna.
- Regione Emilia-Romagna, Banca dati geognostica della Regione Emilia –Romagna**, ([bd2ggno.htm](#))
- Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP**, (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*, a cura di G.Di Dio, Firenze, 120pp.
- Rielke H.H. & Chilingarian G.V.**, (1974). *Compaction of argillaceous sediments*. Elsevier Sc. Pub. Comp., Amsterdam, 1974, pp. 474.
- Verruijt A.**, (2001, 2004). *Soil Mechanics*, Delft University of Technology
- Viel G.**, (1998). *Acque sotterranee....terra, e,.....quant'altro*. In: Ricerche e studi sul sistema urbano bolognese, *Metronomie* n°12.
- Voss C. I.**, (1984). *SUTRA: A Finite Element Simulation Model for Saturated-Unsaturated, Fluid Density-Dependent Groundwater Flow with Energy Transport and Chemically-Reactive Single-Species Solute Transport*. U.S.G.S., Report n.84-4369, 1984, 409 pp.

12. Allegati: analisi geotecniche campioni sondaggio

SCHEDA APERTURA CAMPIONE
 Norma ASTM D 2488 - AGI 1977

COMMITTENTE: ARPA-RER
 CANTIERE: Castelmaggiore
 SONDAGGIO: S1bis
 CAMPIONE: A
 PROFONDOTA': 26-26,5 m

TIPO DI CONTENITORE: fustella sacchetto cassetta



		PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE										
Livello	descrizione	P.P. kg/cmq	V.T. kg/cmq	Y	W	G.S.	LA	Ed	PT	TR	C	SPT
A	argilla limosa	1,15	0,45	x	x	x		x				

QUALITA' DEL CAMPIONE: scadente discreta buona eccellente

- legenda:
- P.P.: Pocket penetrometrico (kg/cmq)
 - V.T.: Vane test (kg/cmq)
 - Y: Peso di Volume (gr/cmq)
 - W: Contenuto d'acqua (%)
 - G: Granulometria
 - G.S.: Peso specifico
 - K: Permeabilità
 - C: Compressione ELL
 - LA: Limiti di Atterberg
 - Ed: Edometria
 - PT: Prova di taglio
 - TR: Triassiale
 - SPT: Standard Penetration Test

redatto:

controllato:

Certificato N°:	482
data di emissione:	24/06/05

Umidità naturale - Peso di volume

norma CNR - UNI 10014

Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1-1bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	A
Profondità (da p.c.):	26,0-26,5 m		

N° contenitore	b	
T tara	68,12	g
V volume	39,25	cmc
Plu peso umido + tara	144,28	g
Pls peso secco + tara	119,04	g
Pw acqua	25,24	g
Pd peso secco	50,92	g
W contenuto d'acqua %	49,57	%

Peso di volume - γ	1,94 g/cmc
Umidità naturale - w	49,57 %

Descrizione: Argilla limosa grigia

redatto: 

controllato: 

**Determinazione del Peso Specifico
 con il metodo del picnometro**
 norma ASTM D 854

Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1 bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	A
Profondità (da p.c.):	26,0-26,5 m		

Ppat=	Peso picnometro+H2O+terra	1.229,94	g
	Temperatura dell'H2O	24,00	°C
Ppa=	Peso picnometro+H2O	1.195,02	g
Pt=	Peso terra secca	60,32	g
ya=	Peso specifico dell'H2O	0,991	g/cm ³

Peso Specifico = $\gamma_s = Pt / (Ppa + Pt - Ppat) \times \gamma_a$	2,35	g/cm ³
	23,08	kN/m ³

redatto: 

controllato: 

PROVA DI CONSOLIDAZIONE EDOMETRICA

Norma A.G.I. 1994

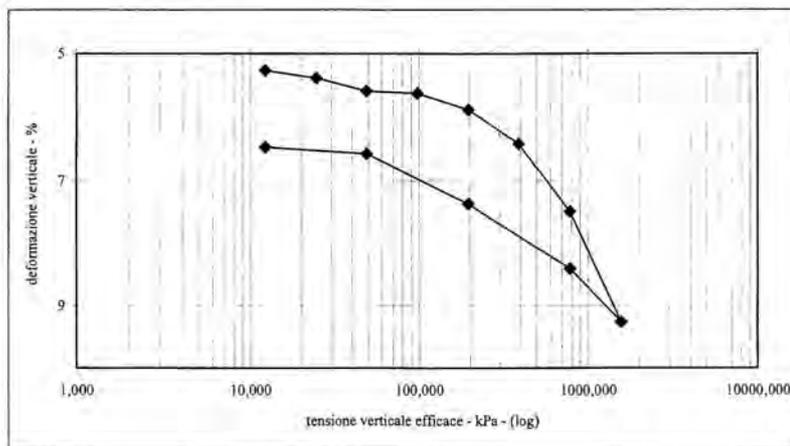
Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	A
Profondità (da p.c.):	26,0-26,5		

$\sigma'v$ kPa	ΔH mm	ϵ %	e^0 %	E kPa
12,258	1,05	5,27	0,44	
24,517	1,08	5,39	0,44	9,677
49,033	1,12	5,59	0,43	11,330
98,067	1,13	5,63	0,43	132,719
196,133	1,18	5,89	0,43	35,732
392,266	1,28	6,42	0,42	34,730
784,532	1,50	7,48	0,41	35,058
1569,065	1,85	9,26	0,38	41,754
784,532	1,68	8,40	0,39	
196,133	1,47	7,36	0,41	
49,033	1,32	6,58	0,42	
12,258	1,30	6,48	0,42	

Natura del campione:

Peso di volume naturale:	19,029	kN/m ³
Peso di volume secco:	15,171	kN/m ³
Contenuto d'acqua naturale	49,57	%
Peso specifico dei grani	23,05	kN/m ³
Indice dei vuoti inizio prova	0,52	e^0
Grado di saturazione	S	S

$\sigma'v$ tensione verticale efficace
 ΔH cedimento
 ϵ deformazione verticale
 e^0 indice dei vuoti
 E modulo edometrico



redatto: ZA

controllato:



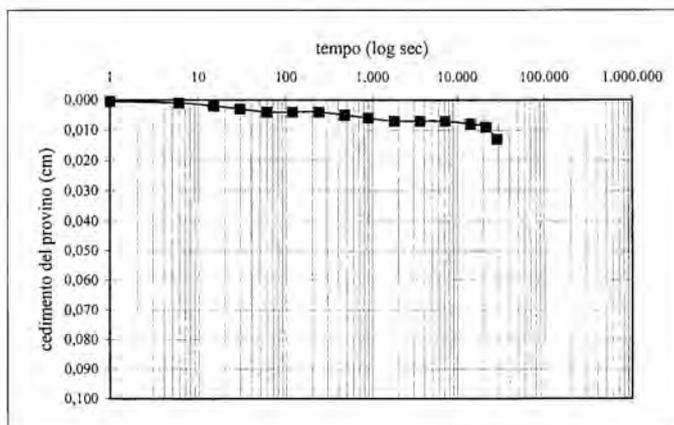
Certificato N°:	485
data di emissione:	24/06/05

PROVA DI CONSOLIDAZIONE EDOMETRICA
Norma A.G.I. 1994

Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	A
Profondità (da p.c.):	26,0-26,5		

DIAGRAMMA CEDIMENTI -TEMPO (Metodo di Casagrande)

carico - (kPa)	24,517
T 50 (sec)	1.950
Cv - (cmq/sec)	9,04 E-05
C α	3,51 E-04
K - (cm/sec)	7,90 E-09



redatto: *Za*

controllato: *[firma]*



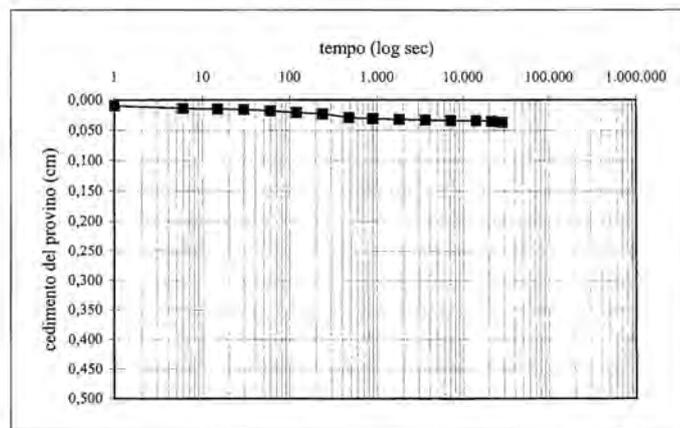
Certificato N°:	486
data di emissione:	24/06/05

PROVA DI CONSOLIDAZIONE EDOMETRICA
 Norma A.G.I. 1994

Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	A
Profondità (da p.c.):	26,0-26,5		

DIAGRAMMA CEDIMENTI - TEMPO (Metodo di Casagrande)

carico - (kPa)	196,133
T 50 (sec)	1.900
Cv - (cmq/sec)	9,17 E-05
C α	1,77 E-04
K - (cm/sec)	2,61 E-09



redatto: *Ea*

controllato: *[firma]*

SCHEDA APERTURA CAMPIONE

Norma ASTM D 2488 - AGI 1977

COMMITTENTE: ARPA-RER

SONDAGGIO S1bis

CANTIERE: Castelmaggiore

CAMPIONE B
 PROFONDOTA' 37,3-37,8 m

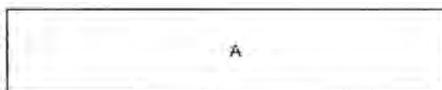
TIPO DI CONTENITORE:

fustella

sacchetto

cassetta

ALTO



BASSO

		PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE										
Livello	descrizione	P.P. kg/cmq	V.T. kg/cmq	Y	W	G.S.	LA	Ed	PT	TR	C	SPT
A	argilla deb.limosa	2,65	1,03	x	x	x		x				

QUALITA' DEL CAMPIONE

scadente

discreta

buona

eccellente

legenda:

P.P.: Pocket penetrometrico (kg/cmq)

C: Compressione ELL

V.T.: Vane test (kg/cmq)

LA: Limiti di Atterberg

Y: Peso di Volume (gr/cmq)

Ed: Edometria

W: Contenuto d'acqua (%)

PT: Prova di taglio

G: Granulometria

TR: Triassiale

G.S.: Peso specifico

SPT: Standard Penetration Test

K: Permeabilità

redatto:

controllato:

Umidità naturale - Peso di volume
 norma CNR - UNI 10014

Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1-1bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	B
Profondità (da p.c.):	37,3-37,8 m		

N° contenitore	a	
T tara	63,43	g
V volume	39,25	cmc
Plu peso umido + tara	134,47	g
Pls peso secco + tara	128,80	g
Pw acqua	5,67	g
Pd peso secco	65,37	g
W contenuto d'acqua %	8,67	%

Peso di volume - γ	1,81	g/cmc
Umidità naturale - w	8,67	%

Descrizione: Argilla debolmente limosa grigia con velature ocra

redatto: 

controllato: 

**Determinazione del Peso Specifico
 con il metodo del picnometro**
 norma ASTM D 854

Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1 bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	B
Profondità (da p.c.):	37,3-37,8 m		

Ppat=	Peso picnometro+H2O+terra	733,52	g
	Temperatura dell'H2O	25,00	°C
Ppa=	Peso picnometro+H2O	703,53	g
Pt=	Peso terra secca	55,94	g
ya=	Peso specifico dell'H2O	0,989	g/cmc

Peso Specifico = $y_s = Pt / (Ppa + Pt - Ppat) \times ya$	2,13	g/cmc
	20,91	kN/mc

redatto: 

controllato: 

PROVA DI CONSOLIDAZIONE EDOMETRICA

Norma A.G.I. 1994

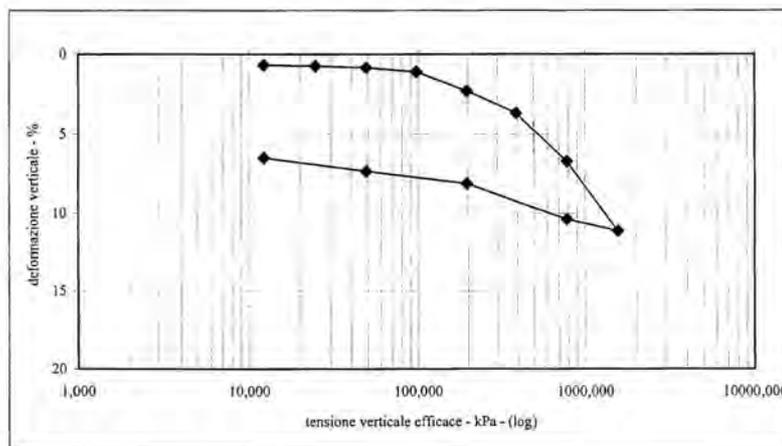
Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	B
Profondità (da p.c.):	37,30-37,80 m		

σ'_v kPa	ΔH mm	ϵ %	e^0 %	E kPa
12,258	0,14	0,68	0,47	
24,517	0,15	0,74	0,47	20.292
49,033	0,17	0,84	0,47	24.350
98,067	0,22	1,10	0,46	18.731
196,133	0,46	2,31	0,45	8.050
392,266	0,74	3,69	0,42	14.167
784,532	1,35	6,74	0,38	12.753
1569,065	2,23	11,13	0,31	17.749
784,532	2,08	10,38	0,33	
196,133	1,63	8,13	0,36	
49,033	1,47	7,35	0,37	
12,258	1,30	6,52	0,38	

Natura del campione:

Peso di volume naturale:	17,749	kN/m ³
Peso di volume secco:	14,119	kN/m ³
Contenuto d'acqua naturale	8,67	%
Peso specifico dei grani	20,89	kN/m ³
Indice dei vuoti inizio prova	0,48	e^0
Grado di saturazione		S

σ'_v tensione verticale efficace
 ΔH cedimento
 ϵ deformazione verticale
 e^0 indice dei vuoti
 E modulo edometrico



redatto:

EA

controllato:

[Signature]



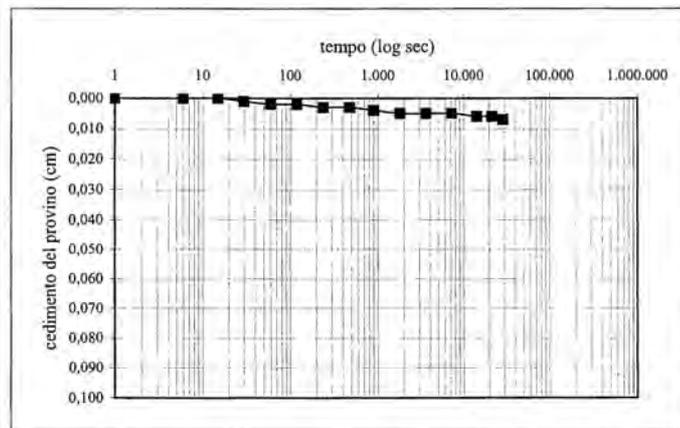
Certificato N°:	491
data di emissione:	24/06/03

PROVA DI CONSOLIDAZIONE EDOMETRICA
Norma A.G.I. 1994

Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	B
Profondità (da p.c.):	37,30-37,8		

DIAGRAMMA CEDIMENTI - TEMPO (Metodo di Casagrande)

carico - (kPa)	24,517
T 50 (sec)	5.000
Cv - (cmq/sec)	3,88 E-05
C α	8,37 E-05
K - (cm/sec)	1,58 E-09



redatto: *EA*

controllato: *[Signature]*



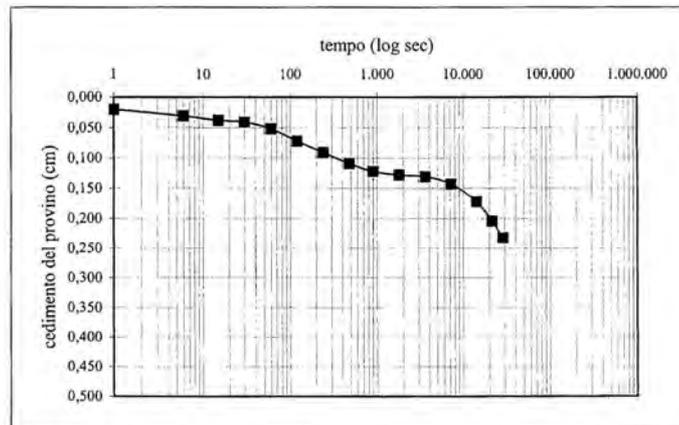
Certificato N°:	482
data di emissione:	24/06/08

PROVA DI CONSOLIDAZIONE EDOMETRICA
 Norma A.G.I. 1994

Committente:	ARPA-RER	Sondaggio:	S1bis
Cantiere:	Castelmaggiore (BO)	Campione:	B
Profondità (da p.c.):	37,30-37,8		

DIAGRAMMA CEDIMENTI -TEMPO (Metodo di Casagrande)

carico - (kPa)	196,133
T 50 (sec)	300
Cv - (cmq/sec)	6,19 E-04
C α	2,41 E-03
K - (cm/sec)	4,33 E-08



redatto: 

controllato: 