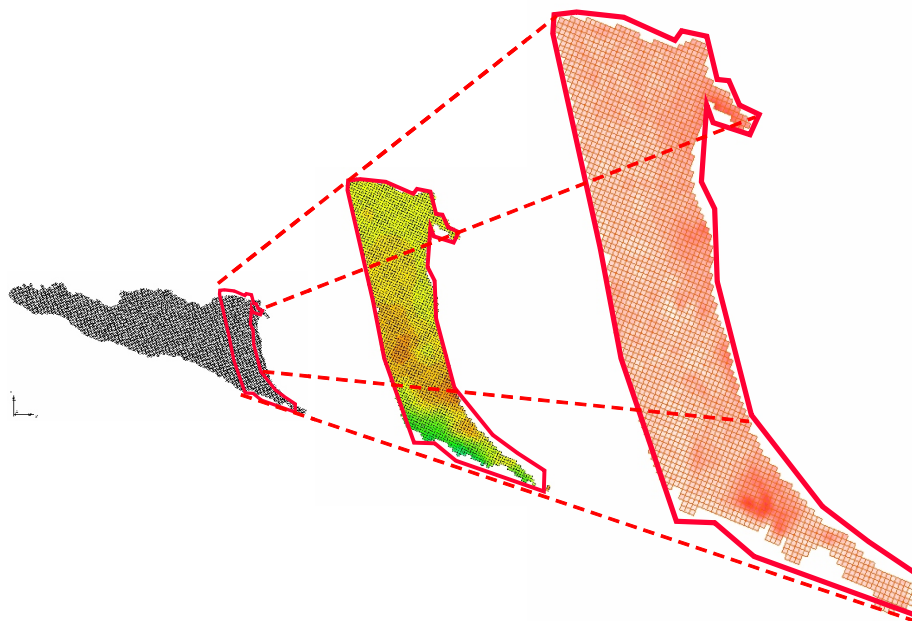




APPLICAZIONE DELLA MODELLISTICA MATEMATICA DI SIMULAZIONE

FASE II

ANALISI DELLA SUBSIDENZA NELLE ZONE COSTIERE



Relazione finale

Regione Emilia-Romagna
Assessorato Sicurezza Territoriale, Difesa Del Suolo e Della Costa, Protezione Civile

Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica

Piermario Bonotto - Responsabile del Servizio

Carlo Albertazzi

ARPA

Agenzia Regionale per la Prevenzione e l'Ambiente

ARPA Direzione Tecnica

Donatella Ferri - Responsabile del CTR Acque Interne

Barbara Villani - Responsabile del CTR Gestione Integrata Rifiuti

Andrea Chahoud - CTR Acque Interne - Responsabile di progetto

Gruppo di Lavoro

ARPA Direzione Tecnica

Andrea Chahoud CTR Acque Interne

Luca Gelati CTR Acque Interne

Giacomo Zaccanti CTR Gestione Integrata Rifiuti

Flavio Bonsignore CTR Gestione Integrata Rifiuti

Servin – Servizi Integrati Gestionali Ambientali

Giuseppe Patrizi

Maurizio Cottignoli

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

- Ezio Mesini - Università degli Studi di Bologna (Dipartimento DICAM)
- Paolo Macini - Università degli Studi di Bologna (Dipartimento DICAM)
- Carlo Cacciamani - ARPA SIMC
- Lucio Botarelli - ARPA SIMC
- William Pratizzoli - ARPA SIMC
- Paolo Severi - SGSS-RER
- Marco Marcaccio - ARPA DT
- Paolo Spezzani - ARPA DT
- Daniele Cristofori - ARPA DT

La grafica di copertina è stata curata da:

Leda Ferrari ARPA DT

SOMMARIO

1. Premessa	1
2. Raccolta ed analisi critica degli studi di settore.....	1
3. Verifica delle possibilità di applicazione della modellistica della subsidenza	7
3.1.1 Il modello di flusso delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna	7
3.1.2 Il modello di subsidenza della conoide del Fiume Reno	11
3.1.3 Possibilità applicative di integrazione modellistica del flusso e della subsidenza per la fascia costiera 13	
3.1.4 Analisi dei dati di base necessari all'applicazione modellistica di flusso e subsidenza	15
3.1.4.1 Dati geognostici	15
3.1.4.2 Dati piezometrici	17
3.1.4.3 Alimentazione dell'acquifero	20
3.1.4.4 Prelievi di acque sotterranee.....	21
3.1.4.5 Dati di compressibilità	23
3.1.4.6 Dati di subsidenza	24
3.1.4.6.1 Dati di subsidenza naturale	26
3.1.4.6.2 Dati di estrazione di gas.....	31
4. Applicazione del modello di subsidenza, taratura del modello e simulazioni.	36
4.1 <i>Il modello numerico di flusso</i>	36
4.1.1 Discretizzazione spaziale e temporale.....	36
4.1.2 Calibrazione del modello numerico di flusso	38
4.1.2.1 Assetto delle permeabilità	39
4.1.2.2 Assetto del flusso	44
4.1.2.3 Controllo della taratura.....	50
4.1.2.4 Il bilancio idrogeologico	55
4.2 <i>Il modello numerico di subsidenza</i>	57
4.2.1 Descrizione del modello numerico di subsidenza	57
4.2.2 Interfaccia Sutrawin e modalità di collegamento col modello di flusso.....	59
4.2.3 Calibrazione (taratura) del modello numerico di subsidenza	59
4.2.3.1 Individuazione del metodo	59
4.2.3.2 Applicazione del metodo.....	61
4.2.3.3 Zona a sud di Lido di Savio	66
4.2.3.4 Zone a nord di Lido di Savio.....	69
4.2.3.4.1 Analisi di casi specifici. Caso1: zona costiera prospiciente la piattaforma Angela-Angelina 74	
4.2.3.4.2 Analisi di casi specifici. Caso2: zona costiera tra Casalborgorsetti e Foce Reno	78
4.2.3.5 Assetto delle compressibilità al termine della calibrazione effettuata.....	79
5. Bibliografia	88

1. PREMESSA

Nell'ambito del progetto denominato "Elaborazione ed analisi dati raccolti sulle acque superficiali e sotterranee a livello locale per lo sviluppo dei Piani di Tutela delle Acque" ([1]), Arpa, Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale, ora CTR Acque Interne della Direzione Tecnica, ha curato, su incarico della Regione Emilia-Romagna, Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua, la modellistica numerica per la simulazione del flusso dell'acqua e del trasporto di nitrati per le acque sotterranee dell'intero territorio regionale. Risulta quindi oggi disponibile un modello numerico per la simulazione del flusso delle acque sotterranee utilizzabile per orientare la pianificazione, gestione e quindi ottimizzare l'utilizzo della risorsa idrica sotterranea.

Nello "Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile della risorsa idrica", ([2], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna e Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della Conoide Alluvionale del Fiume Reno*. Rapporto tecnico. e [5], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008a): *Approfondimenti sulla Conoide Alluvionale del Fiume Reno, aggiornamento della modellistica e valutazione delle necessità di adeguamento della stessa in base a specifiche esigenze*. Rapporto tecnico. Bologna. 77 pp.) Arpa ha inoltre curato, su incarico della Regione Emilia-Romagna e dell'Autorità di Bacino del Reno la modellistica numerica per la simulazione sia del flusso sia della subsidenza conseguente all'estrazione di acqua sotterranea. In tale occasione è stato sviluppato un apposito codice per il calcolo dell'abbassamento del suolo che può essere ora applicato anche ad altri contesti regionali.

I due elementi appena descritti hanno reso possibile l'articolazione di un progetto denominato "Applicazione della modellistica matematica di simulazione" e costituito dalle seguenti due fasi:

- **Fase I:** analisi del flusso delle acque sotterranee in relazione a scenari caratterizzati da particolari criticità nel rapporto ricarica prelievi;
- **Fase II:** analisi della subsidenza nelle zone costiere.

La **Fase I**, riguardante l'aggiornamento della modellistica matematica del flusso delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna e la sua applicazione per descrivere particolari situazioni caratterizzate da una criticità nel rapporto tra la ricarica ed i prelievi, si è conclusa nel 2009 ed è stata condotta su incarico della Regione Emilia-Romagna, Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua. Le risultanze sono ampiamente documentate nel rapporto tecnico finale al quale si rimanda per eventuali approfondimenti ([8], Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2009). *Applicazione della modellistica matematica di simulazione. Fase I: analisi del flusso delle acque sotterranee in relazione a scenari caratterizzati da particolari criticità nel rapporto ricarica-prelievi*. Rapporto tecnico.)

La **Fase II**, oggetto del presente rapporto, è collegata e conseguente alla precedente, e riguarda invece l'utilizzo della modellistica matematica per l'analisi del fenomeno della subsidenza con particolare interesse alla zona costiera. Il progetto prevede nel suo complesso la realizzazione delle seguenti attività:

1. Raccolta ed analisi degli studi di settore;
2. Verifica delle possibilità di applicazione della modellistica della subsidenza;
3. Applicazione del modello di subsidenza, taratura del modello e simulazioni.

Il presente rapporto descrive nel dettaglio le risultanze ottenute seguendo l'articolazione delle 3 attività appena richiamate e che lo compongono.

2. RACCOLTA ED ANALISI CRITICA DEGLI STUDI DI SETTORE

Nella presente attività è stata effettuata una raccolta delle esperienze e degli studi condotti in ambito regionale relativamente ai rapporti tra subsidenza antropica ed estrazione di acqua dal sottosuolo.

In riferimento all'intero territorio regionale si segnalano i seguenti studi:

1. *Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008). Analisi preliminare degli effetti dei prelievi di acque sotterranee sulla evoluzione recente del fenomeno della subsidenza in Emilia-Romagna. [6].*

Lo studio ha proposto una valutazione, a scala regionale, delle possibili relazioni esistenti fra i prelievi di acque di falda per gli usi civili, industriali e agrozootecnici e i fenomeni di subsidenza. In particolare gli elaborati prodotti hanno realizzato un confronto delle distribuzioni spaziali delle velocità medie di

abbassamento del suolo registrate nei due periodi assunti come riferimento temporale dello studio (1992-2000 e 2002-2006) in relazione sia agli andamenti piezometrici, così come rilevati dalla Rete Regionale di Monitoraggio delle Acque Sotterranee, sia alla distribuzione dei prelievi di acque sotterranee per i diversi usi.

Per quanto riguarda la definizione dei prelievi, per alcuni areali provinciali o sub-provinciali, è stato necessario procedere alla ricostruzione di dati mancanti. I margini di incertezza risultano non trascurabili in relazione all'assenza di sistematiche rilevazioni degli emungimenti; la stima dei prelievi irrigui è basata, essenzialmente, sui dati del Piano Regionale di Tutela delle Acque, opportunamente corretti considerando l'evoluzione delle superfici colturali irrigate e le condizioni climatiche dei diversi anni; l'assenza di affidabili dati di prelievo dai pozzi irrigui ha reso imprescindibile operare con procedure di stima, tale criticità non appare ad oggi superabile. Le incertezze connesse alla stima dei prelievi zootecnici non costituiscono una criticità, in relazione alla modesta entità dei prelievi stessi. I prelievi acquedottistici risultano essere invece ben conosciuti sia in entità sia in ubicazione dei principali poli di prelievo.

Dalla osservazione degli elaborati cartografici emerge in diverse situazioni una notevole correlazione spaziale e temporale tra le variabili analizzate (emungimenti, piezometrie e subsidenza). Localmente, lungo la costa, fenomeni di subsidenza di rilievo non paiono invece connessi a prelievi idrici quanto piuttosto allo sfruttamento di giacimenti di gas metano. In taluni areali il dettaglio del quadro conoscitivo delle piezometrie e dei prelievi non risulta adeguato ai fini di un'interpretazione locale dei fenomeni di subsidenza: per quanto riguarda le piezometrie, la difficoltà di lettura è da porre in relazione alla rarefazione dei pozzi delle reti regionali di controllo, mentre per quanto riguarda i prelievi tale difficoltà è piuttosto attribuibile alle incertezze sulla stima degli emungimenti irrigui ed industriali.

Vengono evidenziati in particolare due areali che presentano le maggiori criticità per i fenomeni di subsidenza in atto: l'areale bolognese ed il quadrilatero Cesena – Cesenatico – Bellaria – Savignano sul Rubicone. Il primo presenta un fenomeno di subsidenza ancora piuttosto marcato, per quanto in diminuzione rispetto al periodo precedente di oltre il 30 %; a fronte di tale diminuzione si evidenzia anche una flessione dei prelievi complessivi pari a circa il 10 % attribuibile sostanzialmente al settore industriale e agrozootecnico, mentre risulta invariato il prelievo per usi civili; la tendenza positiva riguardo al fenomeno della subsidenza trova conferma anche in un'apprezzabile risalita del livello piezometrico medio (da 6.7 a 7.7 m s.l.m.).

Anche il secondo areale critico presenta una tendenza alla diminuzione del fenomeno di subsidenza rispetto al periodo precedente (4 %), confermata, da una risalita del livello piezometrico medio (da 0.6 a 1.6 m s.l.m.); i prelievi, in questo caso, risultano invece in leggero aumento (10 %) in quanto fortemente influenzati dalle condizioni meteorologiche sensibilmente più siccitose nel periodo più recente, considerando che in quest'area i prelievi per usi irrigui costituiscono il 61 % dei prelievi complessivi.

2. *Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna e Autorità di Bacino del Reno (2005). Studio della Conoide Alluvionale del Fiume Reno. [2]*

Il lavoro nasce dall'esigenza di studiare una delle aree più critiche della Regione Emilia-Romagna, in quanto principale serbatoio di riserve idriche strategiche, purtroppo sovrasfruttato nei decenni passati da prelievi di acque sotterranee quantitativamente superiori alla capacità di ricarica naturale della conoide, che hanno generato una consistente depressione piezometrica, tanto che le soggiacenze massime della falda hanno superato le diverse decine di metri di profondità dal piano campagna.

In conseguenza si sono registrati elevati abbassamenti del suolo con punte presso Castel Maggiore dell'ordine di 5 cm/anno, derivanti dal consolidamento dei sedimenti alluvionali depressurizzati.

Nel progetto sono state svolte le seguenti principali attività:

- strutturazione di un sistema informativo territoriale;
- definizione del modello concettuale del bacino idrogeologico;
- implementazione e taratura di un modello matematico di flusso delle acque sotterranee in regime transitorio per il periodo 1983-1998, sviluppato con il Groundwater Modeling System (GMS), che utilizza l'equazione di Darcy, per un mezzo poroso saturo, discretizzata nello spazio e nel tempo dal codice di calcolo Modflow con un sistema alle differenze finite. Il modello è stato discretizzato con 70 layer, di cui 40 sono stati attribuiti al Gruppo Acquifero A (10 per ogni suo Complesso Acquifero da A0-A1 ad A4), 20 al Gruppo Acquifero B e 10 al C e sono state utilizzate maglie a forma di parallelepipedi a base quadrata con lato di 500 m e

altezze variabili. Ciascun elemento di volume viene descritto mediante due componenti di permeabilità (orizzontale e verticale), l'immagazzinamento specifico, la porosità totale e quella efficace;

- calcolo del bilancio idrogeologico annuale;
- sviluppo e taratura di un modello matematico di simulazione della subsidenza. Tale modello utilizza il codice di calcolo flowkonsol che risolve per ciascuna colonna, costituita a sua volta da 70 maglie, l'equazione della compattazione monodimensionale verticale di un ammasso poroso saturo sottoposto a variazioni di pressione idrostatica. Tali variazioni derivano dal modello di flusso precedentemente descritto. Il modello è stato tarato in modo da ottenere per le diverse litologie assegnate alle celle la migliore distribuzione dei relativi coefficienti di consolidazione (c_v), tali da essere coerenti con le velocità di abbassamento del suolo ricavate dal confronto delle livellazioni del 1983, 1987, 1992 e 1999;
- l'installazione di due assestimetri a Castelmaggiore, ancorati a 100 e 200 m di profondità per la misura degli abbassamenti del suolo.

3. *Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2008): Approfondimenti sulla Conoide Alluvionale del Fiume Reno, aggiornamento della modellistica e valutazione delle necessità di adeguamento della stessa in base a specifiche esigenze. [5]*

Il lavoro rappresenta il proseguimento degli studi precedenti già realizzati da Arpa nel 2005 ([2]), che hanno portato ad un importante sviluppo delle conoscenze del sistema idrogeologico della conoide del F. Reno, ottenuto attraverso l'applicazione dei modelli precedentemente realizzati, fornendo strumenti modellistici per la simulazione del flusso delle acque sotterranee e per la subsidenza, oltre all'analisi di dettaglio dei dati dei due assestimetri, installati nella primavera del 2005 a Castel Maggiore profondi 100 e 200 m per la misura degli abbassamenti del suolo.

Nel progetto sono state svolte le seguenti principali attività:

- approfondimenti per una migliore definizione dei rapporti falda-fiume
- aggiornamento (dati piezometrici, prelievi idrici da pozzi e ricarica zenitale), verifica e validazione fino al 2006 del modello di flusso delle acque sotterranee, precedentemente tarato con passo annuale per il periodo di sedici anni 1983-98, a cui sono stati aggiunti altri otto anni, di cui gli ultimi due (2005 e 2006) discretizzati in una simulazione anche con passo mensile
- aggiornamento fino al 2006 e ulteriore sviluppo del modello di subsidenza (oltre ad un affinamento della sua taratura), realizzato con il software flowkonsol, tenendo conto agli ultimi rilievi della subsidenza effettuati nel 2006 tramite analisi interferometrica.
- simulazioni di scenario: ipotesi di un intervento di ricarica artificiale della falda ($0.12 \text{ m}^3/\text{s}$) applicato continuativamente in apice di conoide per i vent'anni compresi tra il 1987 ed il 2006. Dalla simulazione con il modello di flusso ne è conseguito un recupero piezometrico inversamente proporzionale alla distanza del punto di immissione dell'acqua, variabile nel tempo e compreso fra 3.5 e 0.5 m. Tali carichi idraulici sono poi stati utilizzati per una simulazione con il modello di subsidenza ed è risultato un recupero in termini di abbassamento del suolo variabile da 1 a 70 cm (in media 23 cm) complessivi sui vent'anni simulati
- al fine di una migliore comprensione delle dinamiche della subsidenza, sono stati condotti approfondimenti geotecnici e analisi di dettaglio dei dati assestimetrici di Castel Maggiore, i quali sono stati confrontati con i prelievi idrici da pozzi, con i dati pluviometrici, con le piezometrie e con i dati interferometrici.

Dal lavoro è emerso che nella conoide del Reno:

- risulta una proporzionalità diretta fra i volumi di sedimenti fini e la subsidenza
- la subsidenza indotta dai prelievi idrici da pozzi non viene necessariamente a collocarsi sullo stesso asse verticale
- i dati assestimetrici nel periodo 2005-2008 mostrano valori di subsidenza di 13 mm/anno, confrontabili con quelli derivanti dalle livellazioni 2002-2006 della rete regionale di monitoraggio della subsidenza; tali valori assestimetrici mostrano per i primi 100 m dal piano campagna un andamento ciclico stagionale all'interno del quale i principali abbassamenti del suolo avvengono nel periodo estivo, alternati ad alcuni periodi di alzamenti del suolo correlabili a intensi eventi di pioggia che sarebbero causa del rigonfiamento dei primi metri di

suolo aventi una componente argillosa; mentre per la porzione 100-200 m, la dinamica di schiacciamento è abbastanza regolare.

4. *Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008). Studio sulla ricarica artificiale delle falde in Emilia-Romagna. Rapporto tecnico. [7]*

Lo studio è stato sviluppato tenendo conto della necessità di avviare progetti pilota sul tema della ricarica artificiale, evidenziata dal Piano Regionale di Tutela delle Acque del 2005.

Nel progetto sono state studiate approfonditamente due zone di interesse per una possibile sperimentazione di un intervento di ricarica artificiale delle falde: in provincia di Bologna, le aree golenali e le ex cave sul F.Reno, mentre in provincia di Rimini, gli ex bacini di cava in destra idrografica del F. Marecchia.

Il principale obiettivo del progetto è stato quello di verificare l'idoneità delle aree di studio alla sperimentazione della ricarica artificiale delle falde e quindi di fornire i primi indirizzi progettuali per la fattibilità degli interventi.

Nello progetto sono state svolte le seguenti attività:

- analisi della normativa vigente sul tema;
- analisi degli strumenti vigenti di pianificazione territoriale nelle zone di interesse;
- caratterizzazione approfondita territoriale e ambientale delle aree di studio per quanto riguarda: ubicazione e caratteristiche geometriche, inquadramento geomorfologico, geologico, idrogeologico e idrostratigrafico di dettaglio;
- analisi quali-quantitativa delle acque sotterranee (elaborazioni delle piezometrie stagionali e delle concentrazioni dei nitrati per le aree in destra Marecchia e degli organo alogenati per le aree prossime al Reno), delle acque superficiali (portate mensili in alveo e individuazione dello stato ambientale dei corsi d'acqua) e nel caso dell'alveo del Reno, caratterizzazione dei sedimenti (analisi chimiche, granulometriche e determinazione del coefficiente di permeabilità);
- analisi dei rapporti falda-fiume;
- valutazione quantitativa delle possibilità di ricarica artificiale su alcune aree, grazie alla realizzazione di un modello numerico agli elementi finiti, che ha utilizzato il software SutraWin, con il quale è stato possibile simulare il flusso d'acqua nel mezzo poroso non saturo in condizioni disomogenee e anisotrope. Sono state adottate condizioni di flusso nullo sulle facce verticali laterali del modello e condizioni di carico idraulico imposto in corrispondenza del fondo delle aree di interesse, come pure nel layer più basso, per vincolare la presenza del tetto della falda per tutta la durata della simulazione. Si sono così ottenuti come risultati una stima del flusso in ingresso/uscita attraverso le due interfacce sature, l'una sul fondo dell'area, l'altra in corrispondenza del tetto della falda. Le variabili di controllo del flusso (permeabilità verticale, porosità e coefficiente d'immagazzinamento) sono state assegnate coerentemente con la calibrazione dei rispettivi due modelli generali delle conoidi del Marecchia e del Reno. I volumi di infiltrazione calcolati sono poi stati inseriti all'interno dei modelli di flusso generali pocanzi menzionati, al fine di valutare gli effetti sulla dinamica idrica sotterranea delle intere conoidi, attraverso un'analisi sia dei recuperi dei livelli di falda, sia attraverso i bilanci idrogeologici.

5. *Darini G. (2007). Land Subsidence due to groundwater withdrawal: the case of Bologna. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile, XX Ciclo, Università degli studi di Cassino. [15]*

La tesi tratta il tema della subsidenza, in particolare nel territorio bolognese.

Nella prima parte viene fatta un'ampia introduzione di carattere bibliografico al lavoro e riguardante:

- i due tipi di subsidenza, naturale e antropica e le relative cause
- i casi storici delle zone più note nel mondo e in Italia interessate da rilevanti fenomeni di abbassamento del suolo;
- legge di Darcy e teoria della consolidazione;
- una metodologia generale per affrontare un'analisi complessiva della subsidenza in una possibile zona di indagine.

Nella seconda parte della tesi viene, invece affrontato il caso di studio di Bologna. L'area risulta interessata da una subsidenza di lungo termine, stimata intorno a 1.5-2 mm/anno, dovuta a cause naturali (movimenti tettonici e compattazione dei sedimenti) e da una antropica, relativamente recente, dovuta ai prelievi di acque sotterranee, dell'ultimo mezzo secolo. Dal confronto fra le livellazioni del 1943/50-1970/73, nelle aree a Ovest e ad Est del F. Reno, sono emersi valori di subsidenza totale molto elevati, rispettivamente fino a 100 cm e 120 cm, che hanno raggiunto il culmine nel 1974-81, con 82 cm, corrispondenti a ben 11.7 cm/anno.

Dai dati di letteratura è emerso che, prima dell'instaurarsi degli ingenti prelievi idrici da pozzi, la direzione di flusso delle acque sotterranee andava all'incirca da SSE a NNO, mentre in seguito a alla mutata situazione, è stato riscontrato un significativo cambiamento con un richiamo d'acqua da ogni direzione verso la depressione piezometrica ubicata a NO di Bologna.

Nella tesi sono stati presi in considerazione per il territorio in esame: l'evoluzione geologica, le caratteristiche idrogeologiche, le piezometrie disponibili, le informazioni sui prelievi idrici da pozzo (usi e volumi annui estratti nel periodo 1985-2002) e le caratteristiche geotecniche del sottosuolo determinate tramite prove di permeabilità in situ e analisi di laboratorio (analisi granulometriche, limiti di Atterberg, prove edometriche e triassiali).

È stato inoltre preparato un modello numerico di flusso utilizzando il codice di calcolo Modflow nell'ambito del pacchetto informatico Groundwater Vistas.

Si tratta di un modello alle differenze finite, sia nello spazio che nel tempo, basato sull'equazione di Darcy, in condizioni stazionarie, di flusso bidimensionale e con condizioni al contorno non influenzate dai prelievi idrici da pozzi. Il modello riguarda solo il Gruppo Acquifero A, qui assunto come un unico acquifero non confinato, dove sono concentrati la maggior parte dei prelievi, che è stato modellato con un unico layer suddiviso in celle a forma di parallelepipedi a base quadrata, con lato di 500 m e altezze variabili, per ognuno dei quali è stato assegnato un coefficiente di permeabilità calcolato come il prodotto di quello medio del Gruppo Acquifero A per il relativo spessore dei sedimenti grossolani, poi diviso per lo spessore complessivo dello stesso acquifero.

È stato analizzato il flusso per il 1985 e per il 2002 e dal confronto fra i dati calcolati e osservati, è stato ricalibrato il coefficiente di permeabilità medio ($3.47 \cdot 10^{-4}$ m/s) del Gruppo Acquifero A.

Sono stati fatti tre scenari: uno con prelievi civili e industriali, uno con solo i civili e uno senza e si è visto che l'influenza sulle piezometrie è data sostanzialmente dai prelievi civili.

A conclusione della tesi sono state quindi individuate delle correlazioni fra la subsidenza da un lato e dall'altro, i prelievi, le piezometrie e lo spessore cumulato della componente fine dei sedimenti.

6. *Comune di Bologna, Regione Emilia-Romagna, Idroser S.p.A. (1989), Studio sul fenomeno della subsidenza nel territorio bolognese. [31]*

Il lavoro nasce dall'esigenza di definire il quadro conoscitivo dell'entità e dei trend evolutivi del fenomeno della subsidenza per la città di Bologna e per le zone circostanti, considerati gli effetti negativi sul patrimonio storico-edilizio e sulle infrastrutture, registrati soprattutto intorno alla fine degli anni '80, in seguito ai coevi sensibili incrementi degli abbassamenti del suolo, già evidenti a partire dagli anni '50-'60.

Nel 1981 sono state avviate indagini atte a verificare la situazione statica degli edifici del centro storico di Bologna ed è stata progettata una rete di livellazione di alta precisione estesa a diversi comuni di pianura. Viene inoltre condotto uno studio delle caratteristiche fisiche del territorio attraverso indagini geognostiche, geotecniche e idrogeologiche, oltre ad un'analisi dei prelievi idrici da pozzi, al fine poter individuare le correlazioni fra gli abbassamenti piezometrici delle falde acquifere e gli abbassamenti topografici.

Il tutto è servito inoltre a ricostruire il modello idrogeologico del territorio in esame, previa determinazione della variazione media annua dei livelli piezometrici dal 1977 al 1986, relativi ai pozzi della Rete Regionale di Controllo.

Tale lavoro si inserisce all'interno delle azioni previste dalla L. 845/1980 che hanno portato all'adozione del Piano regionale di controllo degli emungimenti da falda.

Il modello concettuale è stato poi la base per la realizzazione di due modelli matematici integrati: uno idrogeologico, per la previsione della sollecitazione meccanica nei terreni, e l'altro di subsidenza, che a partire dagli output del primo, calcola gli abbassamenti del piano campagna.

Nel presente studio è stato utilizzato il modello matematico idrogeologico già realizzato nell'ambito dell'aggiornamento del Piano delle Acque della Regione Emilia-Romagna ([14], Idroser (1978). Progetto di piano per la salvaguardia e l'utilizzo ottimale delle risorse idriche in Emilia-Romagna.). Tale modello consta di due parti combinate per il calcolo nel tempo dei livelli piezometrici: un modello monostrato bidimensionale per gli strati acquiferi ed uno monodimensionale, per gli acquitardi a partire dalle piezometrie degli strati acquiferi.

Il modello è risultato utile per la gestione della programmazione dello sfruttamento della risorsa idrica, in quanto strumento per effettuare stime previsionali degli abbassamenti del suolo, conseguenti a diversi scenari di prelievo idrico da falda.

Lo strumento modellistico è stato infatti utilizzato per eseguire simulazioni con riduzioni o azzeramenti dei prelievi in alcune aree del territorio bolognese, che hanno dato come risultato un veloce (1-2 anni) recupero dei livelli piezometrici dell'ordine dei 20-30 m, secondo uno schema concentrico intorno all'asse del cono di depressione della conoide del F. Reno.

A partire dai dati degli abbassamenti piezometrici, rispetto ad una condizione indisturbata del sistema, è poi stata fatta una simulazione di subsidenza, la cui taratura si è dimostrata sensibile per ordine di importanza: agli abbassamenti piezometrici degli acquiferi, agli spessori degli acquitardi, alle compressibilità delle argille nei tratti di compressione edometrica ed ai coefficienti di consolidazione delle argille.

Sulla base delle ipotesi di sfruttamento dell'acquifero definite con il modello idrogeologico, nella fase di simulazione del modello di subsidenza sono stati determinati gli abbassamenti del terreno previsti per il periodo compreso fra il 1989 ed il 2000, anno per il quale veniva presunto il raggiungimento dell'equilibrio idrodinamico delle falde. Ne è emerso un rallentamento immediato della subsidenza dopo il 1988, con velocità differenti anche prima e dopo il 1970.

7. *Gambolati G. (1998), CENAS: Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence. Kluwer,[17]*

Il Progetto, nel suo complesso, ha indagato, anche attraverso l'implementazione di modellistica matematica, i principali fattori che possono in vario modo influenzare la stabilità del litorale appartenente all'Alto Adriatico, I fattori considerati sono stati:

- subsidenza naturale ed antropica;
- aumento del livello del mare;
- riduzione del trasporto solido.

La modellistica numerica è stata poi utilizzata in simulazioni di scenario di lungo periodo al fine di individuare la possibile evoluzione della dinamica costiera dell'intero arco appartenente all'Alto Adriatico. Tutti i dati sono stati inseriti in un GIS (geometria, geologia, idraulico, meteorologia).

L'area di studio copre 350 km di costa all'interno dei quali ricadono 3 aree che sono state oggetto di approfondimenti specifici tutte ricadenti nel territorio emiliano-romagnolo (Ravenna, Cesenatico, Rimini). I risultati del lavoro indicano per i successivi decenni un generale arretramento della linea di riva, in particolare a sud del Delta del Po.

8. *Eni S.p.A – AGIP, ARPA Emilia-Romagna (2003), Studio della Subsidenza Antropica generata dall'estrazione di acqua di falda lungo la costiera emiliano-romagnola.[16]*

Nell'ambito di tale progetto è stato sviluppato, messo a punto ed applicato un modello agli elementi finiti per la simulazione della subsidenza indotta dall'estrazione di acqua dal sistema filtrante multistrato della fascia costiera emiliano-romagnola. Il modello calibrato sul trentennio 1946-1976 e validato sul periodo 1976-2001, è stato applicato in fase previsionale fino al 2016.

L'applicazione modellistica è stata realizzata utilizzando dei codici di simulazione allo stato dell'arte che risolvono con il metodo degli elementi finiti, in ambito tridimensionale, le equazioni del flusso saturo e della consolidazione in presenza di un mezzo poroso la cui compressibilità dipende dalla tensione intergranulare efficace.

Le simulazioni modellistiche sono state condotte su un dominio delimitato ad Est dalla linea di costa, a Nord dal Po di Volano, a Sud dalle conoidi dei fiumi Marecchia e Rubicone e a Ovest 10-15 km nell'entroterra.

Le risultanze di tale applicazione modellistica conferiscono all'estrazione di acqua dal sottosuolo la causa principale della subsidenza in tutta l'area di studio. In particolare la riduzione negli ultimi 10-20 anni

(anni 80' e 90') della velocità di subsidenza lungo tutta la fascia costiera, viene correlata ad una generale diminuzione dei prelievi e conseguente recupero delle pressioni di strato.

La subsidenza per estrazione di acqua lungo la costa appare attualmente trascurabile a nord di Lido di Savio mentre a sud è da considerarsi ancora il fattore principale causa del fenomeno.

Il confronto tra le misure di subsidenza e compattazione effettuate lungo la fascia costiera, ed i risultati ottenuti dal modello, evidenziano però come negli anni, circa dal 1990 al 2003, parte dell'abbassamento registrato lungo il litorale (generalmente dell'ordine di 5 mm/anno) può essere attribuito a cause diverse dall'emungimento idrico. Tale contributo di subsidenza "secondario", nelle conclusioni dello studio, in via preliminare, viene ricollegato ai seguenti meccanismi:

- una subsidenza naturale maggiore di quella definita nello studio;
- la sovrapposizione degli effetti di estrazioni di gas off-shore, a cui si aggiungono gli abbassamenti provocati dai giacimenti di Dosso degli Angeli ed Angela-Angelina ubicati sotto costa;
- un processo di compattazione chimica dei suoli argillosi dovuto al rimpiazzamento di acqua dolce con acqua salata;
- prelievi d'acqua in acquiferi non monitorati;
- la consolidazione del terreno per carichi superficiali.

Infine, in fase previsionale, il modello stima al 2016 una generale riduzione del fenomeno di subsidenza per estrazione d'acqua dal sottosuolo, eccezion fatta per i comuni ad Ovest di Ravenna e per quelli costieri a Sud di Cervia; in queste zone il permanere di pompaggi significativi potrà contribuire ad un abbassamento del terreno valutabile nell'ordine di 1-2 cm/anno.

3. VERIFICA DELLE POSSIBILITÀ DI APPLICAZIONE DELLA MODELLISTICA DELLA SUBSIDENZA

Lo scopo della presente attività è quello di analizzare le possibilità di applicazione della modellistica della subsidenza realizzata a diversa scala di dettaglio per il Progetto sulla Conoide del Reno ([2], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna e Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della Conoide Alluvionale del Fiume Reno*. Rapporto tecnico.) ai risultati del modello di flusso disponibile per l'intero territorio regionale di cui alla Fase I del progetto ([8], Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2009). *Applicazione della modellistica matematica di simulazione. Fase I: analisi del flusso delle acque sotterranee in relazione a scenari caratterizzati da particolari criticità nel rapporto ricarica-prelievi*. Rapporto tecnico.).

Tale verifica riguarderà una serie di aspetti, in primo luogo legati alla diversa scala dei modelli di flusso (Conoide Reno e Pianura emiliano-romagnola) e poi quelli strettamente operativi legati al collegamento numerico dei due modelli. I due modelli vengono quindi sinteticamente descritti, nei loro caratteri essenziali, e nei successivi paragrafi viene descritta la loro possibilità di integrazione ed applicazione nel diverso contesto territoriale della zona costiera.

3.1.1 Il modello di flusso delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna

L'attuale assetto del modello di flusso delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna deriva da una prima impostazione iniziale alla quale sono susseguite una serie di fasi di aggiornamento e verifica. In dettaglio:

1. la prima implementazione del modello di flusso è stata realizzata a supporto del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna ([1], Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003). *Modello matematico di simulazione delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Emiro3D)*, Elaborato di supporto Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna. Rapporto tecnico. Bologna.) ed ha riguardato la definizione della geometria, la struttura del sistema, la discretizzazione spazio-temporale, e l'insieme di tutte le informazioni disponibili.
2. il modello è stato successivamente calibrato con quattro passi di tempo di tre mesi ciascuno riferiti all'anno solare 2002, estendendo così il modello al regime in moto transitorio ([3], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007a). *Elaborazione ed analisi dati raccolti sulle acque superficiali e sotterranee a livello locale per lo sviluppo dei piani di tutela delle acque. Attività B.*

Modello di flusso e di trasporto dei nitrati nelle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna. Rapporto tecnico.

3. infine il modello è stato ulteriormente aggiornato estendendone la copertura temporale a tutto il 2006 ([8], Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2009). *Applicazione della modellistica matematica di simulazione. Fase I: analisi del flusso delle acque sotterranee in relazione a scenari caratterizzati da particolari criticità nel rapporto ricarica-prelievi.* Rapporto tecnico.).

Le principali caratteristiche costruttive del modello di flusso sono le seguenti:

- Area del modello: circa 12.000 km² appartenenti all'intero territorio di pianura emiliano romagnolo (Figura 3.1);
- Discretizzazione nel piano: maglie quadrate di lato 1 km (Figura 3.1);
- Discretizzazione verticale: 35 layer a spessore variabile: 23 layer per i Complessi Acquiferi A1, A2, A3, A4, 12 layer per il Gruppo Acquifero B (Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4), secondo lo schema idrostratigrafico riportato in [36] Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna.* A cura di G. Di Dio, Selca Firenze.);
- Numero totale di celle attive: circa 400.000 (Figura 3.5);
- Condizionamento dei layer secondo le superfici notevoli riconosciute (basi dei gruppi acquiferi principali, Figura 3.3);
- Condizioni al contorno (Figura 3.6);
- Arco temporale di copertura del modello e relativa discretizzazione nel tempo (Figura 3.7): cinque anni a passo stagionale trimestrale;

Figura 3.1: discretizzazione del modello regionale, vista in pianta e dettaglio della provincia di Piacenza

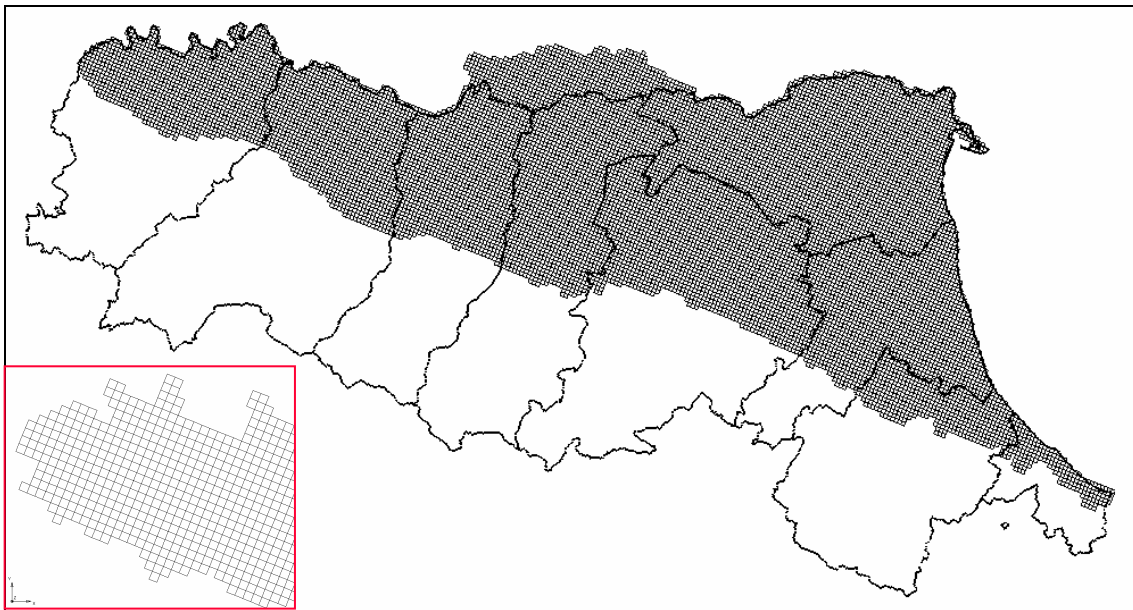


Figura 3.2: tracce delle sezioni per la rappresentazione della discretizzazione spaziale

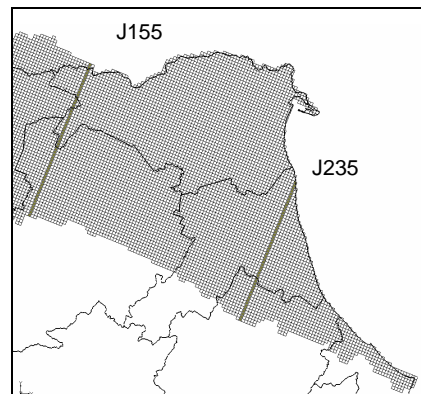


Figura 3.3: discretizzazione del modello regionale, vista in sezione J155

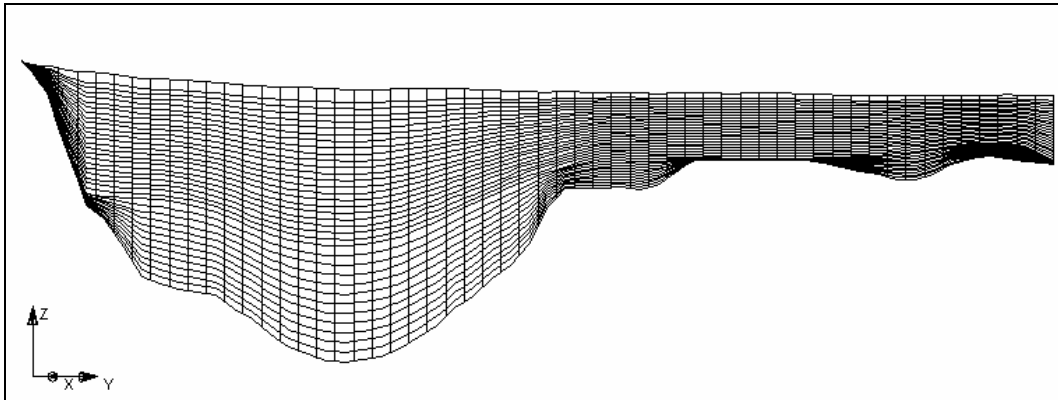


Figura 3.4: discretizzazione del modello regionale, vista in sezione J235

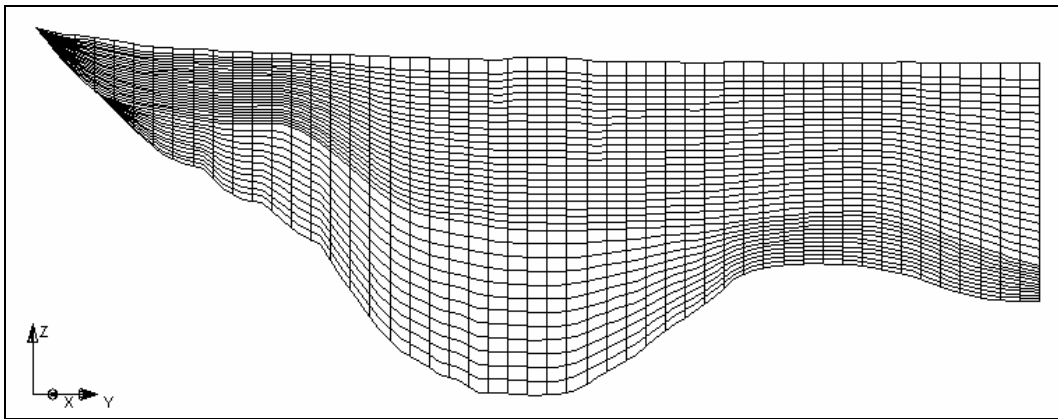


Figura 3.5: vista tridimensionale del modello regionale

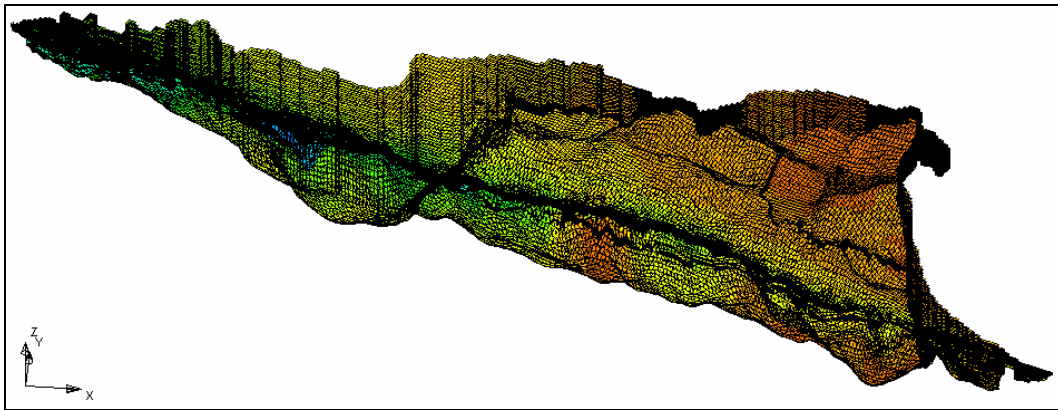


Figura 3.6: definizione delle condizioni al contorno del modello regionale

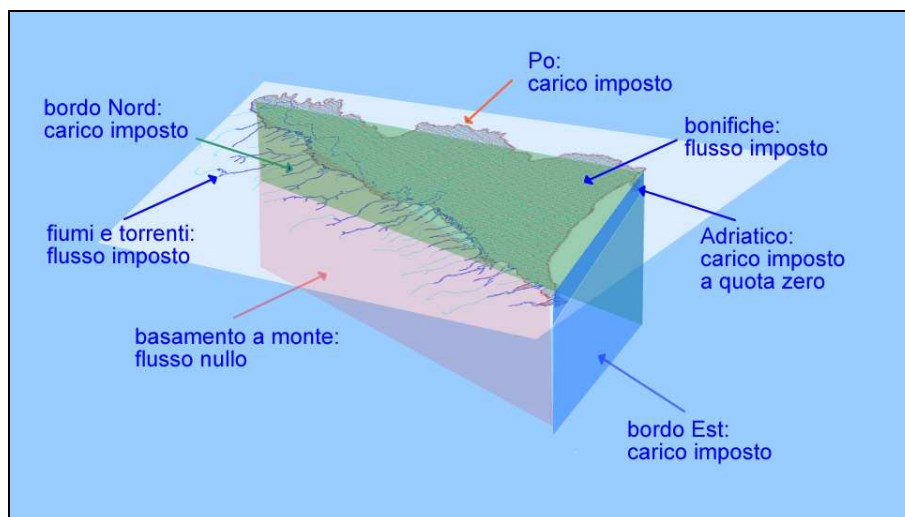


Figura 3.7: Discretizzazione temporale adottata nella fase di aggiornamento del modello regionale

anno	2002				2003				2004				2005				2006			
mesi	gennaio - febbraio - marzo	aprile - maggio - giugno	luglio - agosto - settembre	ottobre - novembre - dicembre	gennaio - febbraio - marzo	aprile - maggio - giugno	luglio - agosto - settembre	ottobre - novembre - dicembre	gennaio - febbraio - marzo	aprile - maggio - giugno	luglio - agosto - settembre	ottobre - novembre - dicembre	gennaio - febbraio - marzo	aprile - maggio - giugno	luglio - agosto - settembre	ottobre - novembre - dicembre	gennaio - febbraio - marzo	aprile - maggio - giugno	luglio - agosto - settembre	ottobre - novembre - dicembre
periodo	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20

Sia per prima impostazione del modello sia per i successivi aggiornamenti sono richieste le seguenti fonti di dati ed informazioni:

1. i dati di ricarica da pioggia, per i quali si è fatto riferimento alle simulazioni di Criteria effettuate da ARPA SIMC per l'intera pianura emiliano-romagnola;
2. i dati di prelievo di acque sotterranee, per i quali si è fatto riferimento prima a [1] (Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003). *Modello matematico di simulazione delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Emiro3D)*, Elaborato di supporto Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna. Rapporto tecnico. Bologna.) per la definizione e distribuzione spazio temporale dei prelievi e poi [6] (Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008b). *Analisi preliminare degli effetti dei prelievi di acque sotterranee sulla evoluzione recente del fenomeno della subsidenza in Emilia-Romagna*. Rapporto tecnico.), per i successivi aggiornamenti, dove i dati relativi ai prelievi di acque sotterranee per i diversi usi sono stati sintetizzati fino all'anno 2006.
3. i dati piezometrici appartenenti alla rete di monitoraggio regionale delle acque sotterranee, e necessari alla definizione delle condizioni al contorno del modello ed al controllo dello stesso (validazione).

Lo schema funzionale del modello numerico è riportato nella Figura 3.8. In sintesi:

- il modello ricostruisce le complesse dinamiche del moto dell'acqua nel sottosuolo in rapporto alla capacità di ricarica del sistema (pioggia, rapporti falda-fiume) ed al suo sfruttamento (prelievi);
- in regime transitorio permette la valutazione delle variazioni di immagazzinamento di acqua all'interno del sistema;
- in output fornisce la distribuzione del carico idraulico ed i bilanci di massa (Figura 3.9) nello spazio e nel tempo. La distribuzione spazio temporale del carico idraulico costituisce il dato di INPUT per la successiva modellazione della subsidenza.

Figura 3.8: schema funzionale del modello numerico

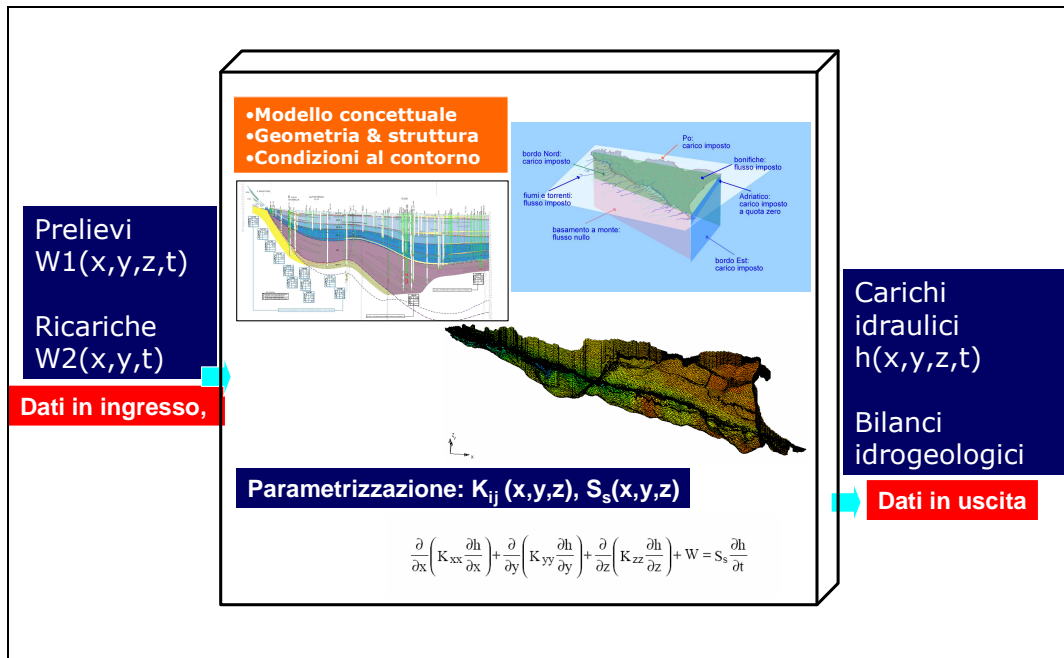
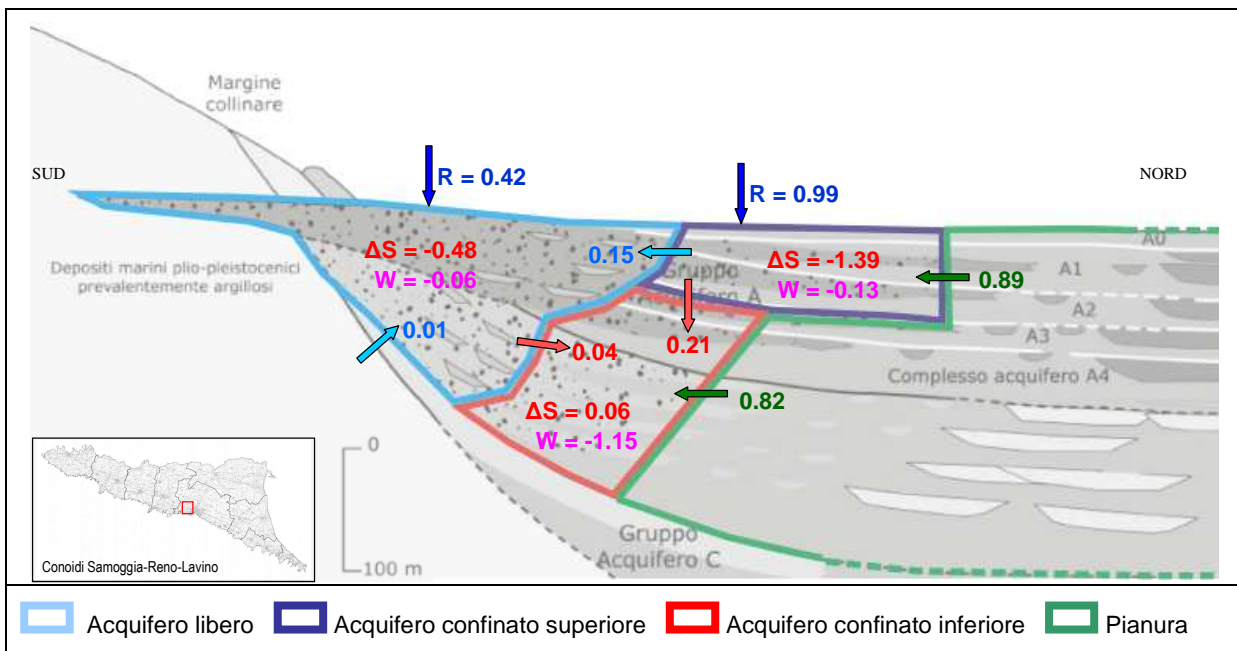


Figura 3.9: esempio di analisi del bilancio idrogeologico: schema di flusso delle acque sotterranee all'interno del raggruppamento di conoidi Samoggia-Reno-Lavino (portate in m³/s mediate per l'intero periodo di simulazione del modello, 2002-2006).



3.1.2 Il modello di subsidenza della conoide del Fiume Reno

In [2] (Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna e Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della Conoide Alluvionale del Fiume Reno*. Rapporto tecnico.) è stata eseguita l'implementazione del modello di flusso delle acque sotterranee della conoide alluvionale del fiume Reno e del relativo modello di subsidenza dovuta ad estrazione di acqua. L'impostazione iniziale di entrambi i modelli, che ha riguardato i 16 anni compresi tra il 1983 ed 1999 è stata successivamente verificata ed aggiornata in [5] (Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008a): *Approfondimenti sulla Conoide Alluvionale del Fiume Reno*, aggiornamento della modellistica e valutazione delle necessità di adeguamento della stessa in base a

specifiche esigenze. Rapporto tecnico. Bologna. 77 pp.) estendo così la copertura temporale del modello a tutto il 2006.

Il modello di subsidenza è basato sulla relazione fondamentale che esprime il processo di consolidazione verticale di un ammasso poroso saturo ([12], Verruijt A. (2004). *Soil Mechanics*. Delft University of Technology. e [13], Verruijt A. (1995). *Computational geomechanics*. Kluwer Academic Publishers.):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad \text{Equazione 3.1: equazione di governo del processo di consolidazione}$$

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. La compressibilità dell'acqua è stimata in genere nell'ordine di 0,45 m²/kN, ma può diventare molto più elevata in presenza di gas come il metano.

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 [18] (Comune di Bologna, Regione Emilia-Romagna, Idroser S.p.A., (1989). *Studio sul fenomeno della subsidenza nel territorio bolognese*), 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 3.1 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.

Da questo punto di vista, in realtà, Verruijt in generale schematizza la soluzione con un sistema accoppiato di equazioni in cui pressione e deformazione vengono calcolate simultaneamente. Il sistema di equazioni completo, nei termini della pressione e dello spostamento in tre dimensioni per un materiale omogeneo è il seguente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial t} &= n\beta \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \left(\frac{k}{\gamma_w} \nabla p \right) \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial x} + \mu \nabla^2 u_x - \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial y} + \mu \nabla^2 u_y - \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon_{vol}}{\partial z} + \mu \nabla^2 u_z - \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned}$$

Equazione 3.2

in cui ε_{vol} è la deformazione volumetrica, λ e μ le costanti di Lamè che esprimono l'elasticità del mezzo. La deformazione volumetrica è la somma delle deformazioni lineari nello spazio:

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$$

che dipendono dalle componenti delle deformazioni:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, & \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right), & \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y}, & \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right), & \varepsilon_{yx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z}, & \varepsilon_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right), & \varepsilon_{zy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \text{Equazione 3.3}$$

La prima delle 3.2 è l'equazione del flusso nei termini dell'immagazzinamento.

La soluzione accoppiata in questa forma, tuttavia, introduce una semplificazione non trascurabile a carico della conduttività idraulica, che qui è considerata per il solo mezzo isotropo. Da questo punto di vista, il disaccoppiamento rappresenta un vantaggio, dato che – pur con tutte le forti limitazioni di ModFlow – la soluzione del problema del flusso considera quantomeno la conduttività idraulica verticale ben differenziata da quella degli altri due assi.

Il disaccoppiamento introduce anche il problema di una diversa scansione nel tempo dei due processi, dato che la soluzione dell'equazione del flusso è organizzata, per le ragioni operative ampiamente descritte nel paragrafo che segue, con cicli di tempo relativamente lunghi, mentre la compattazione ha esigenze diverse legate al coefficiente di consolidazione.

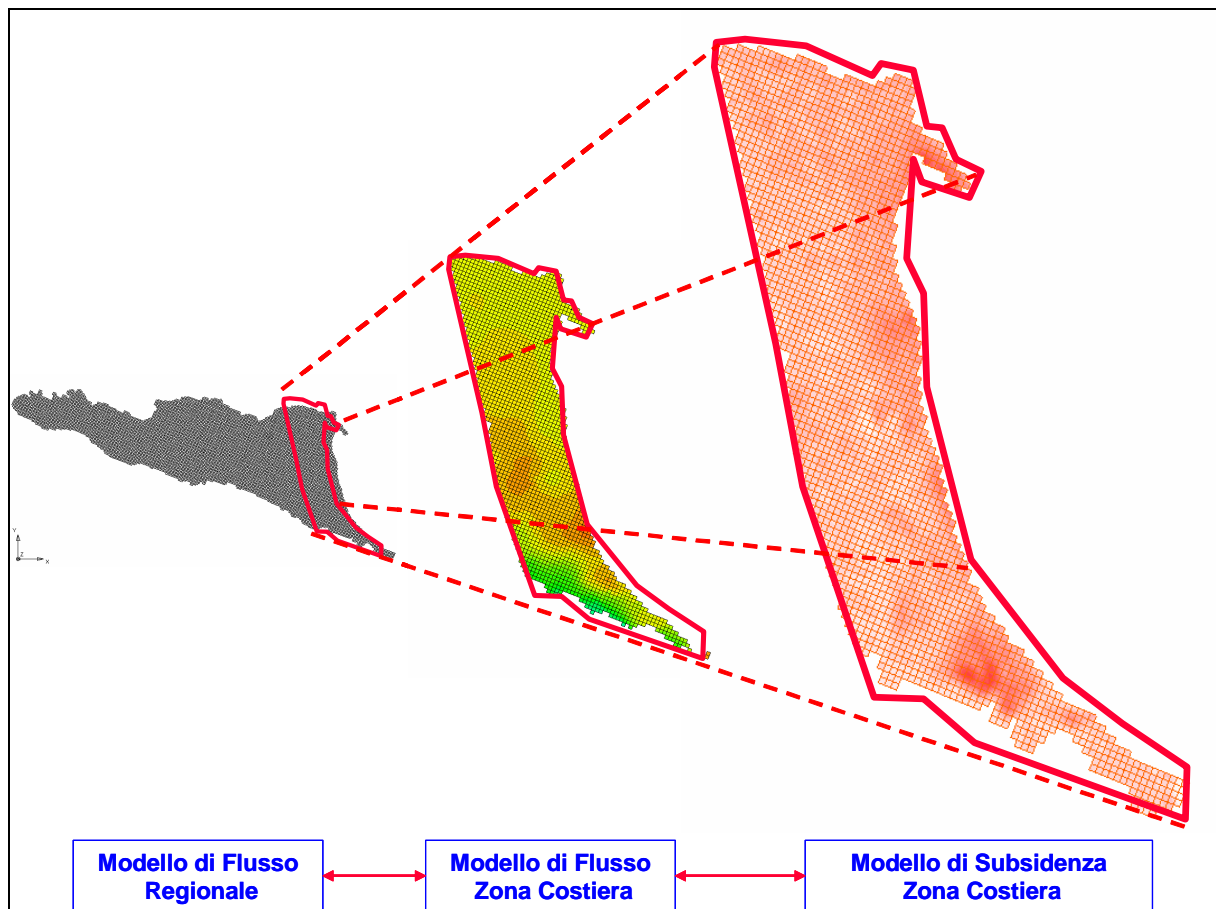
3.1.3 Possibilità applicative di integrazione modellistica del flusso e della subsidenza per la fascia costiera

Per lo sviluppo del modello di flusso e subsidenza per la fascia costiera sono state condotte una serie di valutazioni, anche in funzione di quanto emerso dall'analisi degli studi di settore (paragrafo 2), ed hanno portato ad una serie di scelte operative che vengono di seguito descritte.

In particolare gli elementi di valutazione hanno riguardato:

1. le possibilità operative e di utilizzo degli strumenti modellistici precedentemente descritti ai paragrafi 3.1.1 per il modello di flusso regionale e 3.1.2 per il modello di subsidenza in conoide Reno;
2. le diverse scale spazio temporali utilizzate nelle applicazioni di modellazione del flusso (regionale) e subsidenza (Conoide Reno) che derivano sia dalla disponibilità dei dati di base sia dai vincoli imposti dai modelli numerici stessi, nonché le strutture geologiche ed idrostratigrafiche alla base della parametrizzazione idrogeologica;
3. le possibilità di collegamento del codice di calcolo realizzato ad hoc per il progetto sulla conoide del Fiume Reno all'intero modello di flusso della pianura emiliano-romagnola o a singole parti di questo. Tale collegamento garantirà il necessario livello di comunicazione tra il modello di flusso e quello di subsidenza relativamente ai dati in uscita dal primo a favore del secondo;
4. la necessità di creare uno strumento dedicato all'analisi specifica delle problematiche della zona costiera (prelievi di acque sotterranee-dinamica del flusso-dinamica della subsidenza);
5. la volontà di mantenere un collegamento dinamico e di mutuo scambio di dati nelle successive fasi di aggiornamento tra il modello di flusso della fascia costiera ed il modello esistente sull'intero territorio regionale;

Figura 3.10: creazione del modello di flusso delle acque sotterranee EMIRO-COSTA a partire del modello regionale EMIRO-II.



In termini operativi tali valutazioni condotte hanno portato alle seguente impostazione del lavoro:

1. creazione di una specifica applicazione modellistica del flusso delle acque sotterranee focalizzata sulla zona costiera di interesse (denominata EMIRO-COSTA) del presente studio operando un taglio del modello regionale (denominato EMIRO-II) secondo lo schema di Figura 3.10 (linea ad ovest distante circa 20 km dalla linea di costa);
2. implicitamente al punto precedente è l'assunzione di idoneità della discretizzazione spazio-temporale del modello regionale EMIRO-II ad essere adottata anche per l'applicazione limitata alla zona costiera;
3. conseguente ai due punti precedenti è la possibilità di creazione di una banca dati di collegamento tra il modello regionale ed il modello della zona costiera in modo da poter mantenere l'aggiornamento reciproco dei due modelli relativamente ai dati di prelievi, ricariche, condizioni al contorno, ecc.
4. mantenimento per il modello EMIRO-COSTA della struttura del modello EMIRO-II (geometria, distribuzione litologica, parametrizzazione acquiferi, condizioni al contorno nord, sud, lato mare) prevedendo però ulteriori e successive fasi di verifica ed affinamento;
5. impostazione della condizione al contorno del lato entroterra attraverso la distribuzione del carico idraulico del modello regionale EMIRO-II ed in modo tale da allineare il comportamento dei due modelli (analisi del flusso e del bilancio idrogeologico lungo la linea A-A' di Figura 3.10)
6. esecuzione di ulteriori verifiche ed eventuale ricalibrazione del modello di flusso EMIRO-COSTA;
7. creazione e sviluppo di una interfaccia grafica per il codice di calcolo della subsidenza associato al modello di flusso EMIRO-COSTA;
8. calibrazione del modello di subsidenza ed eventuale ricalibrazione del modello di flusso.

3.1.4 Analisi dei dati di base necessari all'applicazione modellistica di flusso e subsidenza

3.1.4.1 Dati geognostici

Allo scopo di poter effettuare verifiche di dettaglio sulla distribuzione delle litologie presenti all'interno del modello di flusso EMIRO-COSTA sono state riprese le informazioni presenti nella banca dati geognostici della Regione Emilia-Romagna che già in [1] (Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003). *Modello matematico di simulazione delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Emiro3D)*, Elaborato di supporto Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna. Rapporto tecnico. Bologna.) erano state alla base della prima impostazione strutturale del modello di flusso delle acque sotterranee regionale. Tali informazioni sono state rielaborate in modo da poter essere utilizzate per le successive fasi di calibrazione del modello di flusso.

La successiva Figura 3.11 mostra la distribuzione in pianta delle stratigrafie disponibili mentre le successive figure da Figura 3.12 a Figura 3.14 mostrano da Nord a Sud lo sviluppo in profondità delle stratigrafie in rapporto alla discretizzazione verticale del modello che individua il volume di acquifero da modellare.

Figura 3.11: Banca dati geognostici della Regione Emilia-Romagna: vista in pianta



Figura 3.12: Banca dati geognostici della Regione Emilia-Romagna: vista 3d della zona nord del modello (Ferrara) compresa tra il piano campagna e la base del Gruppo Acquifero A [36]

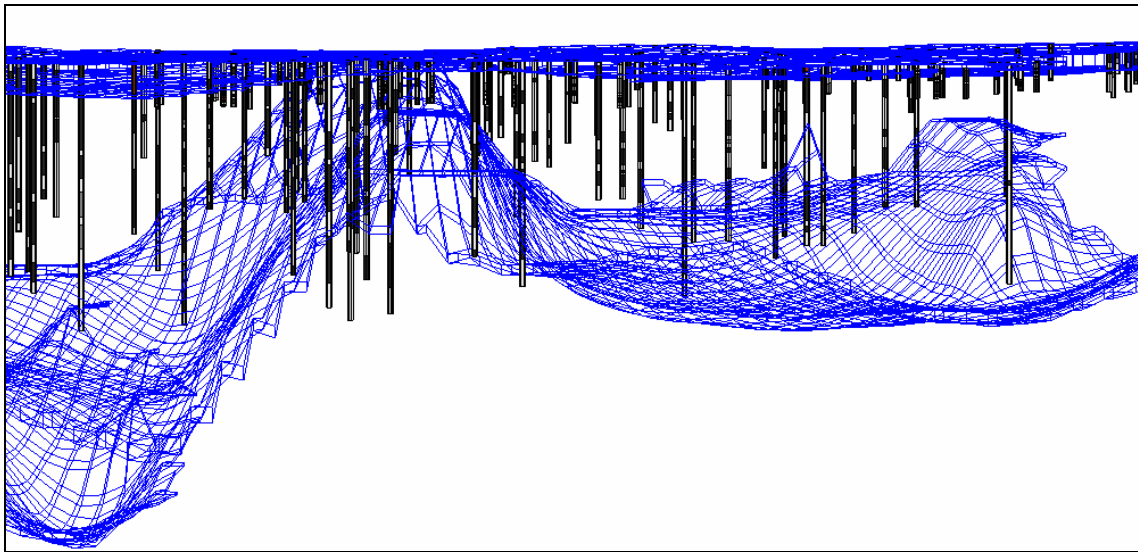


Figura 3.13: Banca dati geognostici della Regione Emilia-Romagna: vista 3d della zona centrale del modello (Ravenna). Nella figura sono rappresentate anche le basi dei Gruppi Acquiferi A e B [36]

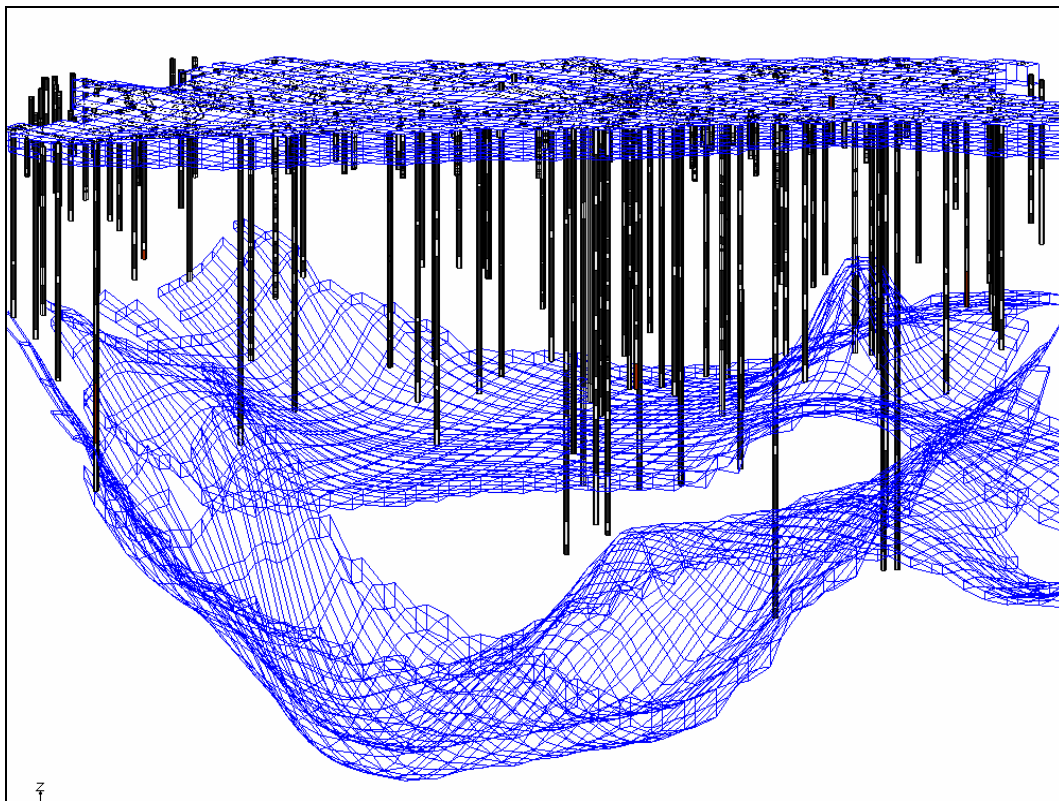
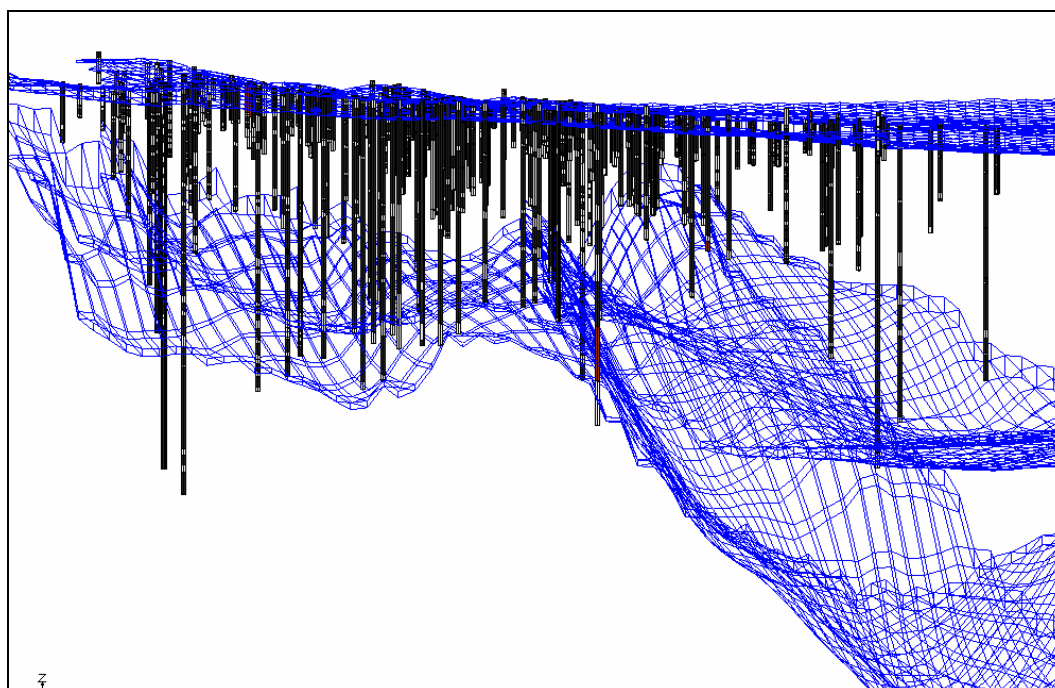


Figura 3.14: Banca dati geognostici della Regione Emilia-Romagna: vista 3d della zona sud del modello (Forlì e Rimini). Nella figura sono rappresentate anche le basi dei Gruppi Acquiferi A e B [36]



3.1.4.2 Dati piezometrici

I dati piezometrici disponibili fanno riferimento alla Rete Regionale di Monitoraggio delle Acque Sotterranee. Il numero di pozzi con un numero di misure superiori a 6 nei 5 anni 2002-2006 è riportato in Figura 3.16 e Tabella 3.1. Alcuni andamenti piezometrici sono riportati nella successiva Figura 3.15 mentre nella Figura 3.17 è riportata una analisi delle variazioni medie annue calcolate sulle serie storiche disponibili e relative agli anni 2002-2006. In tale figura vengono evidenziate le quote medie del carico idraulico in corrispondenza delle quali si assiste ad una loro diminuzione nel tempo.

Figura 3.15: rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee, andamento piezometrico sui quattro punti di misura indicati nella successiva Figura 3.16

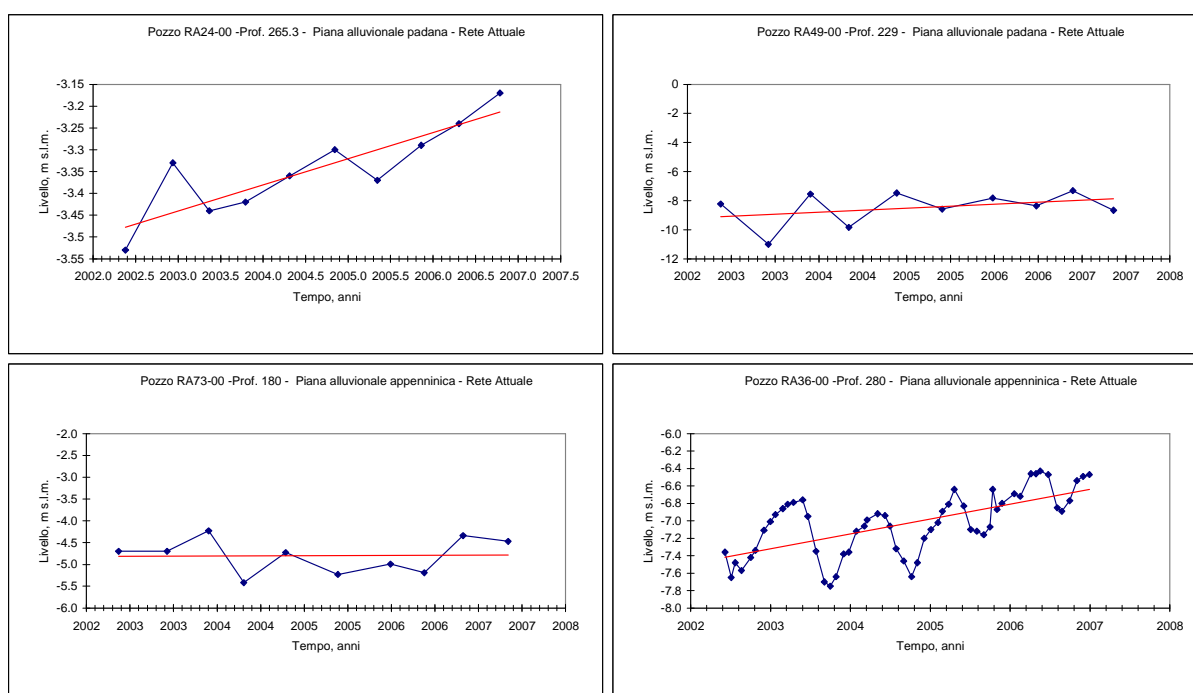


Figura 3.16: rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee, pozzi presenti nell'area di studio suddivisi in base al Gruppo Acquifero captato.

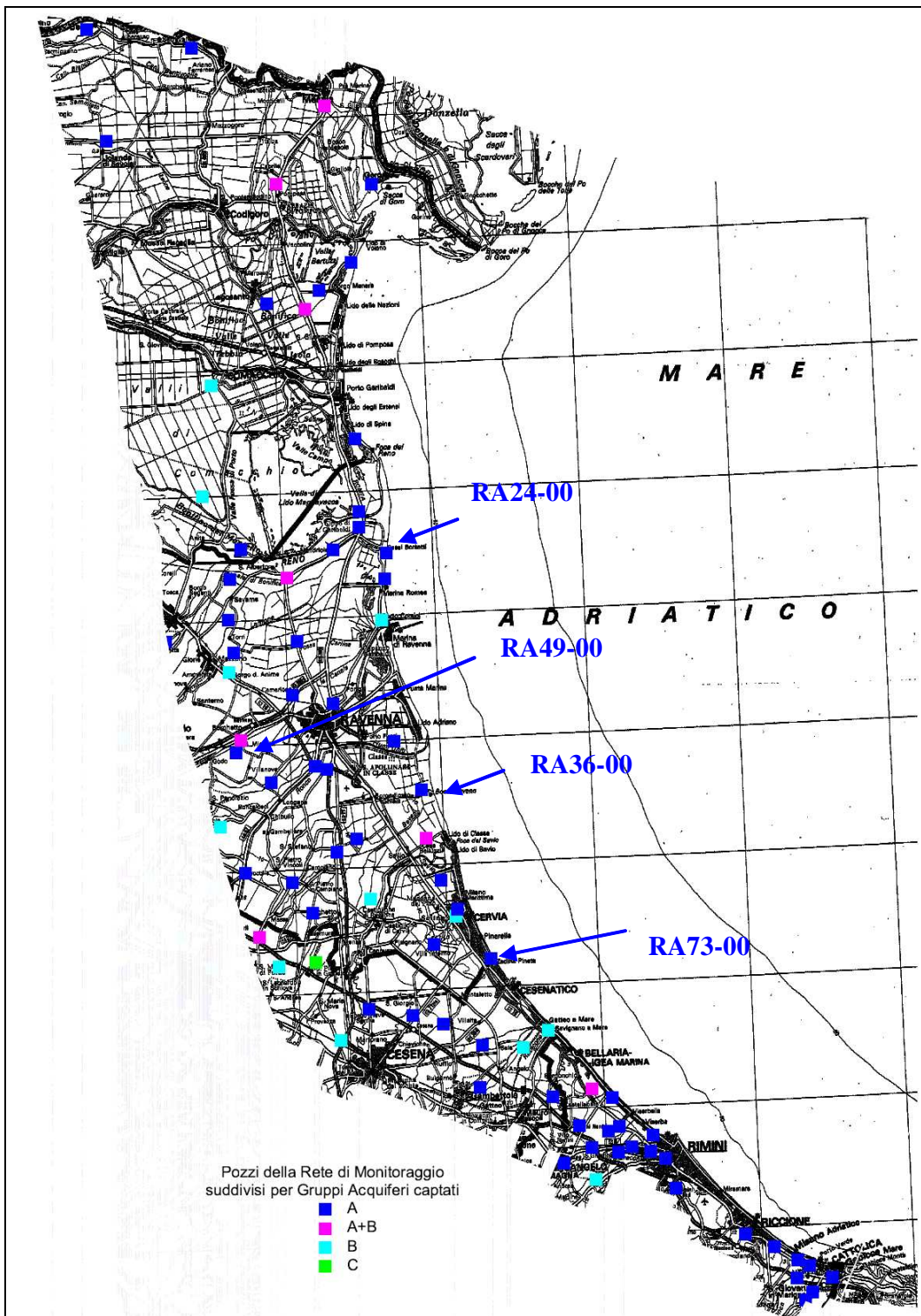
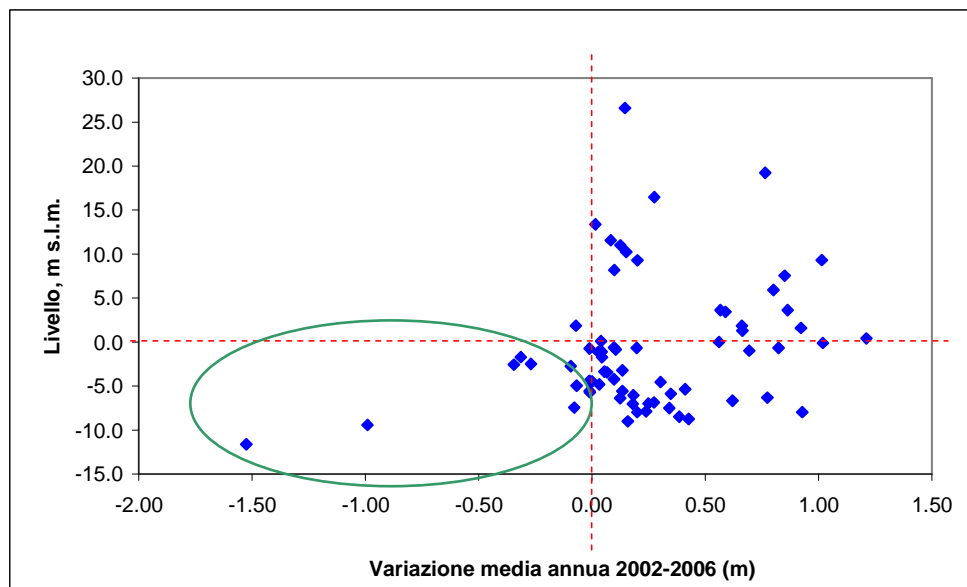


Tabella 3.1: consistenza delle misure piezometriche della rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee. Pozzi all'interno della zona di studio.

Corpo Idrico	codice pozzo	2002	2003	2004	2005	2006
Conoide Savio - confinato superiore	FC25-00	2	2	2	2	2
	FC27-00	2	2	2	2	2
	FC41-00	2	2	2	2	2
Conoide Savio - confinato inferiore	FC75-00	8	12	12	12	12
Conoide Marecchia – libero	RN21-02	2	2	2	4	4
	RN33-01	2	2	2	4	4
Conoide Marecchia - confinato superiore	FC70-00	2	2	2	2	2
	RN29-00	2	2	2	2	2
	RN30-00	2	2	2	2	2
	RN31-01	2	2	2	4	4
	RN34-00	2	2	2	12	12
	RN59-00	2	2	2		2
	RN60-01	2	2	2	4	4
	RN71-00	2	2	2	4	3
	RN72-00	2	2	1	4	4
	RN73-00	2	2	2	4	4
	RN74-00	1	2		4	4
Conoide Conca – libero	RN38-01	2	2	2	2	2
Conoide Conca - confinato superiore	RN36-00	2	2	2	2	2
	RN62-00	2	2	2	2	2
	RN67-00	2	2	2	12	12
	RN68-00	2	2	2	4	4
	RN70-00	2	2	1	4	4
Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore	FC18-00	2	2	2	2	2
	FC22-00	2	2	2	2	2
	RA20-00	2	2	2	2	2
	RA34-00	2	2	2	2	2
	RA34-02	2	2	2	2	2
	RA42-01	2	2	2	2	2
	RA54-02	2	2	2	2	2
	RA67-00	2	2	2	2	2
	RA67-01	2	2	2	2	2
	RA73-00	2	2	2	2	2
	RN63-01	2	2	2	2	2
RN66-00	2	2	2	2	2	
Transizione Pianura Appenninica-Padana - confinato superiore	RA81-01	2	2	2	2	2
Pianura Alluvionale Padana - confinato superiore	FE13-01	2	2	2	2	2
	FE15-00	2	2	2	2	
Pianura Alluvionale Costiera - confinato	FE16-00	2	2	2	2	2
	FE18-01	2	2	2	2	2
	FE21-00	2	2	2	2	2
	FE54-01		1	2	2	2
	FE65-00	2	2	2	2	2
	FE69-00	2	1	2	2	2
	FE70-00	2	2	2	2	2
	FE71-00	2	2	2	2	2
	RA09-01	2	2	2	2	2
	RA12-01	2	2	2	2	2
	RA13-02	2	2	2	2	2

Corpo Idrico	codice pozzo	2002	2003	2004	2005	2006
	RA24-00	2	2	2	2	2
RA24-01	2	2	2	2	2	
RA29-00	2	2	1	2	2	
RA33-00	2	2	2	2	2	
RA36-00	8	12	12	12	12	
RA41-02	2	2	2	2	2	
RA45-01	2	2	2	2	2	
RA53-04			2	2	2	
RA66-01		2	2	2	2	
RA84-01	2	2	2	2	2	
Pianura Alluvionale - confinato inferiore	FC16-01		2	2	2	2
	FC43-00	2	2	1		
	FC52-00	1	2	2	1	3
	FC77-00	2	2	2	4	4
	RA14-01	2	2	2	2	2
	RA30-00	1	2	2	2	2
	RA35-00	2	2	2	2	2
	RA38-00	2	2	2	2	2
	RA39-00	2	2	2	2	2
	RA47-00	8	12	12	12	12
	RA49-00	2	2	2	2	2
	RA54-01	2	2	2	2	2
	RA82-00	2	2	2	2	2
	RA23-00	2	2	2	1	

Figura 3.17: analisi delle variazioni piezometriche nel periodo 2002-2006 (variazione media annua, m)

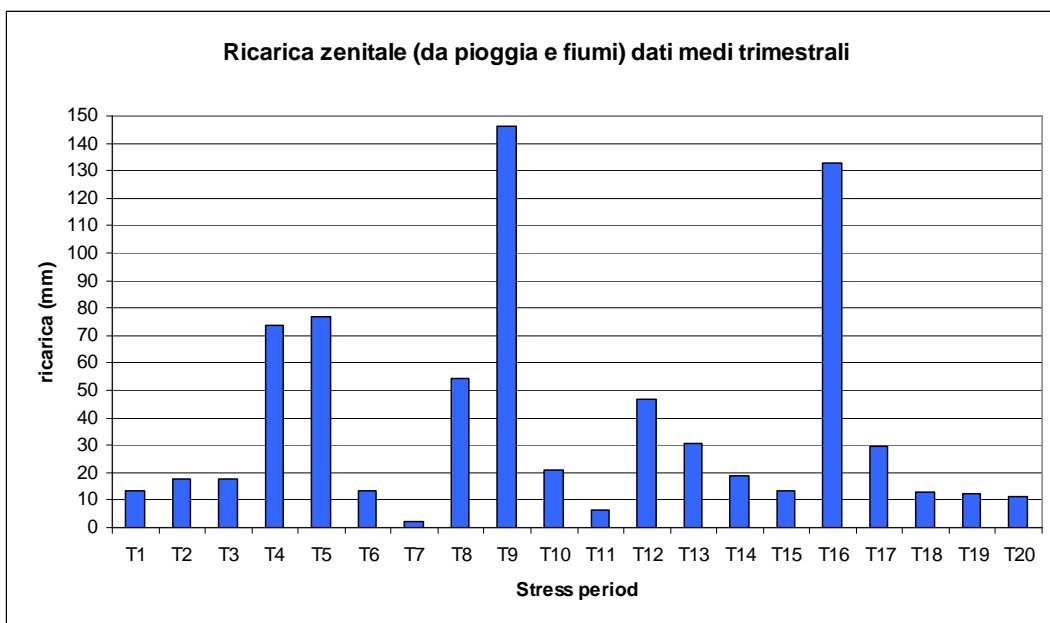


3.1.4.3 Alimentazione dell'acquifero

L'alimentazione del sistema viene stimata, per la parte meteorica, a partire dai dati derivanti dalle simulazioni di Criteria effettuate dal ARPA-SIMC per l'intero areale di pianura; Criteria [47] effettua il bilancio idrico del suolo tenendo conto delle caratteristiche pedologiche e colturali dello stesso nonché della dinamica giornaliera delle precipitazioni. Del bilancio idrico il termine che viene utilizzato è relativo al drenaggio profondo che corrisponde all'acqua in eccesso che è quindi in grado di liberarsi a favore degli

strati più profondi. Nella Figura 3.18 è riportata l'evoluzione temporale del termine di alimentazione così come imposto in ingresso al modello di flusso.

Figura 3.18: stima della ricarica zenitale (mm)



3.1.4.4 Prelievi di acque sotterranee

I prelievi di acque sotterranee attribuiti al modello numerico di flusso sono riportati nelle figure seguenti che ne mostrano, in funzione dei diversi usi i volumi complessivi relativamente ai cinque anni di simulazione considerati (Figura 3.19), la distribuzione in pianta (Figura 3.20) ed in verticale (Figura 3.21).

Figura 3.19: prelievi di acque sotterranee all'interno dell'area di studio (dati in milioni di m³)

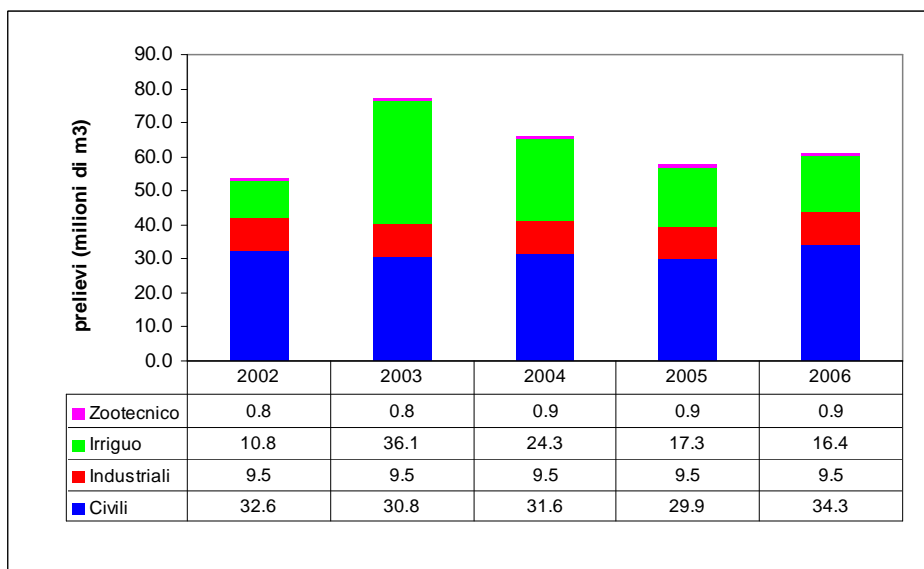


Figura 3.20: distribuzione in pianta dei prelievi di acque sotterranee per i diversi usi.

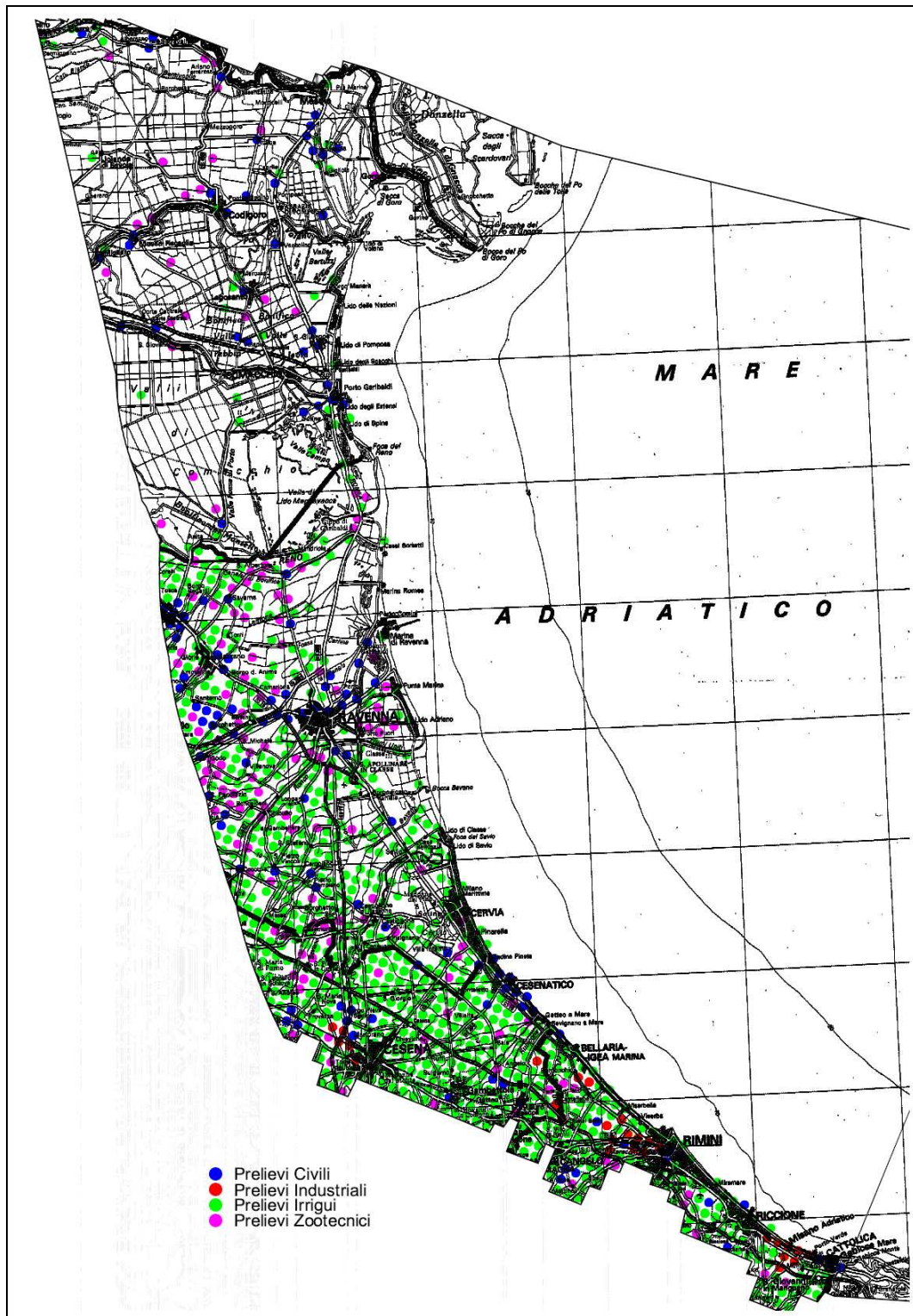
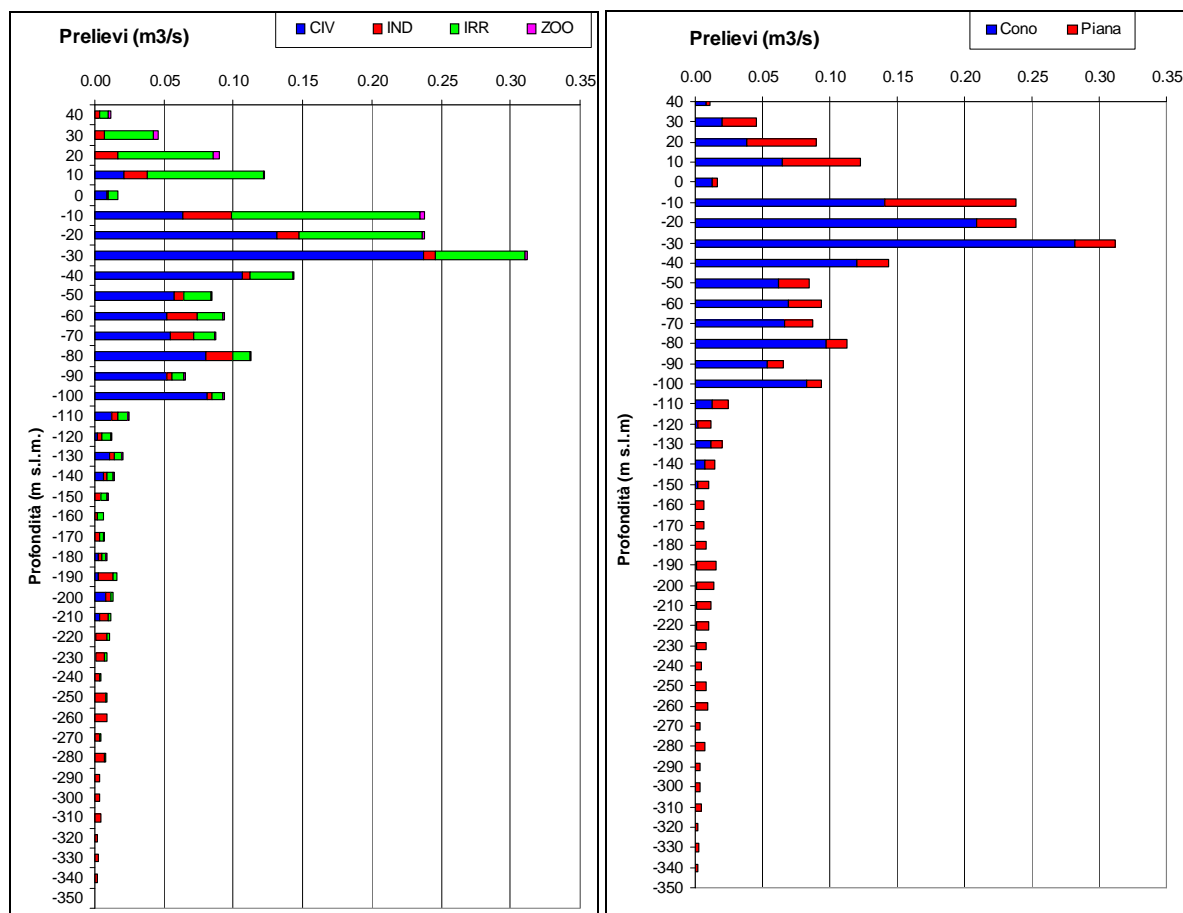


Figura 3.21: distribuzione dei prelievi lungo la verticale distinti per uso (a sinistra) e per tipologia di corpo idrico (di pianura o di conoide, immagine a destra)



3.1.4.5 Dati di compressibilità

Col supporto dell'Università degli Studi di Bologna (Dipartimento DICAM) è stata condotta una la revisione critica dei valori di compressibilità utilizzati dal modello numerico di flusso e subsidenza realizzato per la conoide del fiume Reno ([2], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna e Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della Conoide Alluvionale del Fiume Reno*. Rapporto tecnico.). Tutto ciò anche in funzione di una possibile estensione del modello di subsidenza per lo studio della compattazione degli acquiferi in altri ambiti regionali.

L'attività condotta ha riguardato un'approfondita revisione critica della bibliografia relativa alle misure dei coefficienti di compressibilità delle formazioni in oggetto, e più in generale, della pianura padana e dell'offshore adriatico (Bibliografia citata da [22] a [34]). Inoltre, sono stati consultati gli archivi del laboratorio di Ingegneria Mineraria del Dipartimento DICAM riguardo alle numerose misure del coefficiente di compressibilità monoassiale eseguite negli ultimi 30 anni su campioni di provenienza regionale simili a quelli indagati nel presente studio.

In particolare per una possibile applicazione del modello di subsidenza per la zona costiera, partendo dalle classi litologiche utilizzate nel modello di flusso delle acque sotterranee, è stata condotta una revisione critica dei dati di riferimento presenti in bibliografia e di quelli ottenuti dalle analisi di laboratorio in possesso del DICMA. È stata quindi elaborata la seguente tabella (Tabella 3.2), in cui sono indicati i valori del coefficiente di compressibilità monoassiale tipici della pianura alluvionale del ravennate fino a profondità dell'ordine dei 500 m. L'intervallo dei valori tiene conto della profondità delle formazioni: a minore profondità (da 50 a 100 m) corrisponde il valore maggiore del coefficiente di compressibilità monoassiale; viceversa per le formazioni a maggior profondità (fino a 400 – 500 m).

Tabella 3.2: valori di riferimento del parametro compressibilità relativi alle litologie presenti nel modello di flusso. Dati in m^2/kN

Id GMS	Litologia semplificata	Compressibilità mv ($m^2 \cdot kN^{-1}$) proposta, intervallo	Compressibilità mv ($m^2 \cdot kN^{-1}$) proposta, valor medio
214	ghiaia	$3 \cdot 10^{-7} \div 9 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$
300	ghiaia		
1	ghiaia		
2	sabbia media		
3	sabbia media		
24	sabbia media		
4	sabbia fine	$7 \cdot 10^{-6} \div 7 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
5	sabbia fine		
6	sabbia fine		
7	sabbia argillosa		
8	sabbia argillosa		
25	sabbia argillosa		
9	sabbia argillosa	$1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
10	sabbia argillosa		
11	limo sabbioso		
12	limo sabbioso		
26	limo sabbioso		
13	limo sabbioso		
14	limo sabbioso		
15	limo sabbioso		
16	limo argilloso		
17	limo argilloso		
27	limo argilloso		
18	limo argilloso		
19	limo argilloso		
20	argilla limosa		
28	argilla limosa		
21	argilla limosa		
22	argilla limosa		
23	argilla limosa		
29	argilla limosa		

3.1.4.6 Dati di subsidenza

La Figura 3.22 riporta la velocità media di abbassamento del suolo nel periodo 2002-2006 ([4], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007b). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica*. Rapporto tecnico.). Il periodo di riferimento coincide con quello del modello di flusso e quindi la Figura 3.22 può essere assunta come riferimento per la calibrazione del modello di subsidenza. La successiva Figura 3.23 rappresenta la stessa informazione della figura precedente questa volta espressa come valore (in cm) di abbassamento cumulato nei cinque anni. Entrambe le figure mostrano che, in riferimento alla zona costiera le zone che denotano nel periodo 2002-2006 i maggiori tassi di subsidenza sono da nord a sud:

- Lido delle Nazioni ed a nord fino alla zona del Delta de Po;
- da Casal Borsetti fino alla Foce del Reno;
- tra Lido di Classe e Lido Adriano
- a Sud di Cesenatico all'interno del quadrilatero Cesena-Cesenatico-Bellaria-Savignano sul Rubicone;
- a Rimini

Il modello di subsidenza realizzato simula tale fenomeno come conseguenza dei soli prelievi da falda e di ciò si dovrà tener conto nelle fasi di calibrazione del modello. Risulta quindi necessaria una preventiva valutazione per lo meno qualitativa e se possibile quantitativa, in merito alle altre due componenti che sono concause dei valori di subsidenza complessiva misurati e documentati in Figura 3.22:

- la subsidenza naturale
- la subsidenza dovuta ad estrazione di altri fluidi dal sottosuolo (gas principalmente).

Questi due aspetti vengono trattati nei successivi due paragrafi.

Figura 3.22: movimento verticale del suolo 2002-2006 (mm/anno)

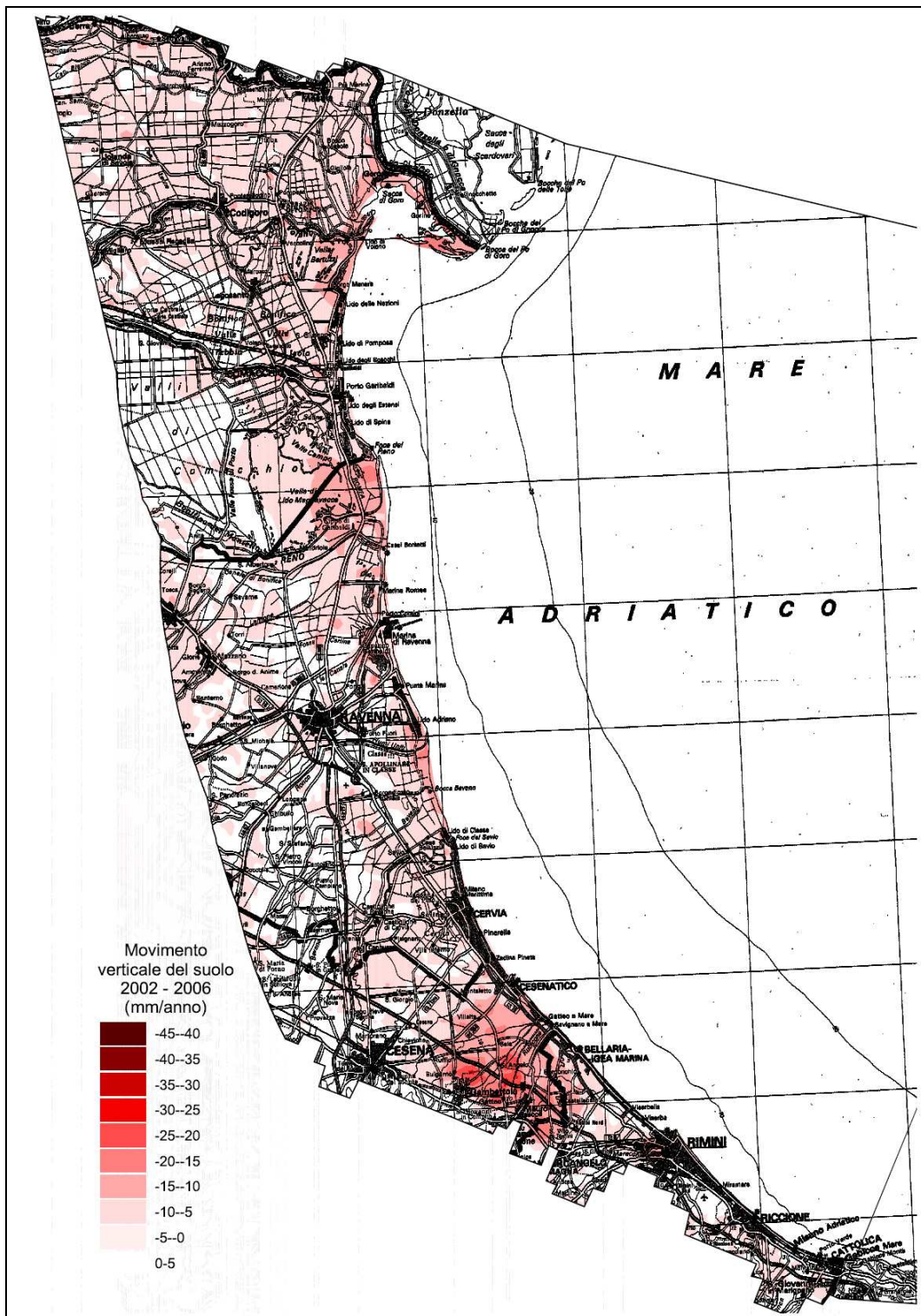
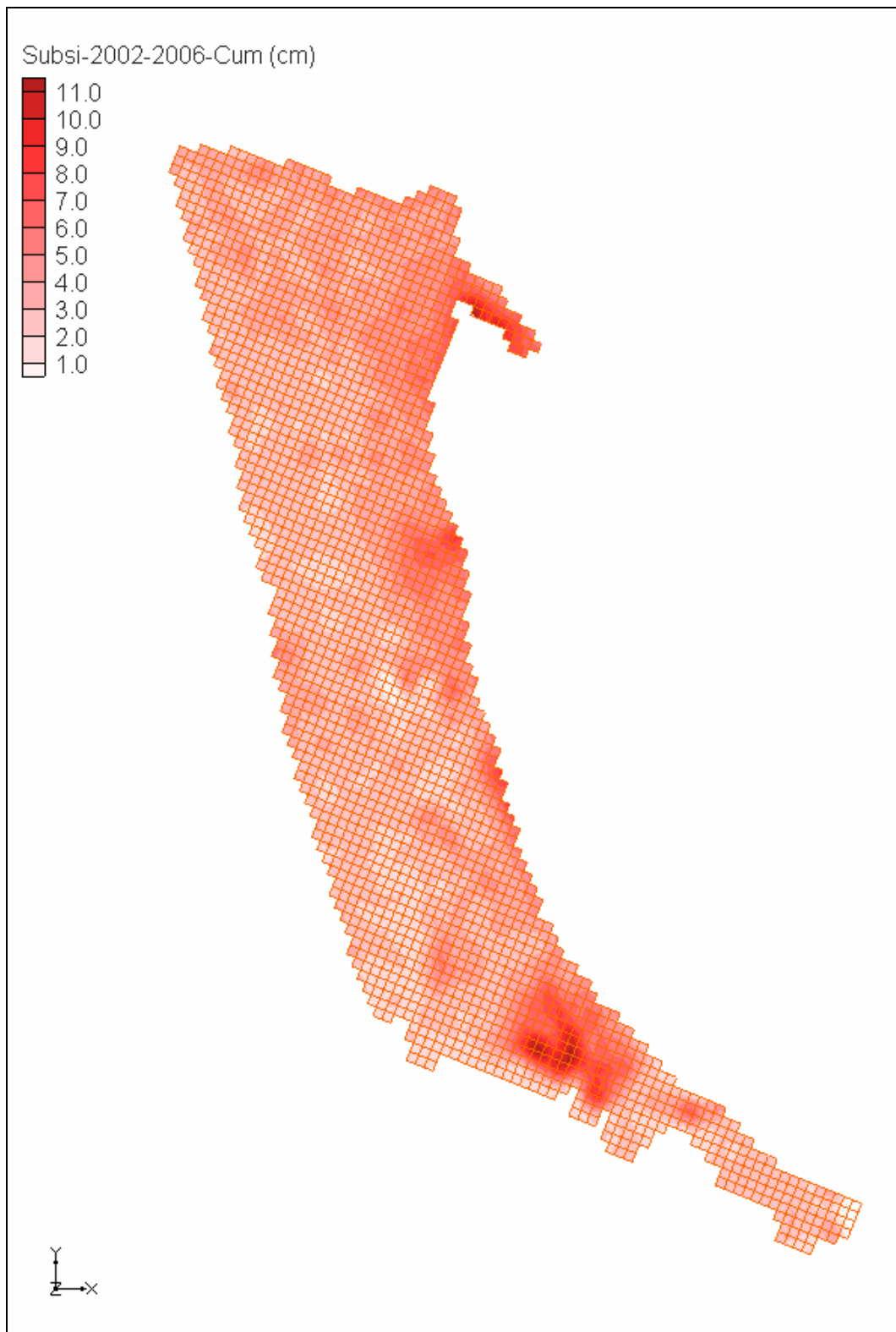


Figura 3.23: abbassamenti cumulati misurati nel periodo 2002-2006 (cm)



3.1.4.6.1 Dati di subsidenza naturale

Ai fini della valutazione del contributo della subsidenza naturale si è fatto riferimenti ai seguenti riferimenti bibliografici:

1. Carminati E. E Martinelli G. (2002), *Subsidence rates in the Po plain, Northern Italy: the relative impact of Natural and Anthropogenic causation*, in «Engineering Geology», Vol. 66 [19]

2. Carminati E., Martinelli, G. E Severi P. (2003), *Influence of glacial cycles and tectonics on natural subsidence in the Po Plain, Northern Italy: insights from C 14 ages*, in « Geochemistry, Geophysics, Geosystems», Vol. 4, n. 10[20]
3. Carminati E., Doglioni C. E Scrocca D., (2003). *Apennines subduction-related subsidence of Venice (Italy)*, in «Geophysical Research Letters», Vol. 30, n. 13[21]

La subsidenza naturale è controllata principalmente da due classi di processi, che agiscono su scale di tempo differenti: i processi geodinamici e sedimentologici (subduzione, carico dei sedimenti e compattazione) e i processi climatici (cicli glaciali). I primi agiscono su scale di tempo dell'ordine di milioni di anni, e sono gli stessi che hanno determinato la formazione e il sollevamento delle catene alpina e appenninica, mentre i secondi hanno ciclicità dell'ordine di decine di migliaia di anni. La diversa scala temporale permette di separare le componenti della subsidenza dovute ai due fenomeni.

Subsidenza per processi geodinamici e sedimentologici:

i processi geodinamici e sedimentologici attivi in Pianura Padana agiscono da alcuni milioni di anni e la subsidenza ad essi associata viene definita come «di lungo periodo». La subsidenza di lungo periodo è dovuta ad almeno tre fattori:

1. la tettonica (l'insieme delle deformazioni geologiche che interessano la zona);
2. il peso dei sedimenti;
3. la compattazione dei sedimenti.

Gli ultimi due fattori contribuiscono all'abbassamento del suolo per il 25 per cento ciascuno, mentre la tettonica è responsabile del restante 50. La compattazione dei sedimenti è un processo di perdita di volume estremamente rapido, legata principalmente all'espulsione dell'acqua; il carico dei sedimenti che si depositano provoca la compattazione dei sedimenti sottostanti e produce ulteriore spazio per la deposizione di nuovi sedimenti.

I processi di deformazione tettonica, responsabili del 50 per cento della subsidenza di lungo periodo sono legati al funzionamento dinamico della Terra. L'Italia settentrionale è uno dei pochi posti al mondo in cui due subduzioni avvengono l'una a ridosso dell'altra. In quest'area, interagiscono la placca europea, che comprende parte dell'Europa centro-occidentale, la placca adriatica, che comprende il Mare Adriatico e la Pianura Padana, e la placca tirrenica, che comprende il Mare Tirreno.

Un insieme di dati che permette di determinare la velocità di subsidenza di lungo periodo, proviene dall'analisi dei fossili presenti nei sedimenti delle stratigrafie dei pozzi profondi che a partire dagli anni cinquanta sono stati perforati in Pianura Padana e nell'off-shore adriatico per la ricerca di idrocarburi.

Un fossile che si è dimostrato adatto per la datazione dei sedimenti è *Hyalinea balthica*, una specie di foraminiferi apparsa nel Mare Mediterraneo 1.43 Ma. La velocità di sedimentazione è stata ricavata dividendo lo spessore dei sedimenti degli ultimi 1.43 Ma per il tempo che hanno impiegato a depositarsi.

Le velocità di sedimentazione registrate in corrispondenza dei singoli pozzi sono state interpolate spazialmente in modo da ottenere la mappa delle velocità di subsidenza dell'intera Pianura Padana. I risultati mostrano che la subsidenza tende a diminuire ai bordi e ad aumentare verso il centro. I valori massimi si raggiungono dove scorre il Po, o a sud di esso, e aumentano, anche se in modo irregolare, da nord verso sud, e da occidente (Piemonte) a oriente (delta del Po).

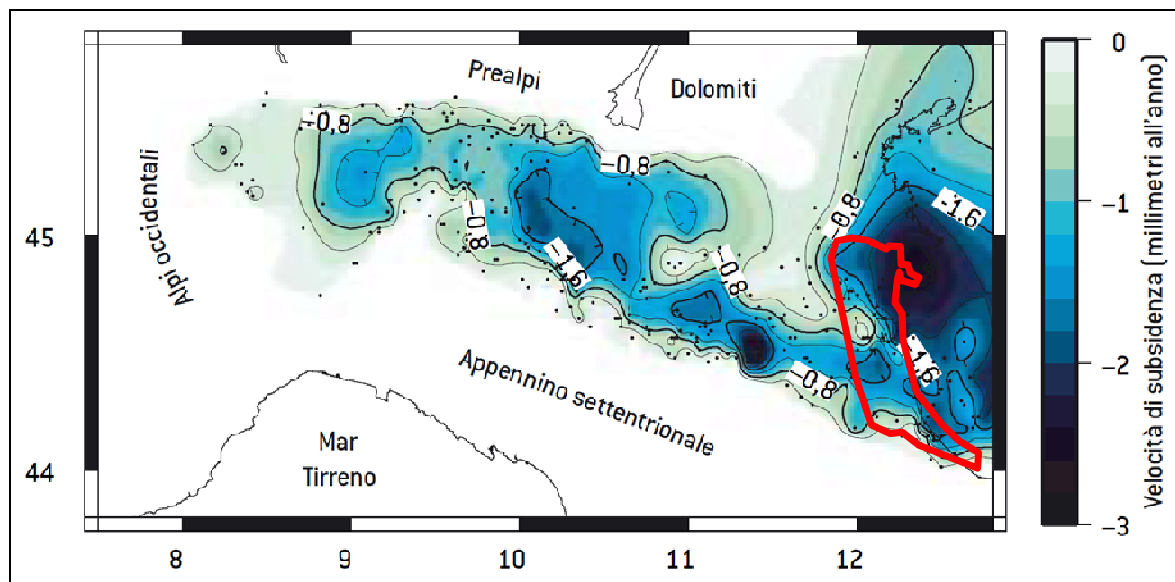
In quest'ultima zona le velocità di subsidenza naturale di lungo periodo sono dell'ordine di 2.5 millimetri all'anno. Anche lungo la costa adriatica i valori diminuiscono via via che ci si allontana dal corso del F.Po. Nella zona di Venezia, la velocità di subsidenza di lungo periodo è di 1 millimetro all'anno, mentre nella zona di Ravenna è di circa 1.4.

Subsidenza per processi climatici:

un contributo di subsidenza in Pianura Padana è fornito dagli effetti dell'ultima deglaciazione. Lo studio di tale fenomeno richiede l'uso di banche dati diverse dalle precedenti, perché le stratigrafie dei pozzi profondi per la ricerca di idrocarburi hanno un dettaglio insufficiente per questo scopo. Le velocità di subsidenza legate a questo fattore sono state stimate mediante la datazione e la valutazione degli spessori dei sedimenti che si sono depositi negli ultimi 10.000 anni mediante misura del carbonio-14 presente in frammenti organici (pezzi di legno gusci, terreni torbosi). Gli studi della subsidenza causata dallo scioglimento del ghiaccio mostrano una risposta complessa e varia da nord a sud; nella zona di Venezia la componente dovuta alla deglaciazione è estremamente ridotta, e produce un aumento della velocità da 1 (componente di lungo periodo) a 1.1 millimetri all'anno.

Nella parte meridionale della zona costiera, invece, gli aumenti sono più consistenti; nella zona di Ravenna la componente di deglaciazione è di circa 2 millimetri all'anno e porta la velocità di subsidenza da 1.4 (componente di lungo periodo) a 3.5 millimetri all'anno.

Figura 3.24: abbassamento naturale. la subsidenza naturale di lungo periodo è stata calcolata tramite dati provenienti da perforazioni di pozzi. Le velocità di subsidenza più elevate si riscontrano nella parte centrale della pianura, in particolare nella zona del delta del Po. I punti neri indicano la posizione dei pozzi che sono stati usati per effettuare le stime. Fonte [21].



La Figura 3.24 riporta la distribuzione dei valori della velocità di subsidenza naturale elaborata in [21], (Carminati E., Doglioni C. E Scrocca D., (2003). *Apennines subduction-related subsidence of Venice (Italy)*, in «Geophysical Research Letters», Vol. 30, n. 13) unitamente al dettaglio riferito all'areale oggetto del presente studio. Tali valori, riprodotti all'interno della sola porzione di fascia costiera oggetto del presente studio, sono rappresentati nella Figura 3.25, mentre nella successiva Figura 3.26 vengono detratti dai valori di subsidenza misurata (Figura 3.22, Figura 3.23) ottenendo così una stima della quota parte di subsidenza dovuta a possibili cause antropiche. Nella successiva Figura 3.27 tali valori sono espressi in termini cumulati nei cinque anni 2002-2006.

Figura 3.25: stima della velocità di subsidenza naturale (mm/anno).

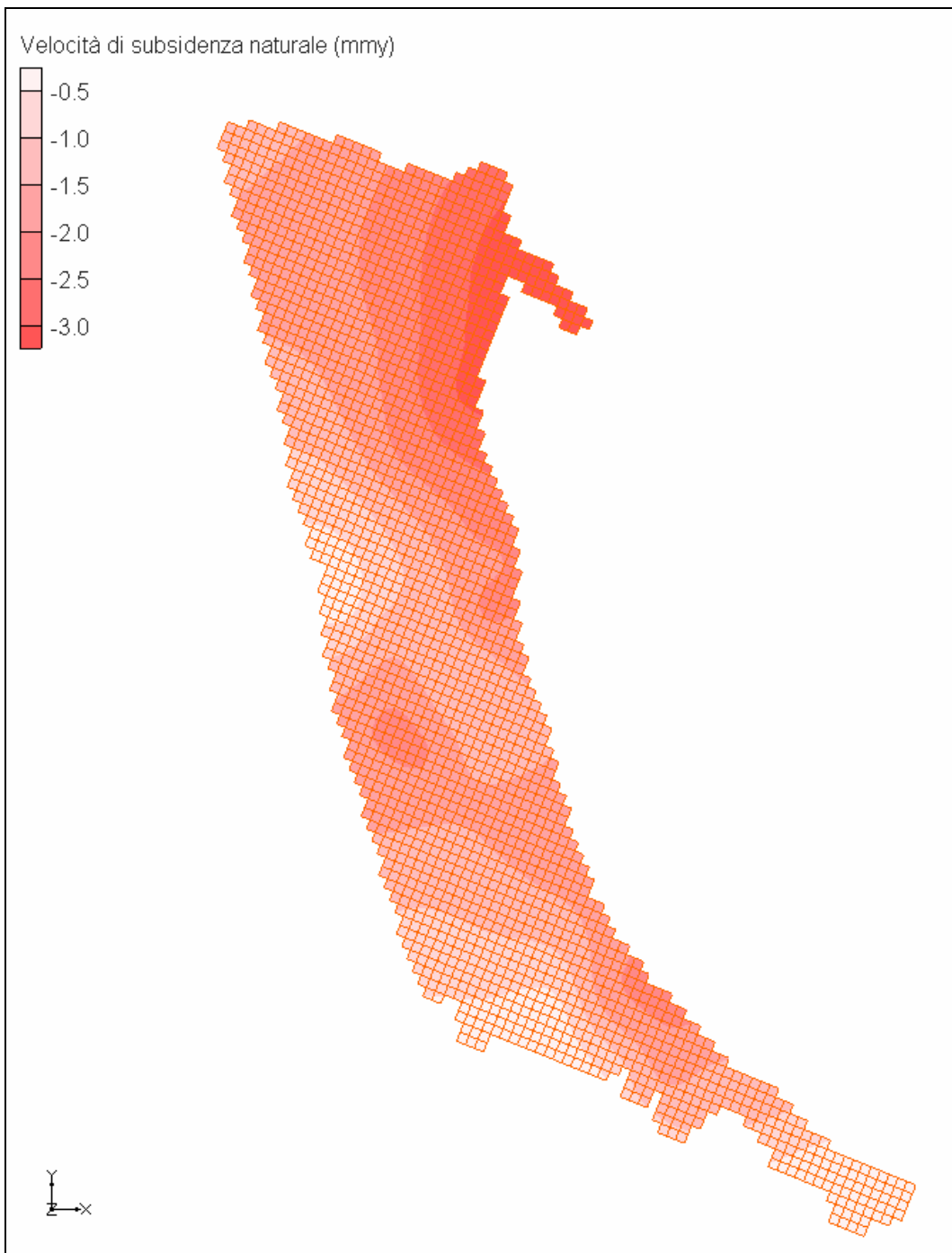


Figura 3.26: stima della velocità di subsidenza per cause di tipo antropico, (mm/anno)

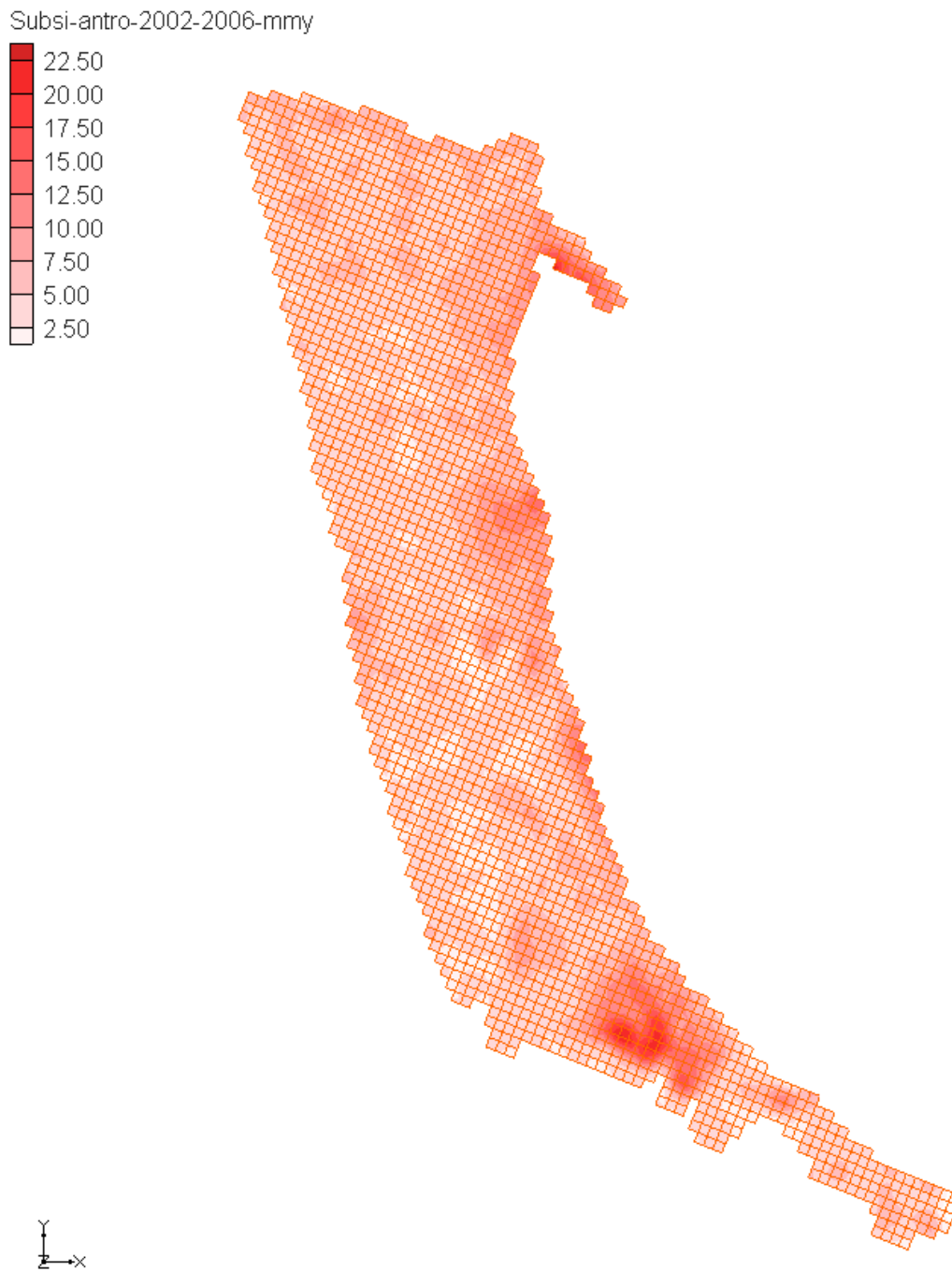
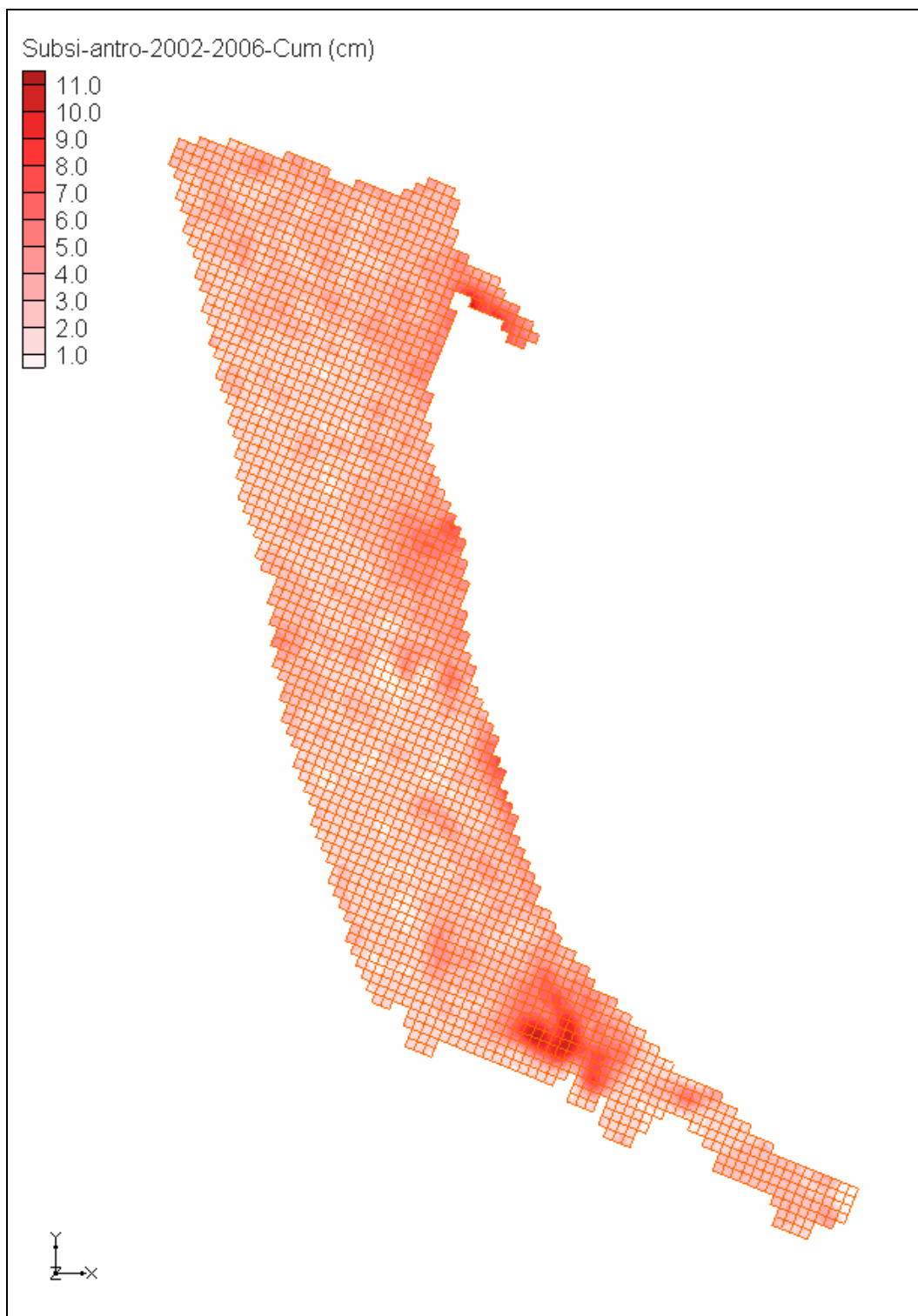


Figura 3.27: stima della subsidenza per cause di tipo antropico, valori cumulati nel periodo 2002-2006 (cm)



3.1.4.6.2 Dati di estrazione di gas

Al fine di analizzare le eventuali concomitanze di un effetto dovuto all'estrazione di gas dal sottosuolo quale causa della subsidenza antropica sono stati ricercati e reperiti i dati disponibili relativamente ai giacimenti di gas costieri ed ai relativi periodi di coltivazione. I dati sono quelli messi a disposizione dall' Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse (UNMIG) della Direzione Generale per le Risorse Minerarie ed Energetiche del Ministero dello Sviluppo Economico ([48]). I dati sono disponibili con dettaglio annuale dal 1980 e con dettaglio mensile dal 2004.

Dalla banca dati disponibile sono stati estratti i dati relativi ai giacimenti di terra localizzati lungo la fascia costiera emiliano-romagnola e quelli nel sottofondo marino vicini alla linea di costa (Tabella 3.3, Figura 3.28, Figura 3.29 e Figura 3.30).

Le due figure evidenziano rispettivamente l'ubicazione delle concessioni riportate in Tabella 3.3 e di possibile pertinenza con l'area di studio, ed i relativi dati di produzione di gas sia per gli anni passati, a partire dal 1980 (Figura 3.29), sia nel dettaglio dei 5 anni (2002-2006) assunti come riferimento per le modellazioni numeriche (Figura 3.30). In particolare nel periodo 2002-2006 risulta già non più in produzione il Ravenna Terra e si assiste allo "spegnimento" di Dosso degli Angeli nel 2004. Persiste in tale periodo la produzione dei rimanenti giacimenti a terra di Portocorsini e a nord Manara e Pomposa mentre a sud Misano Adriatico mostra dati a partire dal 2004.

Dei due giacimenti a mare, date le distanze dalla linea di costa e gli studi pregressi che hanno evidenziato le ampiezze di influenza degli effetti della loro messa in produzione ([17], Gambolati G. (1998), CENAS: Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence. Kluwer), risulta essere valutabile la sola concessione AC 27 EA contenete la piattaforma Angela-Angelina. Questa da sola produce più del doppio della produzione complessiva dei 6 giacimenti a terra analizzati.

Tabella 3.3: Concessioni per la coltivazione di idrocarburi

Concessione	periodo di produzione	Produzione media annuale (dal 1980) (tra parentesi gli anni di produzione utilizzati per la media)
DOSSO DEGLI ANGELI	prima del 1980 1980-2004	791 Milioni di Sm ³ (25)
MANARA	1994-2008	79 Milioni di Sm ³ (15)
MISANO ADRIATICO	2004-2010	1.5 Milioni di Sm ³ (7)
POMPOSA	1991-2006	60 Milioni di Sm ³ (16)
PORTO CORSINI TERRA	prima del 1985 1985-1995 2002-2010	24 Milioni di Sm ³ (18)
RAVENNA TERRA	prima del 1980 1980-1992	80 Milioni di Sm ³ (13)
AC 27 EA (Angela-Angelina)	prima del 1980 1980-2010	680 Milioni di Sm ³ (30)
AC 26 EA (Porto Corsini Mare Ovest)	prima del 1980 1980-2010	412 Milioni di Sm ³ (30)

Figura 3.28: ubicazione delle concessioni di coltivazione di idrocarburi: in terraferma parte orientale della Regione Emilia-Romagna (a sinistra), in mare Zona A (a destra)

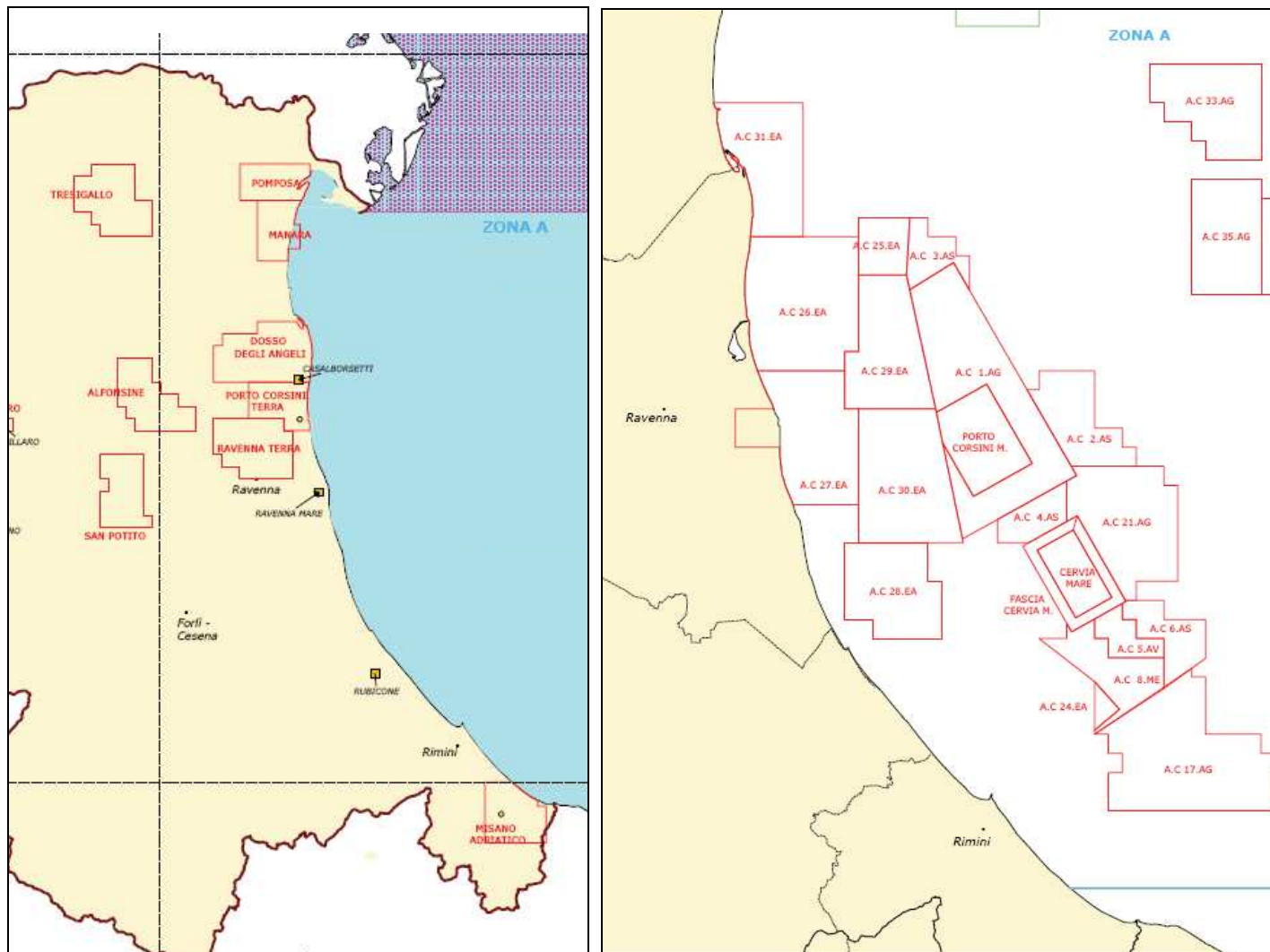


Figura 3.29: produzione di idrocarburi per le concessioni di Tabella 3.3. dati dal 1980 al 2009. I dati di Dosso degli Angeli e delle due concessioni marittime (AC 27 EA e AC 26 EA) sono riportati sui grafici con valori pari ad 1/5 per facilitare la lettura complessiva dei dati.

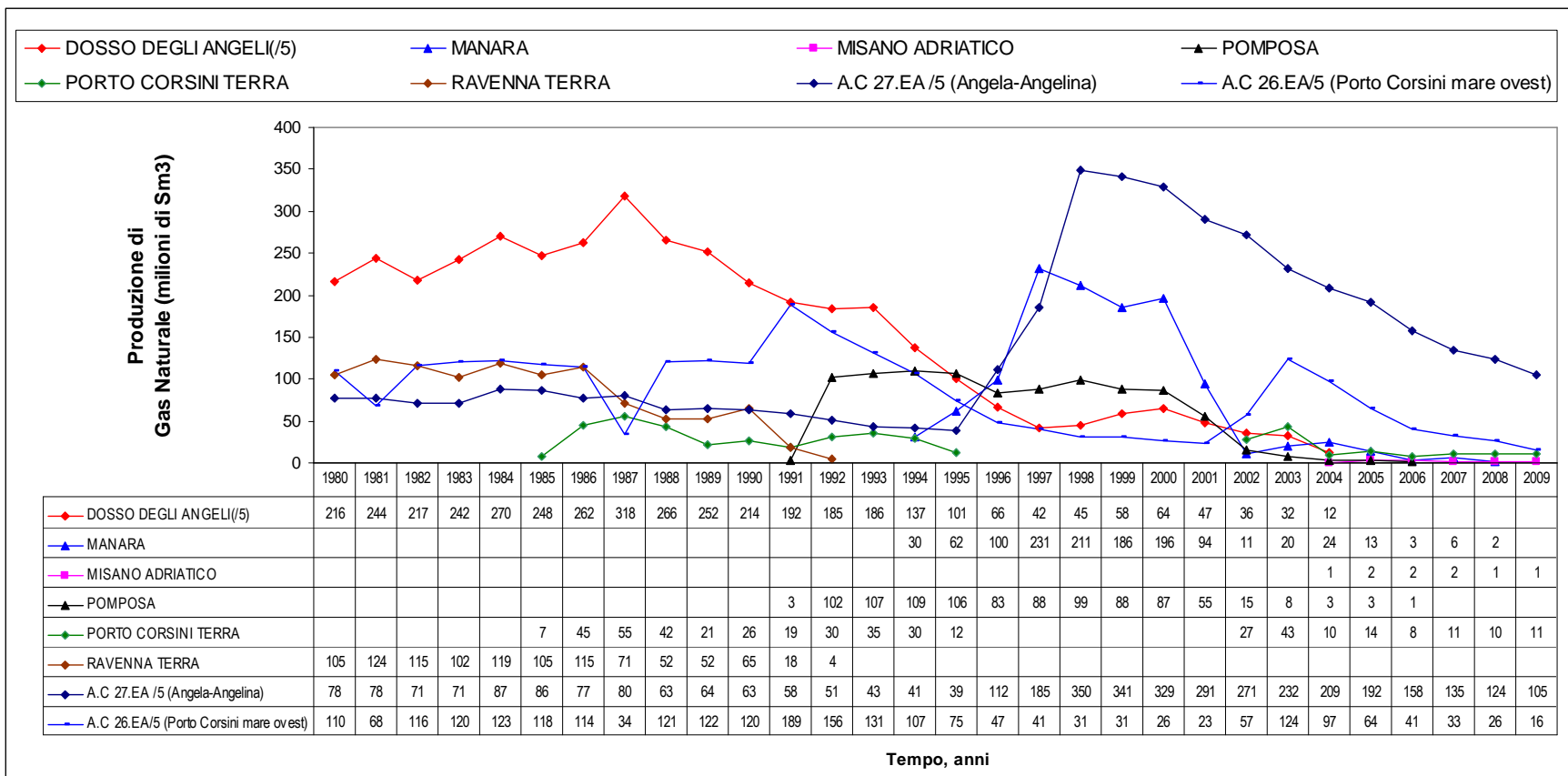
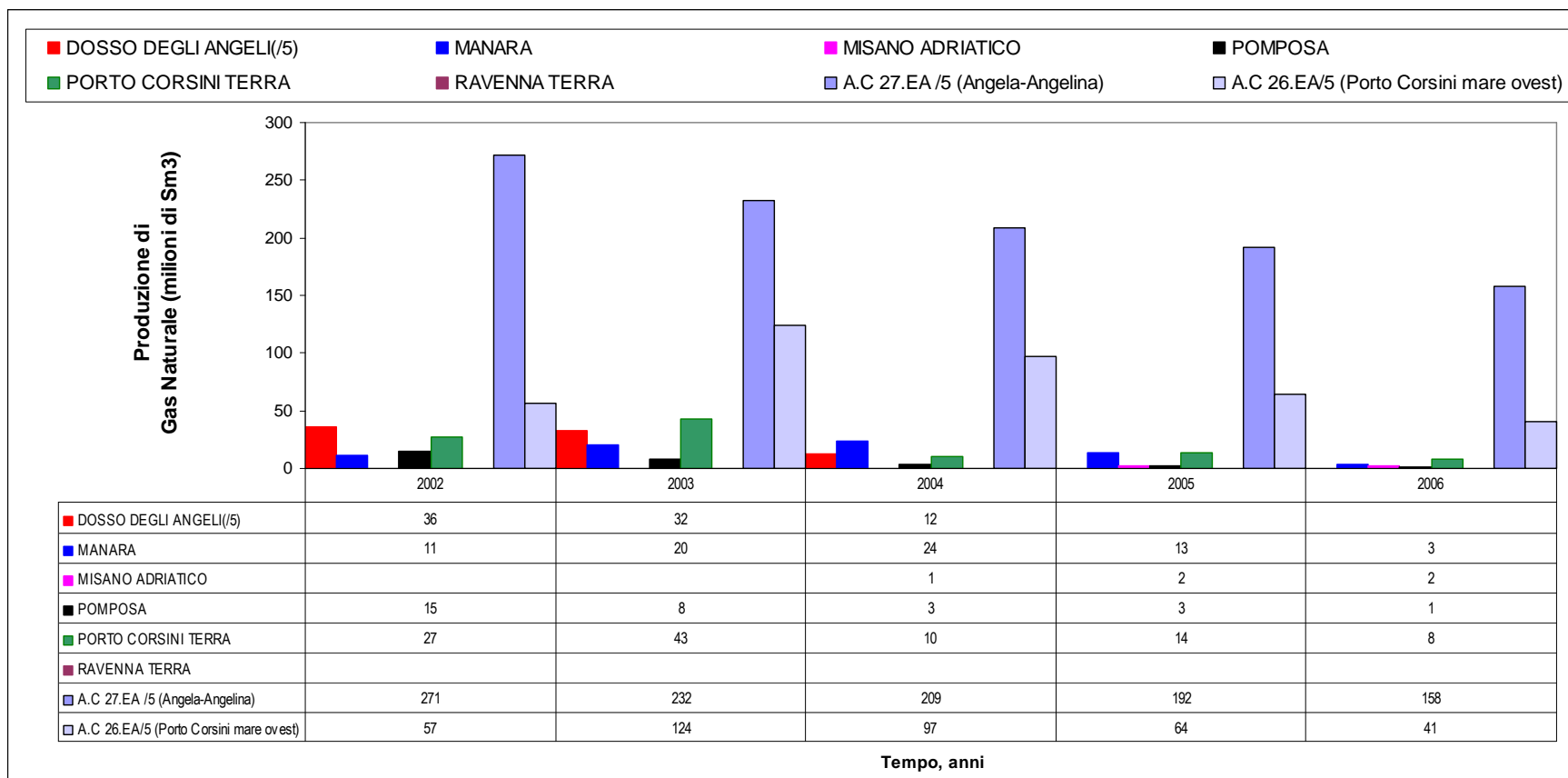


Figura 3.30: produzione di idrocarburi per le concessioni di Tabella 3.3. dati nel periodo 2002-2006 di applicazione del modello. I dati di Dosso degli Angeli e delle due concessioni marittime (AC 27 EA e AC 26 EA) sono riportati sui grafici con valori pari ad 1/5 per facilitare la lettura complessiva dei dati.



4. APPLICAZIONE DEL MODELLO DI SUBSIDENZA, TARATURA DEL MODELLO E SIMULAZIONI.

4.1 IL MODELLO NUMERICO DI FLUSSO

Come già anticipato il modello numerico di flusso deriva da un taglio del modello regionale effettuato parallelamente alla linea di costa ad una distanza di circa 20 km dal litorale (Figura 3.10).

4.1.1 Discretizzazione spaziale e temporale

L'area di studio comprende la porzione orientale del territorio regionale ricadente all'interno di una fascia di circa 20 km dalla linea di costa. La sua estensione è di circa 2400 km² e la discretizzazione assunta è quella del modello regionale di provenienza: nel piano orizzontale è con maglie di lato 1 km (Figura 4.1) mentre in verticale lo spessore complessivo del sistema sedimentario è stato suddiviso in 35 piani per un numero complessivo di celle pari a 353.535, che si riducono poi a 67.954 celle effettivamente utili una volta eliminate quelle fuori sistema.

Figura 4.1: Discretizzazione orizzontale (vista in pianta), layer 1 e layer 24 (con la disattivazione delle celle del gruppo acquifero B)

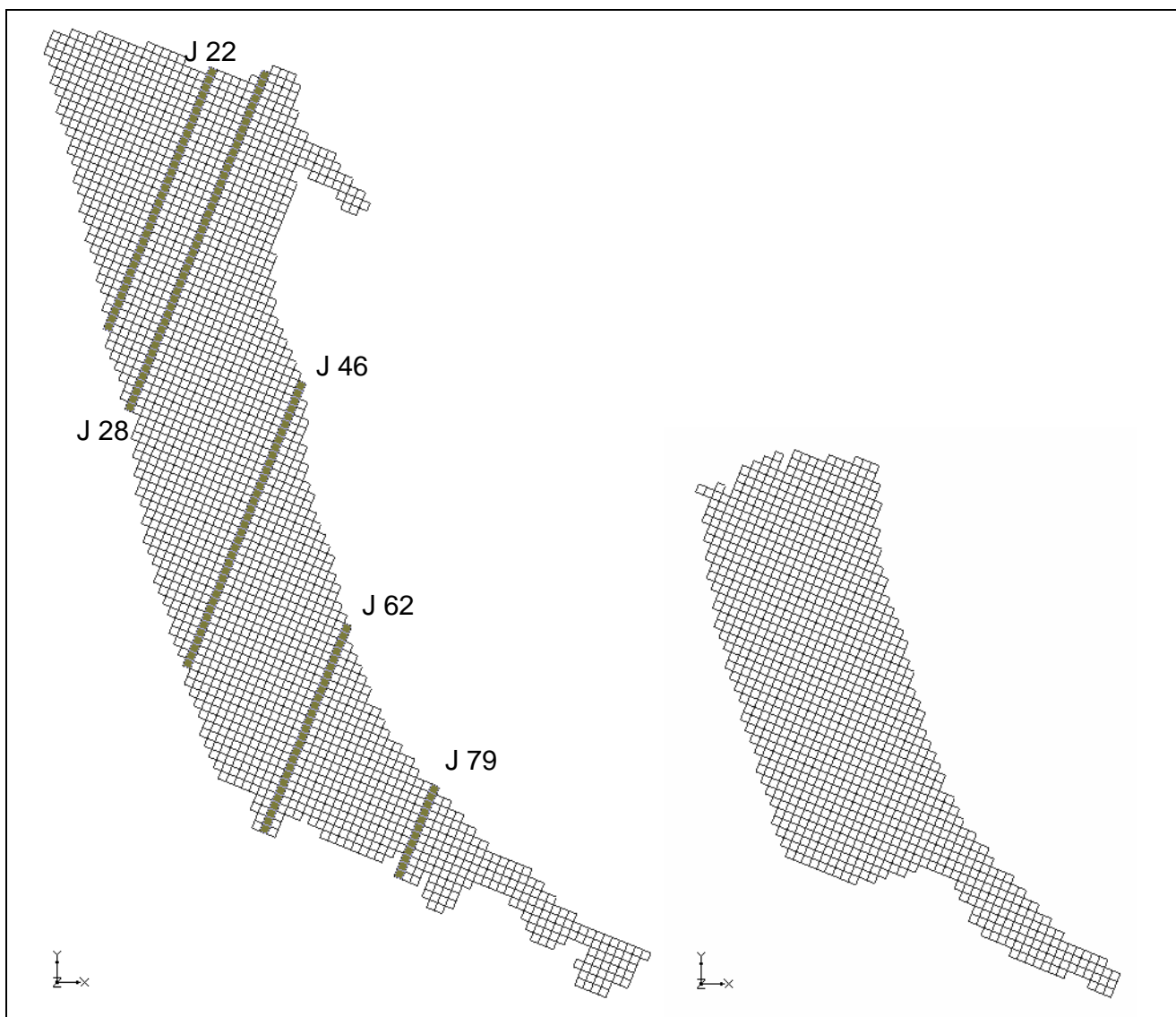
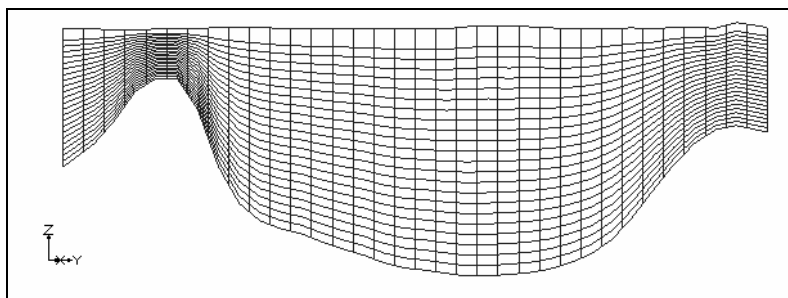


Figura 4.2: Discretizzazione verticale (vista in sezione), sezione J22, solo Gruppo Acquifero A



Si è inoltre mantenuta la rotazione oraria del reticolo di 22 gradi, in modo da fare coincidere l'asse X del reticolo con la direzione principale del margine appenninico.

La discretizzazione verticale è con altezza delle celle variabile ottenuta associando i primi 23 piani al gruppo acquifero A e 12 piani al sottostante gruppo acquifero B. Allo stesso tempo si è provveduto a deformare in verticale la griglia secondo le reali quote delle basi dei diversi gruppi acquiferi. Il risultato ottenuto è riportato dalla Figura 4.2 alla Figura 4.5 che rappresentano alcune sezioni verticali del modello in direzione SW-NE le cui tracce sono riportate in Figura 4.1. La figure mostrano inoltre il sistema di disattivazione delle celle realizzato sia verso monte per a meglio rappresentare la chiusura a sud dei gruppi acquiferi a ridosso del margine appenninico sia nella bassa pianura in corrispondenza del termine del campo di esistenza del gruppo acquifero B.

Figura 4.3: Discretizzazione verticale (vista in sezione), sezione J28, solo Gruppo Acquifero A

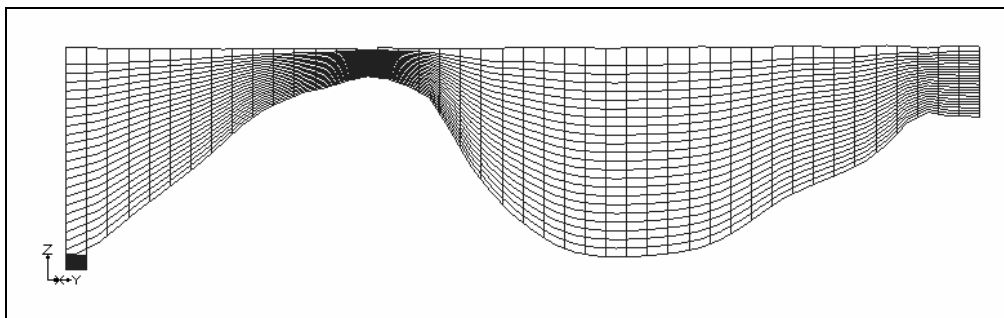


Figura 4.4: Discretizzazione verticale (vista in sezione), sezione J46. Gruppi Acquiferi A e B

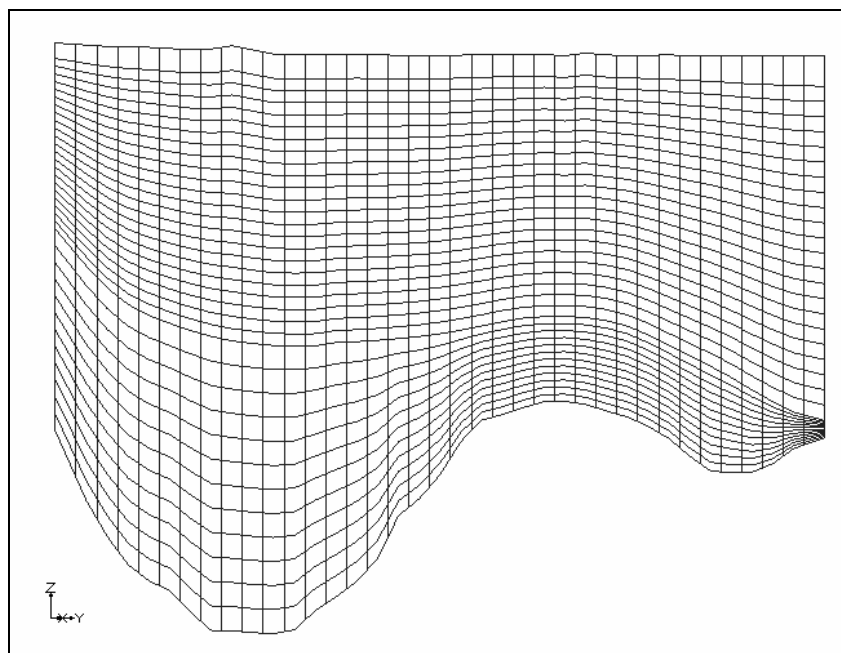
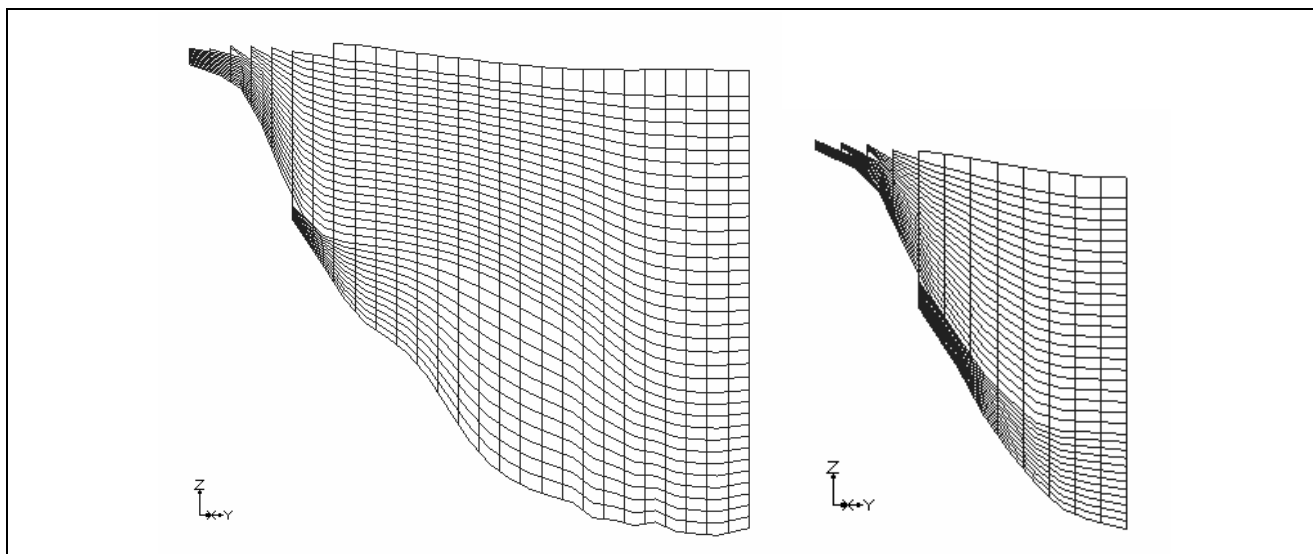


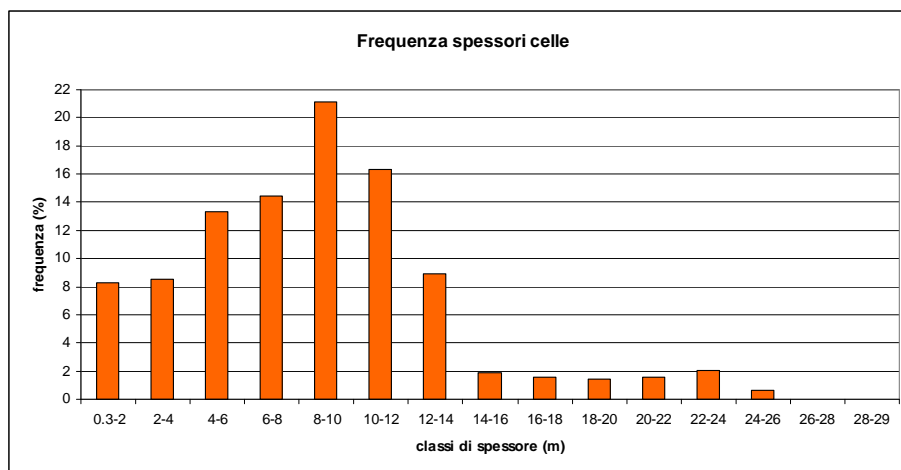
Figura 4.5: Discretizzazione verticale (vista in sezione), sezione J62 e J79



In Figura 4.6 è rappresentata la distribuzione degli spessori delle celle all'interno della discretizzazione spaziale con celle ad altezza variabile; le celle con spessori minori di 1 m è contenuto dentro il 4% del totale. La discretizzazione temporale utilizzata è quella già sinteticamente rappresentata nella precedente Figura 3.7 e corrisponde quinquennio 2002-2006 con un passo trimestrale.

La frequenza semestrale delle osservazioni disponibili dalle reti di monitoraggio ha consentito il controllo diretto in fase di taratura dei periodi "pari" (SP2, SP4, ecc) . La ulteriore suddivisione con i periodi SP1, SP3, ecc consente una migliore regolazione delle sollecitazioni del sistema su base stagionale (prelievi) che può essere verificati con i punti della rete di monitoraggio con misure a maggior frequenza (Tabella 3.1).

Figura 4.6: Distribuzione degli spessori delle celle nel reticolo di discretizzazione



4.1.2 Calibrazione del modello numerico di flusso

La calibrazione del modello di flusso è stata condotta per passaggi successivi secondo le seguenti fasi:

1. immediatamente dopo il taglio del modello regionale sulla fascia costiera, è stata inserita una condizione al contorno di tipo General Head Boundary (GHB) nelle celle del bordo occidentale. A tali celle sono stati assegnati, per i relativi stress period, i carichi idraulici pari alle rispettive soluzioni del modello regionale e sono stati attribuiti valori di conduttanza ottenuti dal prodotto dei coefficienti di permeabilità orizzontale di ogni cella per il corrispettivo spessore, il tutto moltiplicato per un coefficiente correttivo di riduzione posto uguale a 0.9. Questa operazione di regolazione del suddetto GHB è stata necessaria al fine di potere mantenere la corrispondenza e l'accoppiamento con l'originario modello regionale, ovvero la confrontabilità fra i flussi di acqua lungo la condizione

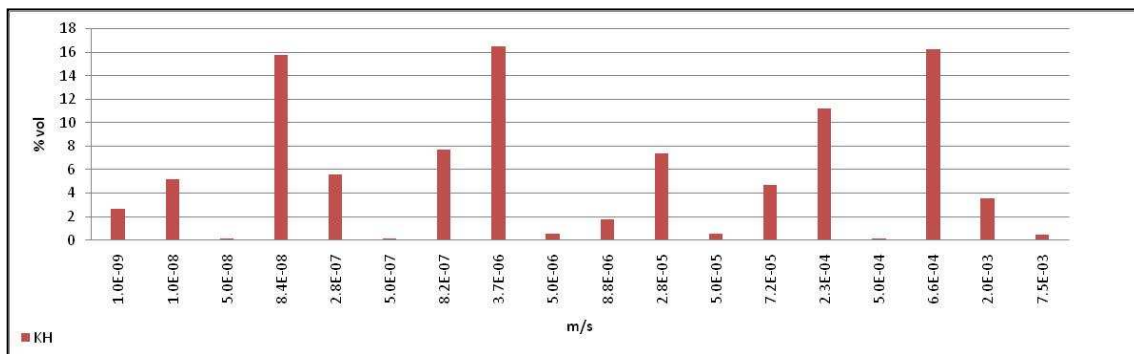
di bordo imposta ed il flusso del modello regionale, lungo la stessa zona e principalmente diretto dall'entroterra verso la costa

2. successivamente si è ritenuto opportuno aggiornare la struttura litologica del modello numerico e di conseguenza la sua parametrizzazione in funzione di nuovi elementi resisi disponibili in momenti successivi. In particolare:
 - sono state implementate puntualmente le informazioni litologiche derivanti da tutti i sondaggi disponibili nella banca dati geognostica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) della Regione Emilia-Romagna;
 - nella porzione di monte, ovvero in quella interessata dai valori più consistenti di subsidenza dell'intera fascia costiera, sono state implementate le sezioni geologiche del SGSS n° 19, 82 e 17, aventi profondità medie dell'ordine dei 40-50 m e parallele all'autostrada A14, comprese fra Forlì e Rimini. Tali sezioni sono state ricostruite nell'ambito del progetto [16]:
 - è stata presa in considerazione la transizione tra sistemi acquiferi appenninici e padani ricostruita sempre in ([16]; è stato quindi tenuto conto che i sistemi acquiferi padani sono caratterizzati da corpi sabbiosi omogenei, di spessore dell'ordine dei 10-20 m e più, con distribuzione areale pressoché continua e trasmissività relativamente alte, mentre i sistemi acquiferi appenninici sono caratterizzati da corpi eterogenei costituiti da alternanze di strati di sabbie limose/ sabbie fini e limi/argille, di spessore per lo più intorno ai 5-7 m, con distribuzione discontinua e trasmissività contenute. Nel modello sono stati quindi riattribuiti i valori dei coefficienti di permeabilità orizzontale e verticale, incrementandoli o abbassandoli di un ordine di grandezza laddove necessario, in modo da rispettare il nuovo stato delle conoscenze;
 - sono state eseguite alcune simulazioni condizionali col Tprogs ([40],[41]) partendo direttamente dai dati stratigrafici SGSS e solo successivamente, laddove le modifiche litologiche apportate si sono dimostrate sensibilmente migliorative ai fini della taratura del modello di flusso, le distribuzioni litologiche così ottenute sono state trasferite localmente su di alcune parti del modello,
 - è stata presa in considerazione la transizione tra acquiferi liberi e confinati, individuata nella definizione dei nuovi corpi idrici sotterranei ai sensi della DQ2000/60 ([37]) ed è stata implementata nel modello la base del Complesso Acquifero A2, che suddivide i corpi idrici sotterranei della pianura in confinati superiori (A1 e A2) e confinati inferiori (A3, A4, B e C). Tale operazione è consistita nell'attribuire la litologia argillosa più fine alle celle, il cui baricentro ricadeva alle profondità corrispondenti alla suddetta base di A2.
3. è stata operata una taratura puntuale del modello di flusso, attraverso la riattribuzione ad alcune celle di una più idonea litologia (e dei relativi parametri idrogeologici associati), scelta fra le trentuno già disponibili. Il metodo usato è di tipo *trial and error*, ed è stato applicato nei casi in cui, in corrispondenza dei punti di osservazione (*observation*) delle piezometrie, dal confronto fra i carichi idraulici osservati e quelli calcolati dal modello e dall'analisi degli andamenti dei relativi trend, sono state riscontrate differenze e/o discordanze che rendevano necessaria la calibrazione o il miglioramento. Solo localmente, in qualche cella del 1° layer ricadente nella fascia costiera ferrarese, al fine di eliminare surplus d'acqua formatesi sopra il piano campagna, sono state aggiunte rispetto a quelle già presenti nel modello regionale, alcune condizioni di dreno, che simulano il drenaggio che avviene sul territorio ad opera delle idrovore e/o dei sistemi di scolo e canali. Si è scelto, invece di non modificare, ossia di non considerare variabili di taratura: sia il sistema dei prelievi, che quello delle ricariche, al fine di poter permettere eventuali scenari e/o aggiornamenti degli stessi.

4.1.2.1 Assetto delle permeabilità

Nella Figura 4.7 è riportata la frequenza di distribuzione delle permeabilità al termine della taratura, mentre nelle figure successive sono riportate le distribuzioni delle k su alcuni layer e su alcune sezioni del modello.

Figura 4.7: Frequenza di distribuzione delle permeabilità (m/s) orizzontali a fine taratura



In particolare nelle immagini successive (da Figura 4.8 a Figura 4.10) è riportata la distribuzione delle litologie per 3 diverse profondità espresse mediante il numero del layer corrispondente; le ultime tre immagini (da Figura 4.12 a Figura 4.14) riportano invece le serie stratigrafiche ottenute in corrispondenza di sezioni di riferimento riportate in Figura 4.11. La legenda dei colori associa alle litologie più permeabili toni chiari e alle litologie meno permeabili toni scuri.

Infine nella Figura 4.16 viene invece riportata la distribuzione del coefficiente di immagazzinamento specifico.

Figura 4.8: Distribuzione delle permeabilità orizzontali a fine taratura, layer 1



Figura 4.9: Distribuzione delle permeabilità orizzontali a fine taratura, layer 12

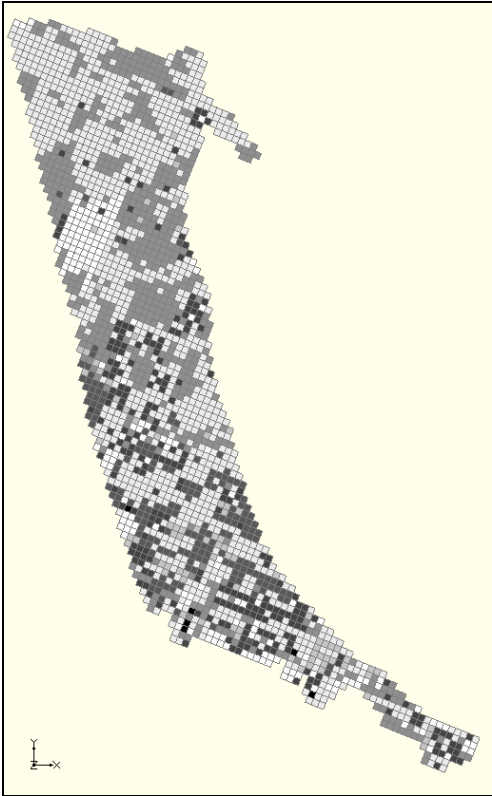


Figura 4.10: Distribuzione delle permeabilità orizzontali a fine taratura, layer 24

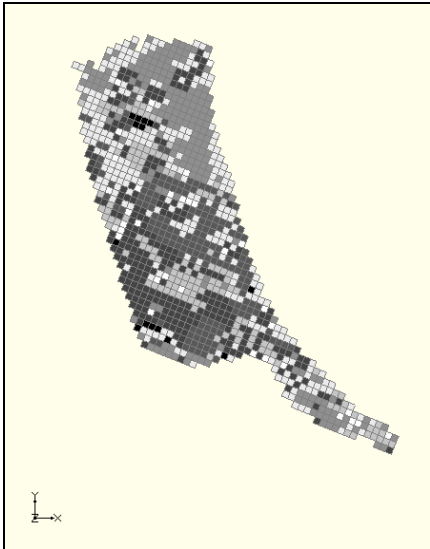


Figura 4.11: Traccia delle sezioni descritte nelle quattro figure successive

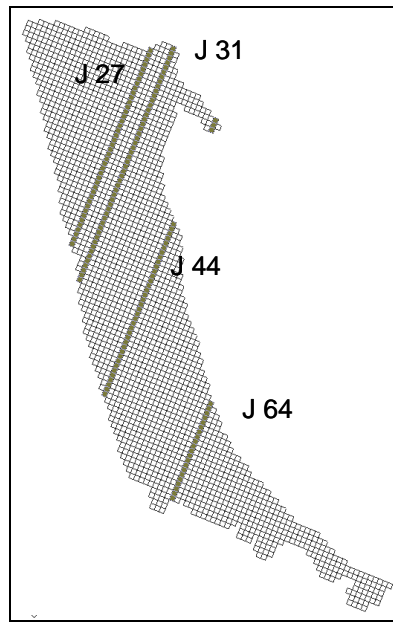


Figura 4.12: Distribuzione delle permeabilità orizzontali a fine taratura, sezione J27

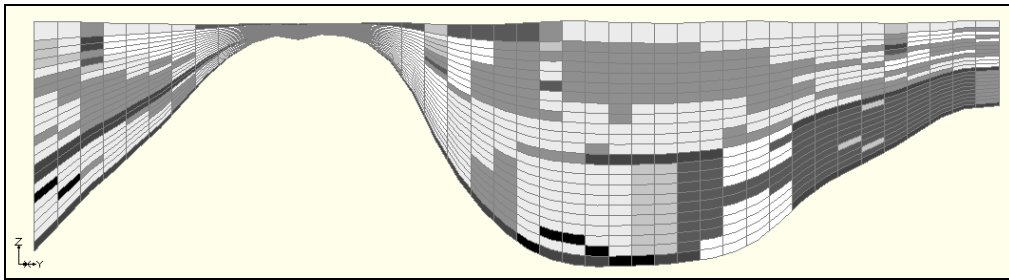


Figura 4.13: Distribuzione delle permeabilità orizzontali a fine taratura, sezione J31

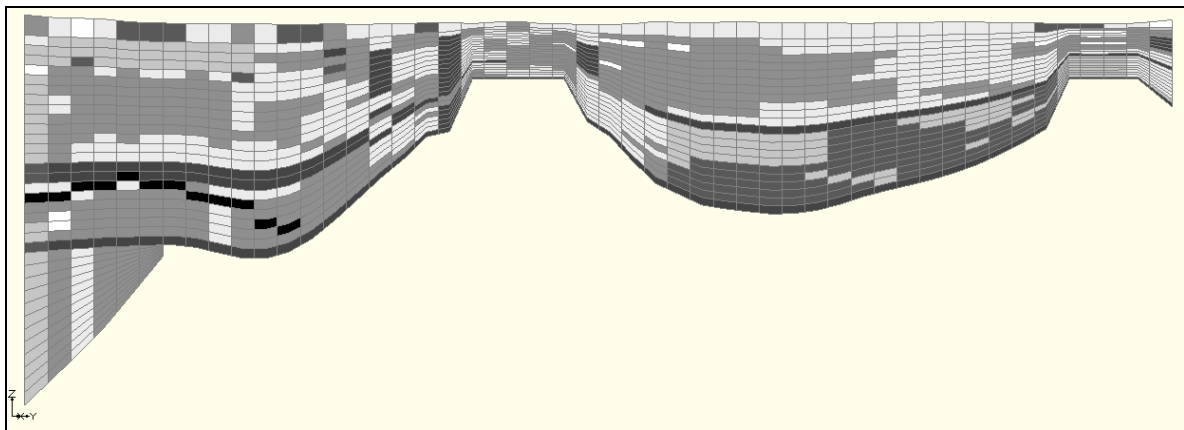


Figura 4.14: Distribuzione delle permeabilità orizzontali a fine taratura, sezione J44

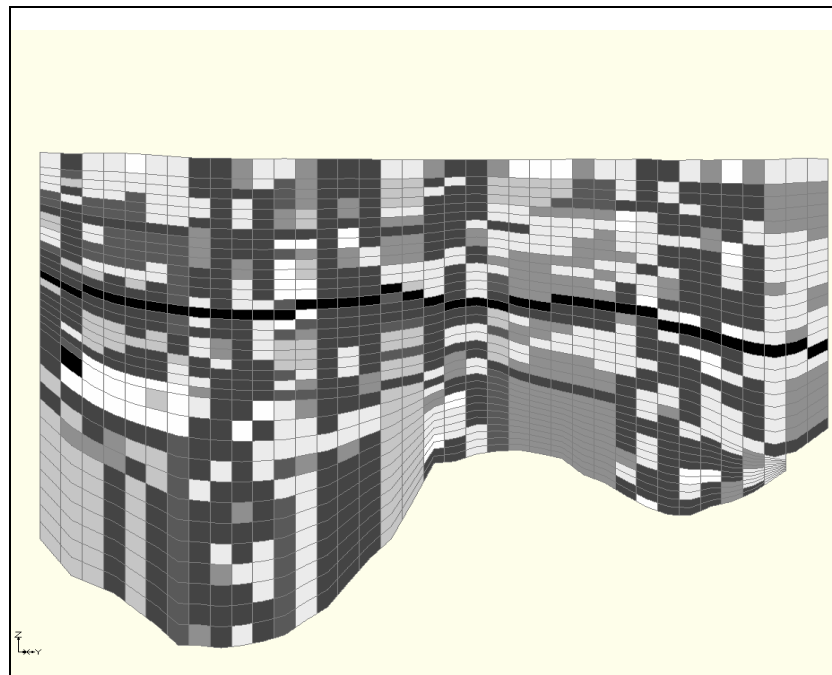


Figura 4.15: Distribuzione delle permeabilità orizzontali a fine taratura, sezione J64

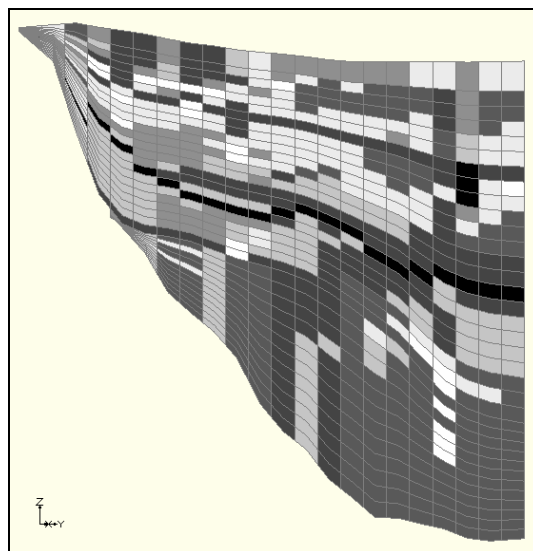
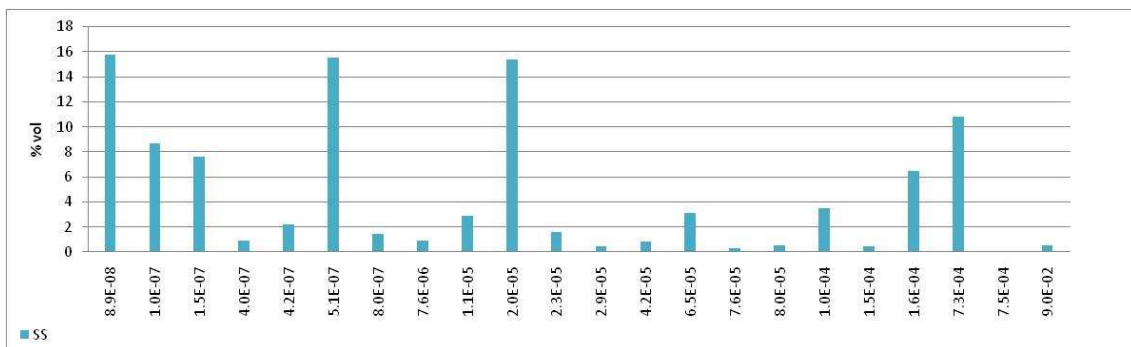


Figura 4.16: Frequenza di distribuzione del coefficiente di immagazzinamento specifico (1/m) a fine taratura



4.1.2.2 *Assetto del flusso*

L'assetto del flusso e quindi la distribuzione del carico idraulico all'interno dell'area modellata rappresenta la principale uscita dal modello di flusso in termini di risultato e rappresenta il campo di moto sul quale verrà implementata la successiva fase di modellistica della subsidenza.

Nelle figure da Figura 4.18 a Figura 4.23, è riportata tale distribuzione 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 (Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20), sia in sezione longitudinale (Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23 secondo le tracce di Figura 4.17).

Figura 4.17: tracce delle sezioni per la rappresentazione della distribuzione del carico idraulico

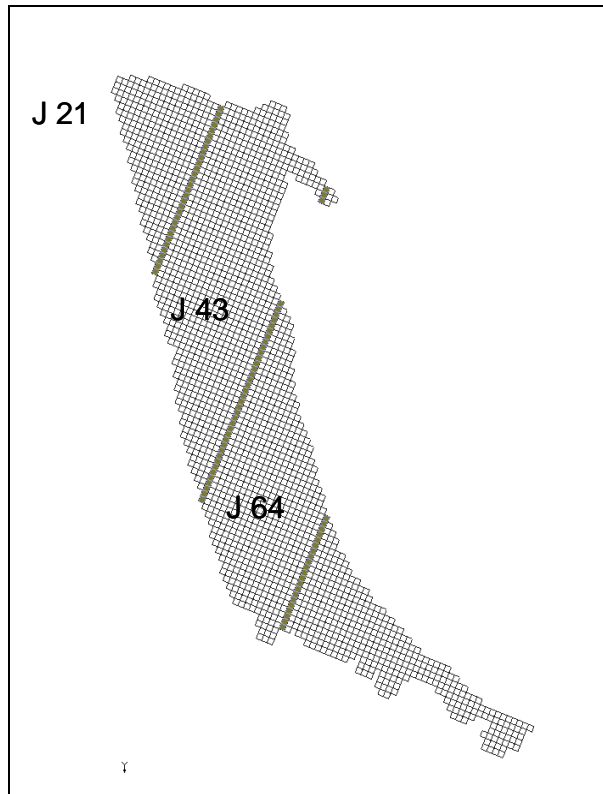


Figura 4.18: distribuzione del carico idraulico (m) layer 1, Istanti T1, T10, T20

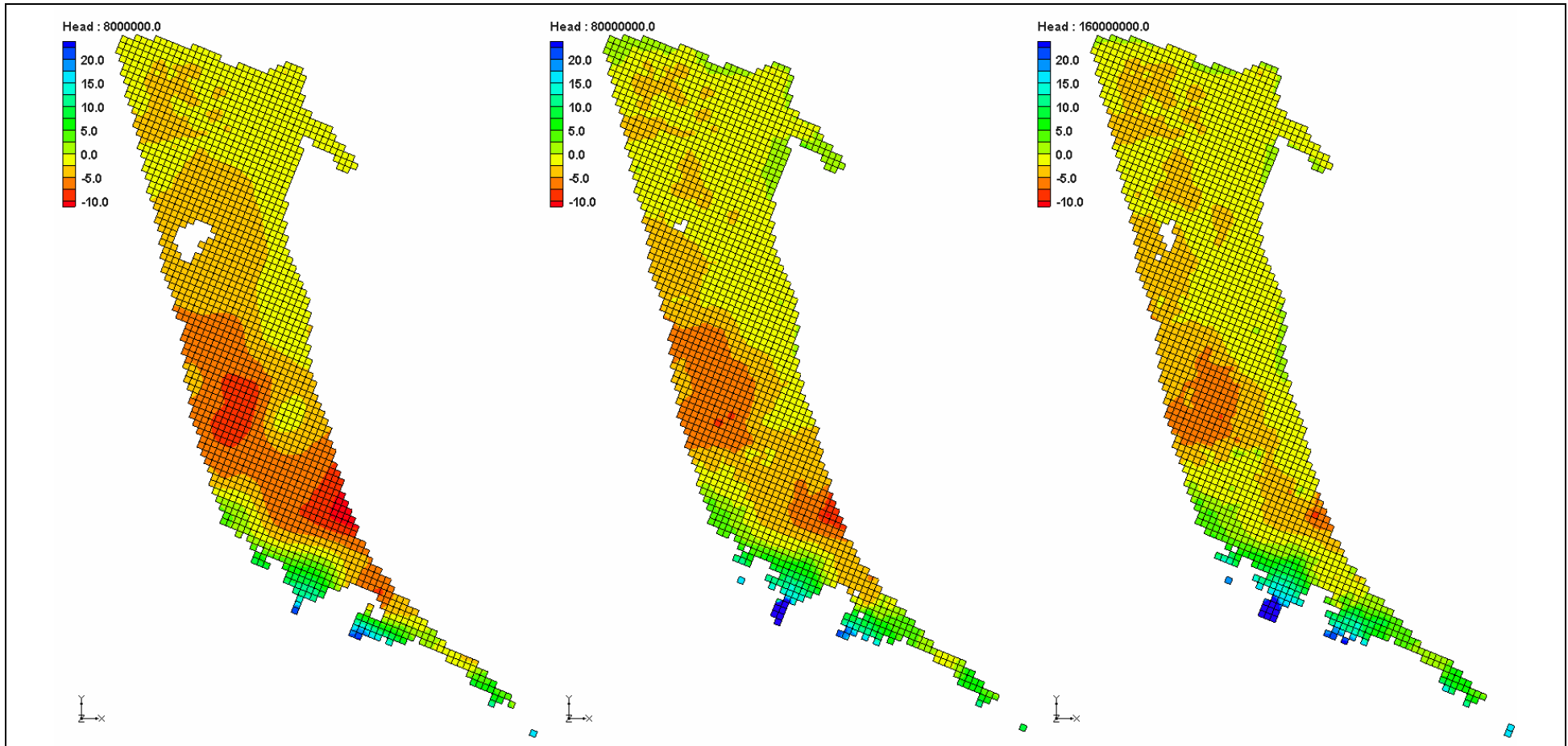


Figura 4.19: distribuzione del carico idraulico (m) layer 12, Istanti T1, T10, T20

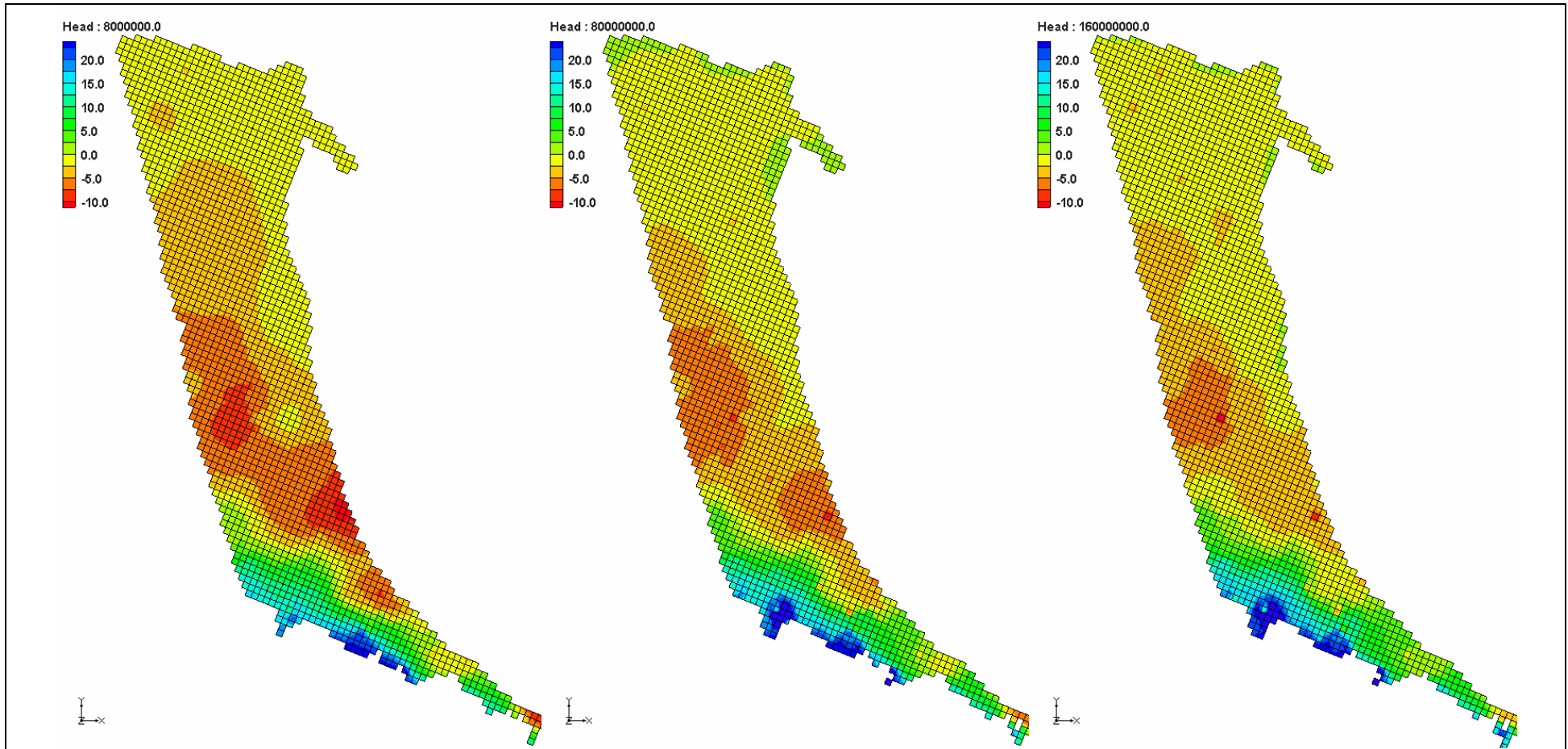


Figura 4.20: distribuzione del carico idraulico (m) layer 24, Istanti T1, T10, T20

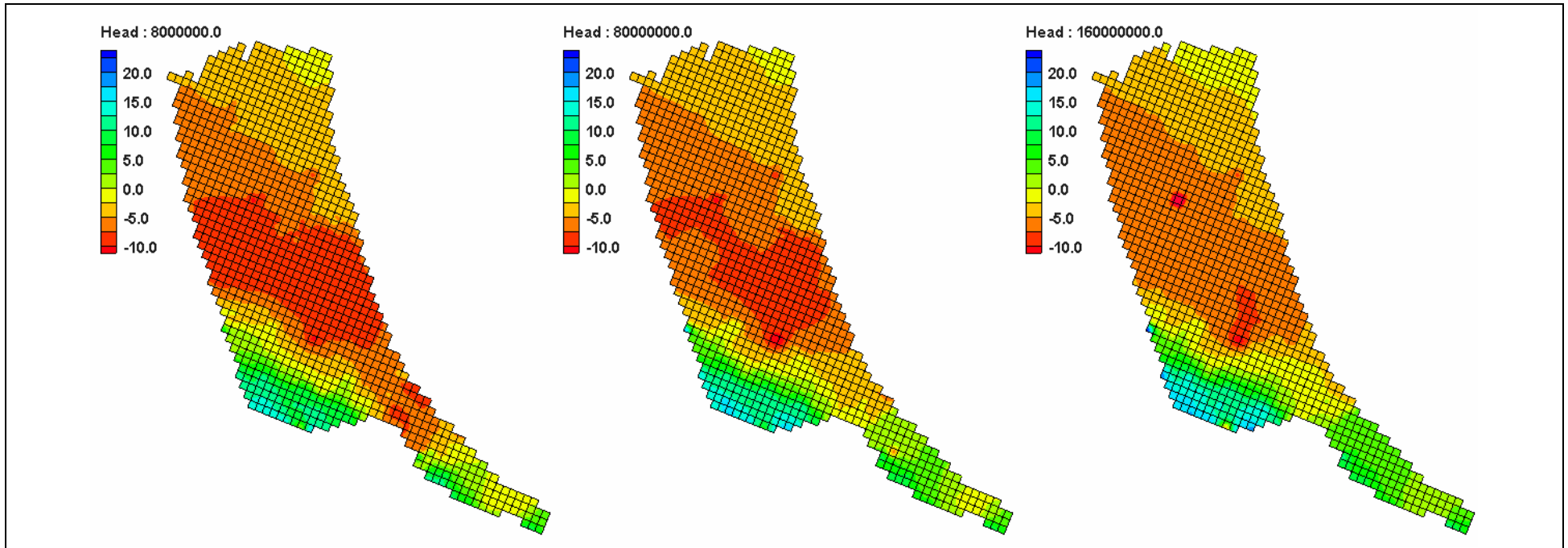


Figura 4.21: distribuzione del carico idraulico (m) sezione J21, Istanti T1, T10, T20

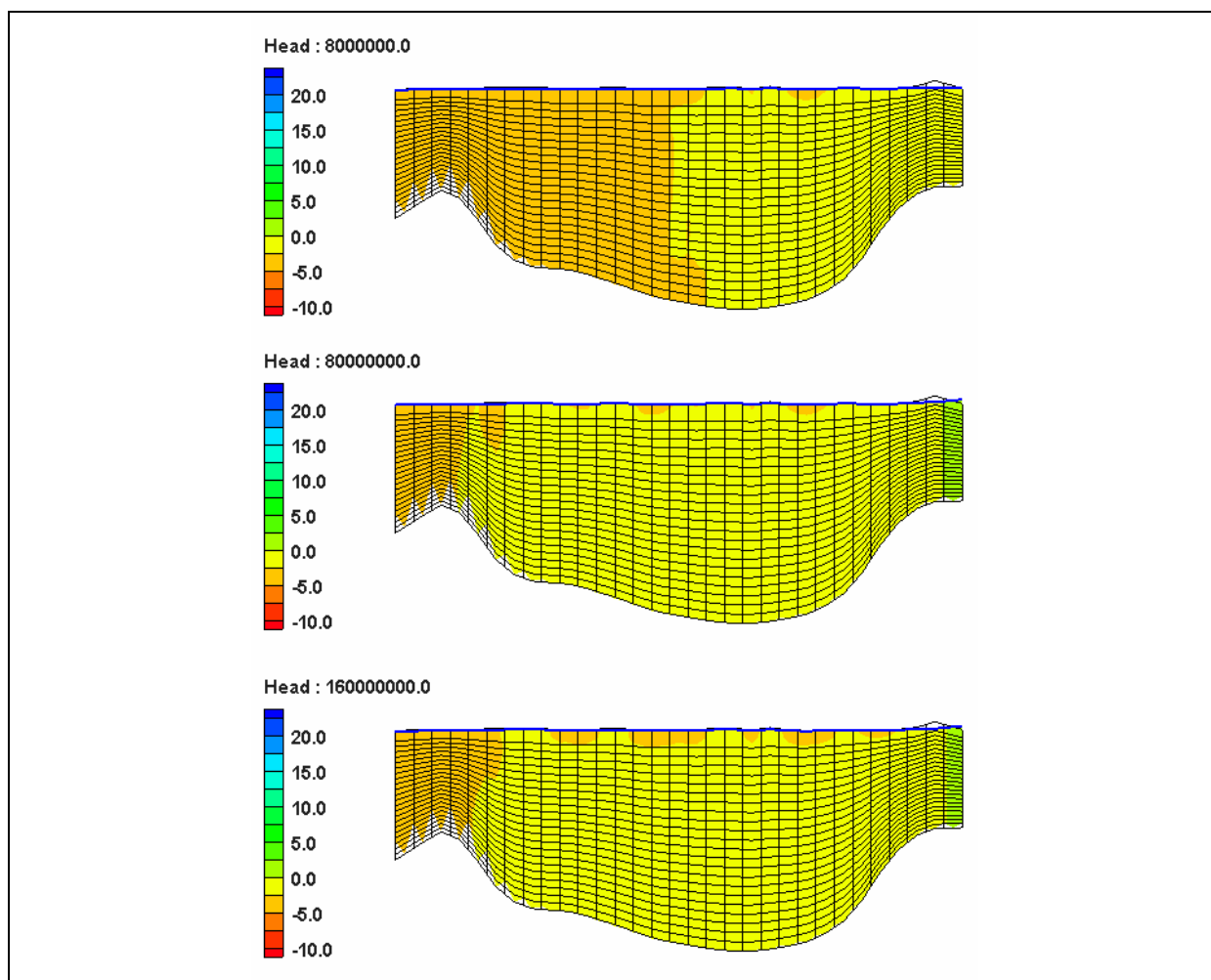


Figura 4.22: distribuzione del carico idraulico (m) sezione J43, Istanti T1, T10, T20

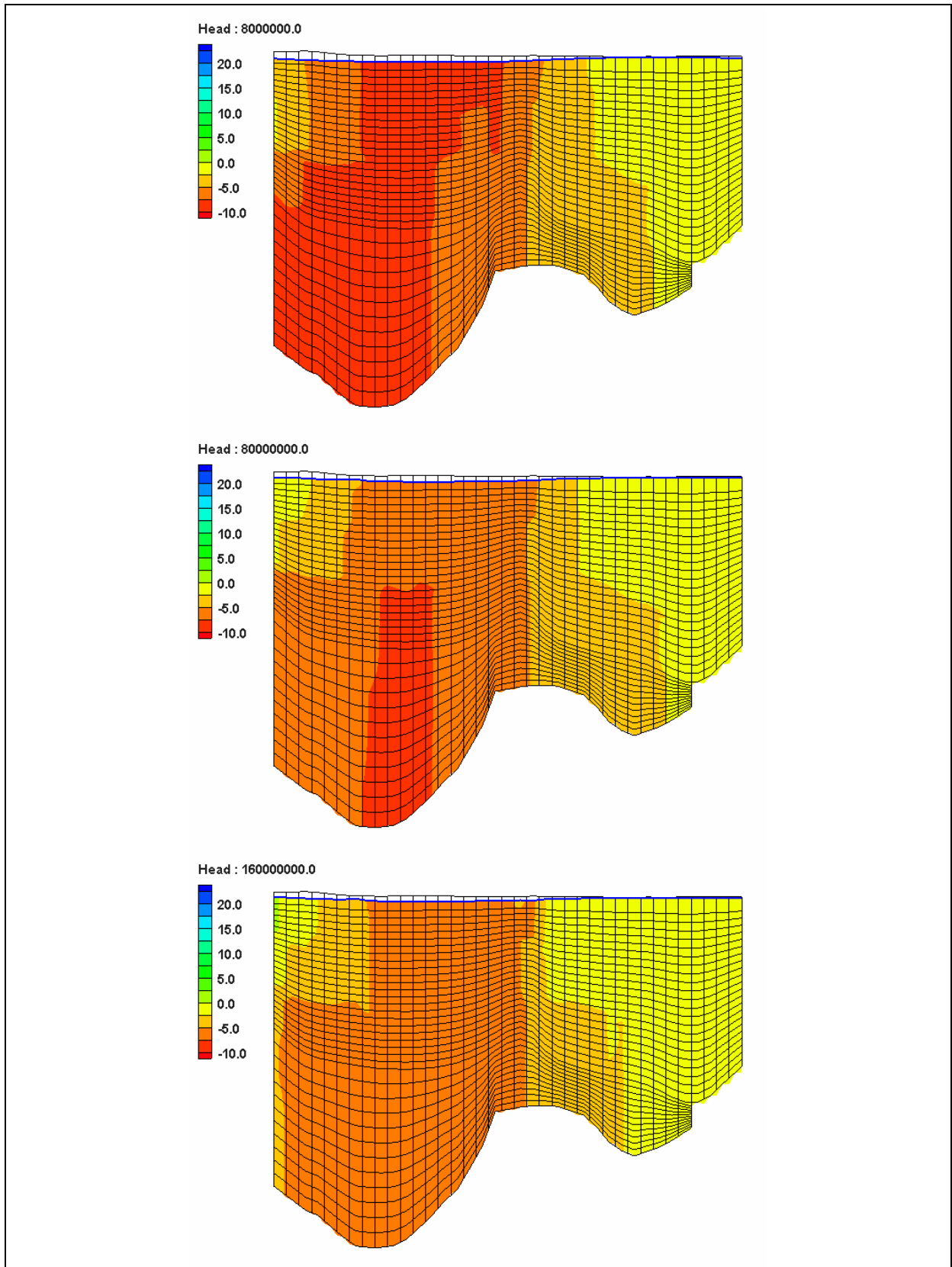
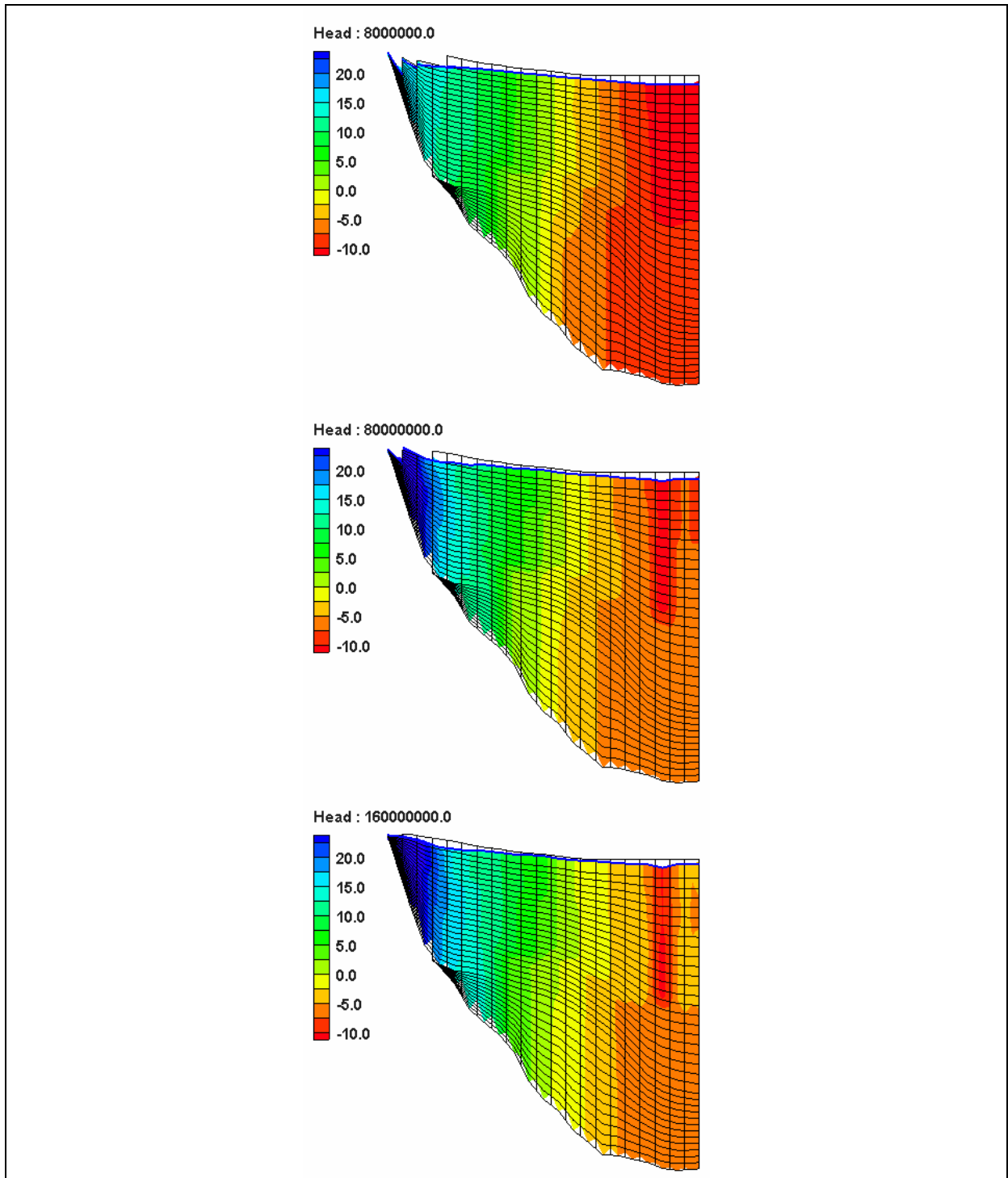


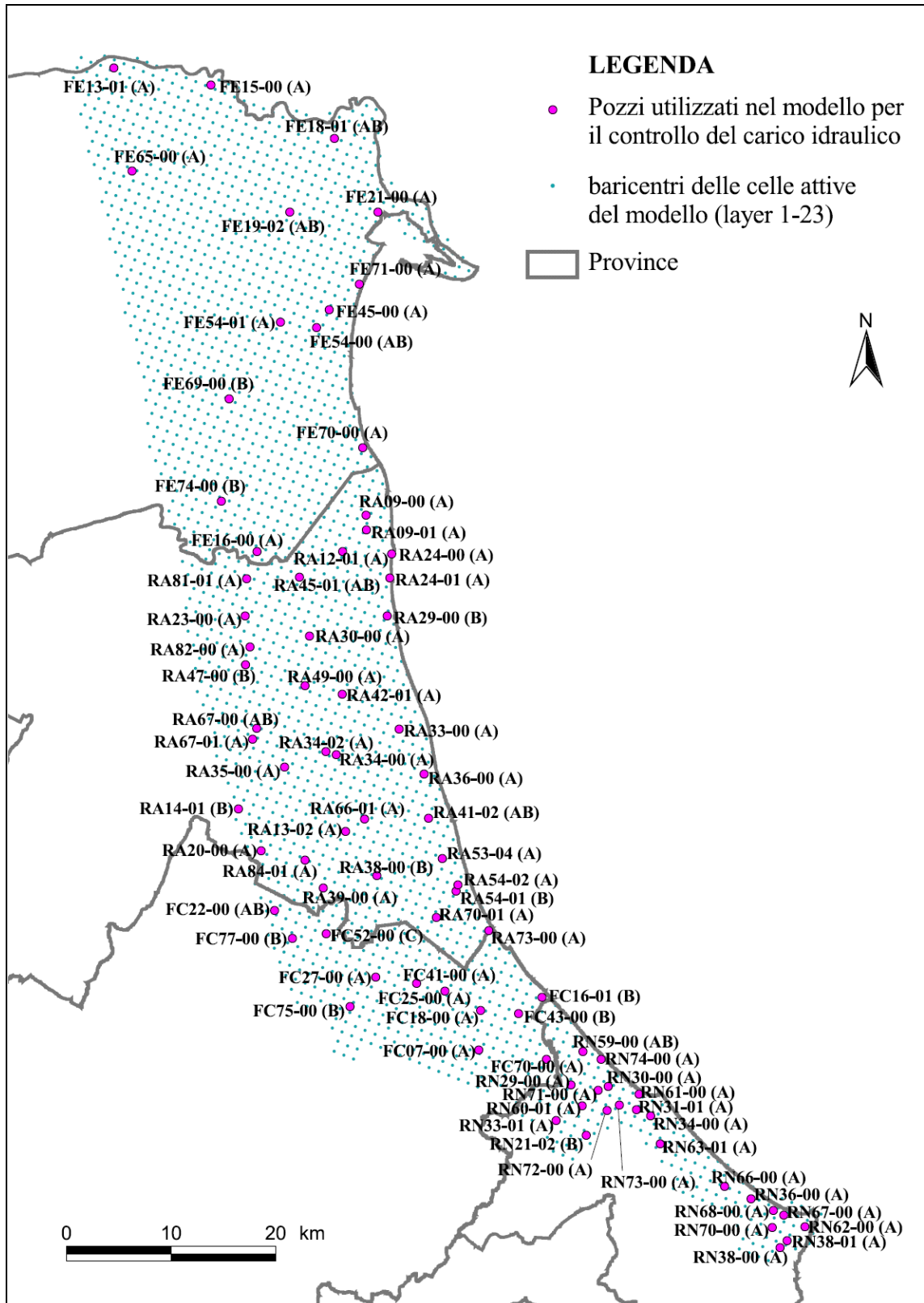
Figura 4.23: distribuzione del carico idraulico (m) sezione J64, Istanti T1, T10, T20



4.1.2.3 *Controllo della taratura*

Il controllo della taratura del modello avviene inizialmente attraverso la verifica diretta della corrispondenza fra i valori dei carichi idraulici calcolati dal modello e le serie storiche osservate. La taratura è stata condotta attraverso il controllo di circa 80 punti di misura con disponibilità sufficiente di dati (Figura 4.24).

Figura 4.24: ubicazione dei pozzi di controllo utilizzati per la calibrazione del modello di flusso (tra parentesi il Gruppo Acquifero captato secondo lo schema proposto in [36])



Pertanto nelle figure che seguono vengono riportati sia il confronto fra i dati di alcuni pozzi significativi delle serie storiche osservate (linee tratteggiate che rappresentano un intervallo di confidenza $\pm 1m$) e quelli calcolati su alcuni punti d'acqua significativi (Figura 4.25) sia gli scatter-plot dei valori osservati/calcolati per due dei quattro stress periods evidenziando il buon risultato raggiunto dalla taratura. Nella Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28 sono rappresentati gli scatter-plot (valori osservati/valori calcolati) per gli istanti temporali T1, T10 e T20 della discretizzazione temporale adottata, dove ad ogni punto corrisponde un pozzo utilizzato per la taratura e la distanza dalla diagonale centrale rappresenta lo scostamento tra il valore osservato e il valore calcolato. In tali figure sono rappresentati contemporaneamente tutti i punti utilizzati per il controllo della taratura del modello.

Figura 4.25: serie temporali dati osservati (range $\pm 1.5 m$, in tratteggio) e dati calcolati (in rosso) su di alcuni punti di osservazione. (N.B. per il pozzo RA23-00 i dati osservati sono disponibili fino al T14)

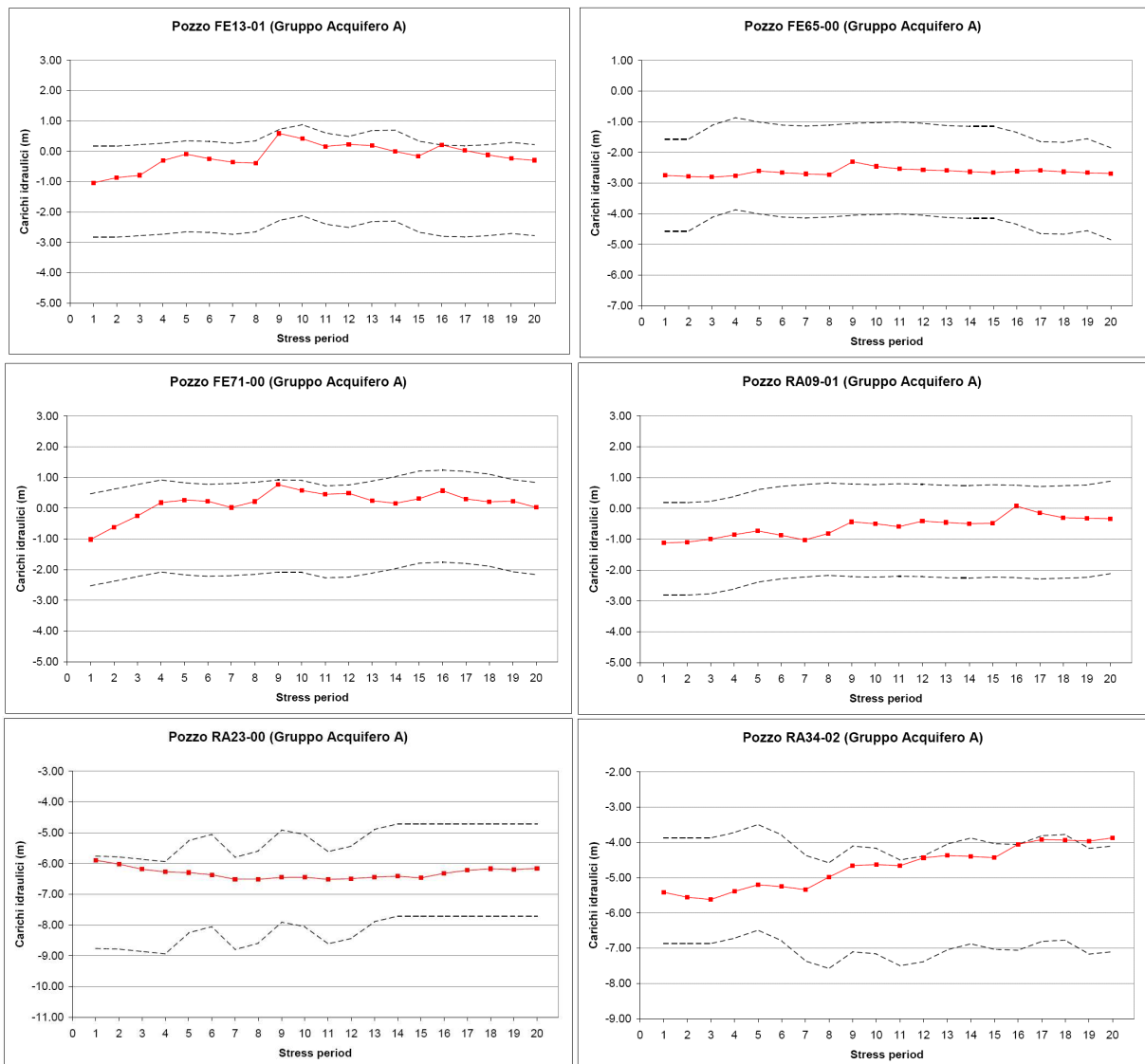


Figura 4.25, segue. (N.B. per il pozzo FC52-00 i dati osservati sono disponibili a partire dal T4, per il FC07-00 fino al T10 e per il RN74-00 partire dal T3.

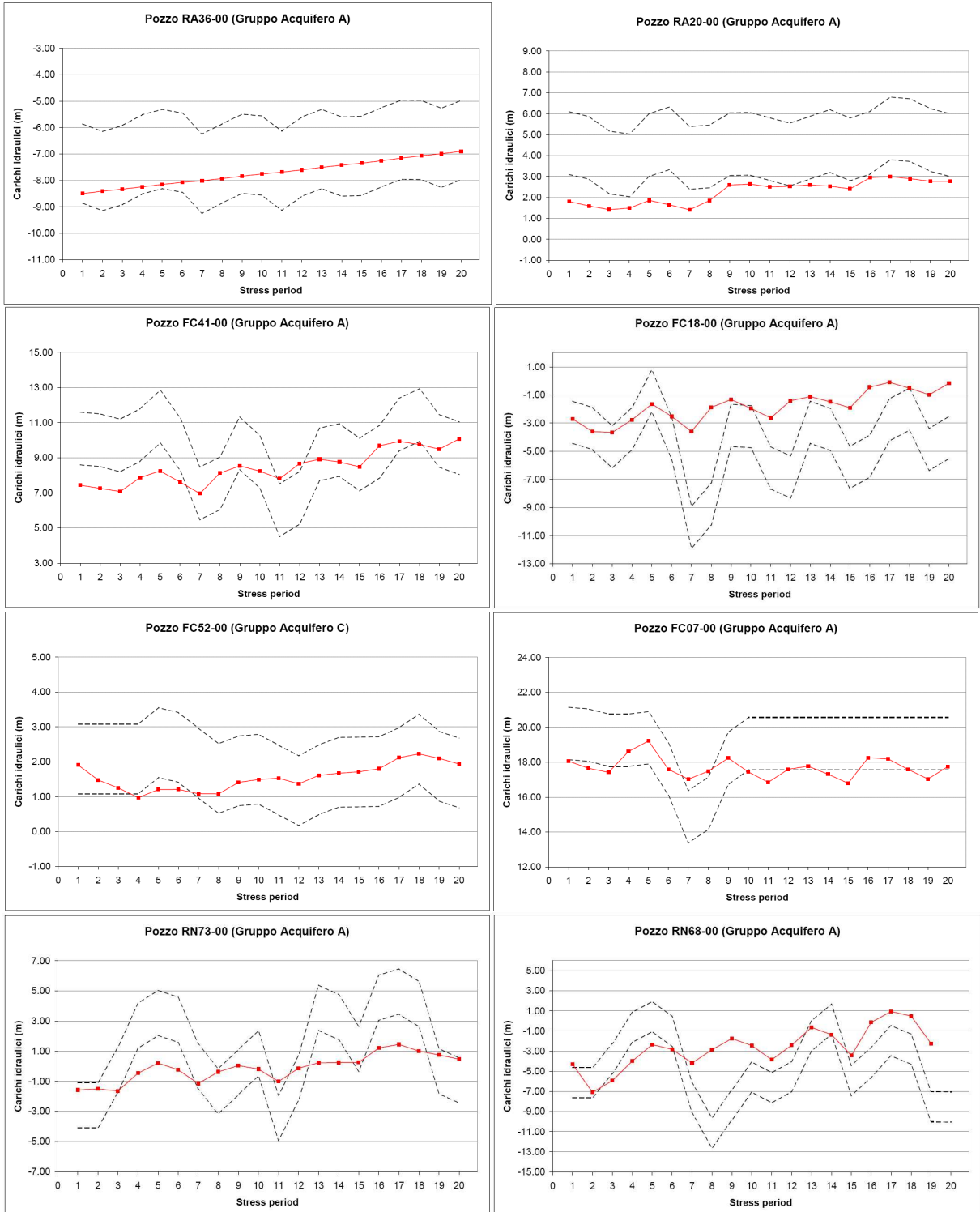


Figura 4.25, segue. (N.B. per il pozzo FC52-00 i dati osservati sono disponibili a partire dal T4, per il FC07-00 fino al T10 e per il RN74-00 partire dal T3.

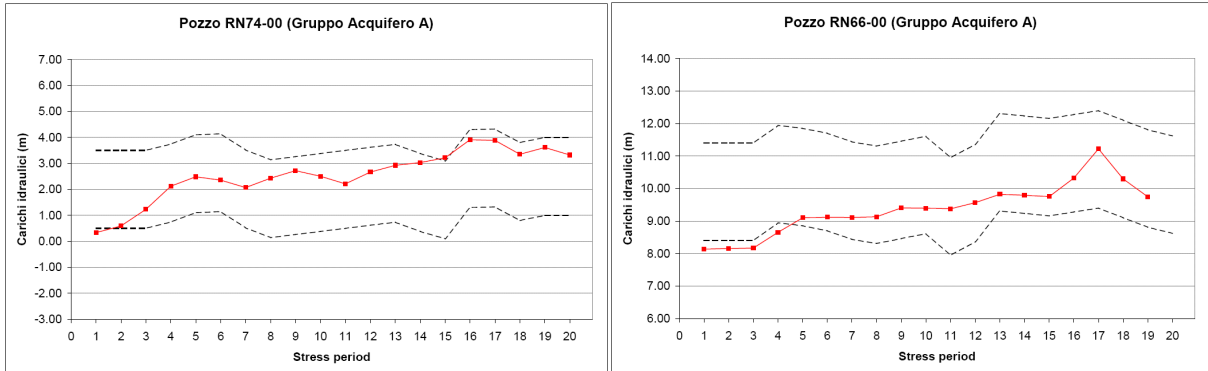


Figura 4.26: distribuzione degli scarti nel periodo T1, tutti i pozzi

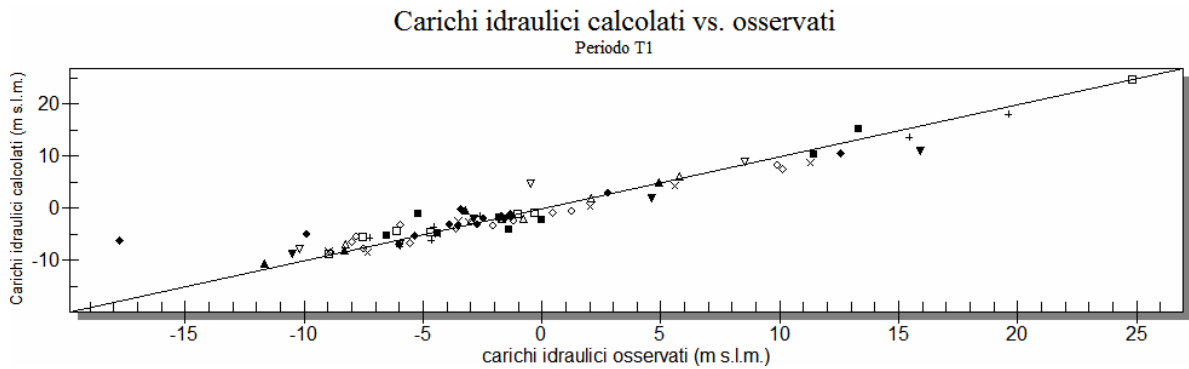


Figura 4.27: distribuzione degli scarti nel periodo T10, tutti i pozzi

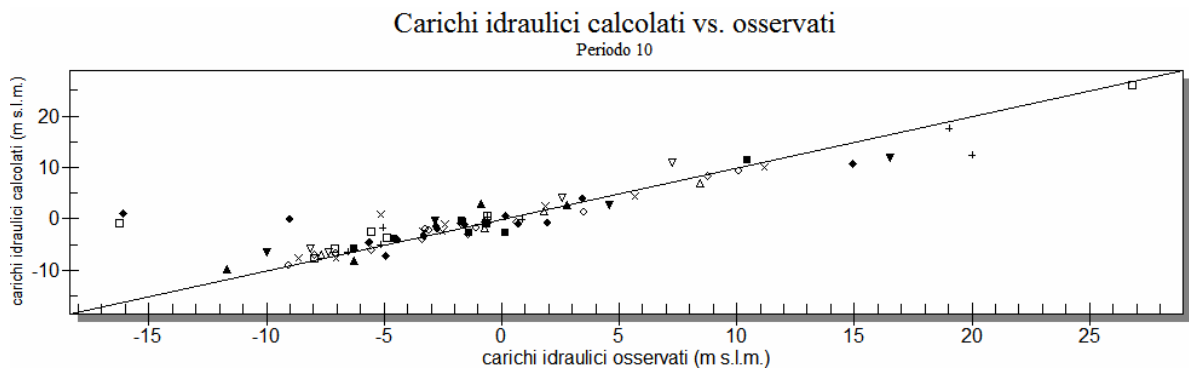
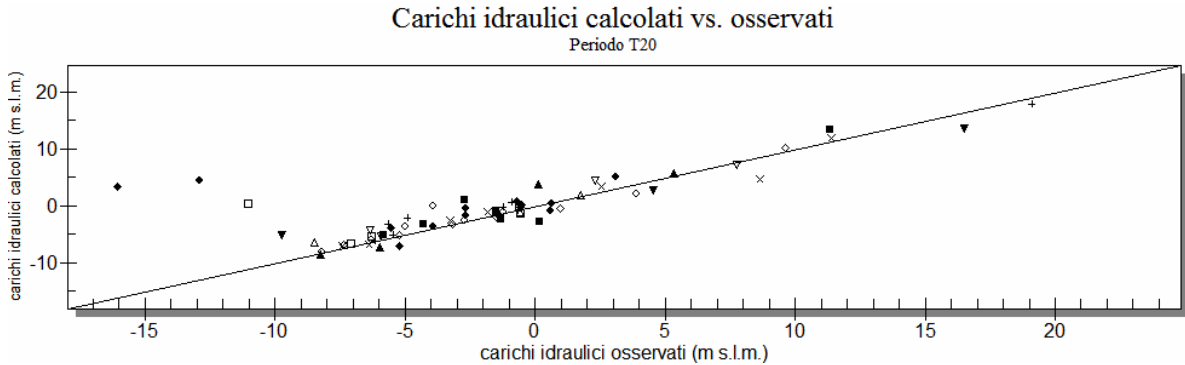


Figura 4.28: distribuzione degli scarti nel periodo T20, tutti i pozzi



4.1.2.4 *Il bilancio idrogeologico*

Nelle figure seguenti viene rappresentato il bilancio idrogeologico dell'intero modello di flusso. Il bilancio idrogeologico viene restituito da Modflow ed è composto dalle seguenti voci che possono costituire un ingresso e/o una uscita di acqua dall'intero sistema. Così ad esempio nella Figura 4.29, che rappresenta le portate medie annue calcolate dal modello, sono riportate le seguenti voci di bilancio:

- ricarica: rappresenta il termine di alimentazione del sistema, è costituito dalla ricarica meteorica e dai contributi della ricarica fluviale; tale termine è sempre positivo nel bilancio in quanto costituisce sempre una entrata di acqua all'interno del sistema;
- prelievi: il prelievo di acque sotterranee è un termine sempre negativo nel bilancio in quanto nel nostro caso rappresenta le uscite di acqua dal sistema; nella successiva Figura 4.31 i prelievi vengono suddivisi per le tre macroaree di Figura 4.38 evidenziando la predominanza dei volumi estratti nella parte del modello situata a sud di Lido di Savio. Si nota anche la forte variabilità stagionale del prelievo, dovuta alla presenza dei prelievi irrigui, con il picco relativo all'estate siccitosa del 2003.
- immagazzinamenti: sono i quantitativi di acqua che accompagnano le fasi cicliche stagionali di innalzamento e calo dei livelli piezometrici. Come termini del bilancio possono essere sia negativi (immagazzinamento di acqua ricaricata nel sistema), sia positivi (compensano i prelievi di acque sotterranee nelle fasi di calo piezometrico). In figura viene rappresentato l'immagazzinamento netto che come dato medio annuo risulta essere negativo (prevalgono le fasi di ricarica rispetto a quelle di consumo di acqua) in tutti gli anni tranne l'ultimo dove la tendenza si inverte e prevale invece la fase di consumo della risorsa idrica sotterranea. Tutto ciò è ancora più evidente nella Figura 4.30 dove il bilancio idrogeologico è esplicitato nella sua evoluzione stagionale in corrispondenza della successione degli stress period del modello; i trimestri invernali sono infatti quelli dove si concentra la maggiore possibilità di alimentazione del sistema (gli immagazzinamenti sono negativi), mentre nei trimestri estivi si assiste al consumo della risorsa;
- dreno: la condizione di dreno è imposta nella porzione nord del modello in corrispondenza del sistema delle bonifiche ferraresi;
- GHB (General Head Boundary): è il flusso di scambio con la condizione al contorno che in questo caso è posta sui bordi est ovest e nord. I volumi riportati sono complessivi per i tre bordi a potenziale imposto e rappresentano il flusso netto, ovvero la differenza tra le entrate e le uscite.

Figura 4.29: bilancio idrogeologico, portate medie annue (m3/s)

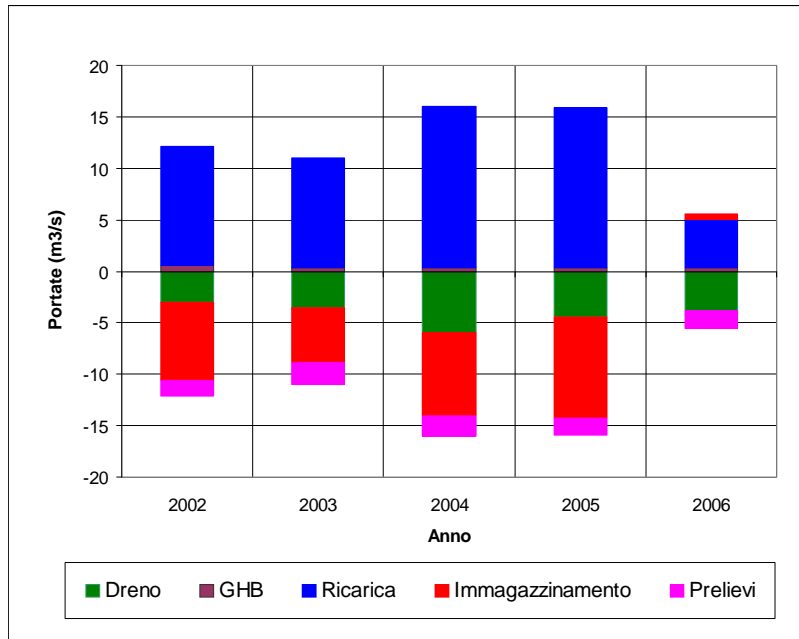


Figura 4.30: evoluzione temporale del bilancio idrogeologico riferito all'intero modello (m3/s)

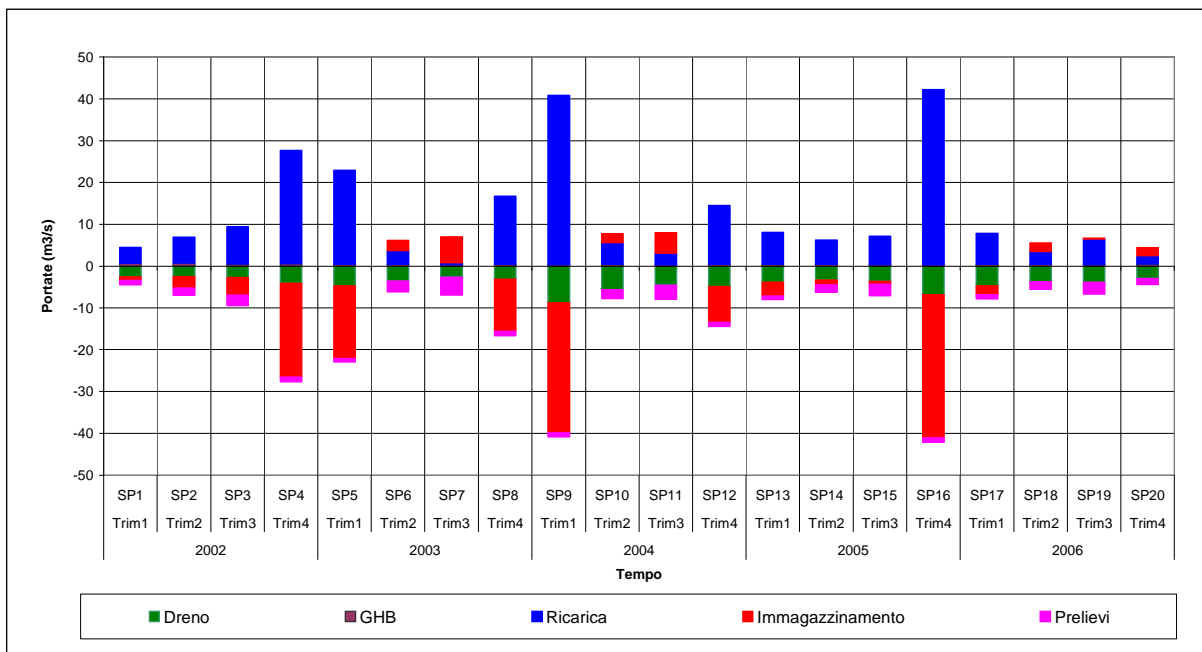
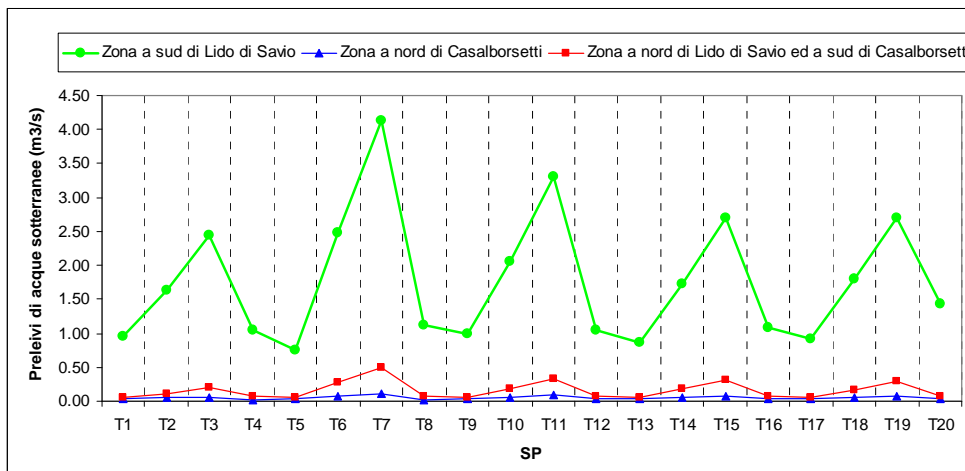


Figura 4.31: prelievi di acque sotterranee, distinti per le tre macroaree di suddivisione del modello (m³/s)



4.2 IL MODELLO NUMERICO DI SUBSIDENZA

4.2.1 Descrizione del modello numerico di subsidenza

La subsidenza rappresenta l'effetto finale di un processo di compattazione che può avvenire per due cause principali:

- a) riduzione di volume del suolo per effetto di alterazioni intrinseche del suolo stesso. In questo caso si tratta ad esempio di riduzioni di volume che suoli ricchi di sostanza organica subiscono per effetto del processo di ossido-riduzione;
- b) riduzione di volume dovuta all'estrazione del fluido contenuto in una roccia, che può essere distinto anche in base alla natura della roccia:
 1. rocce porose: l'estrazione del fluido provoca la diminuzione della pressione neutra a svantaggio della pressione tra i granuli che si addensano perdendo di volume (comportamento elasto-plastico);
 2. rocce fratturate: come sopra, salvo che la variazione della pressione si applica ad un mezzo rigido in cui l'addensamento avviene prevalentemente per rottura della roccia.

La pianura emiliano-romagnola cade evidentemente nel caso specifico indicato in b.1), dato che non sono presenti ammassi fratturati e che gli effetti indicati in a) sono riconducibili solo alle vicende delle bonifiche passate e recenti della bassa pianura che si presume abbiano ormai esaurito il loro corso.

Restano quindi da discriminare gli effetti connessi alla perdita di pressione per effetto del deflusso del fluido contenuto nell'ammasso poroso, fluido che, nel caso specifico, può essere ricondotto solo all'acqua e agli idrocarburi gassosi, e quindi alle cause che a loro volta generano tali deflussi.

Variazioni significative di pressione, tali da attivare concretamente il processo di consolidazione di un ammasso poroso, sono fondamentalmente riconducibili a cause naturali, tipicamente l'aumento di pressione litostatica che accompagna il riempimento di un bacino sedimentario, e a cause antropiche, tipicamente lo sfruttamento di campi d'acqua, di campi di gas, la costruzione di opere.

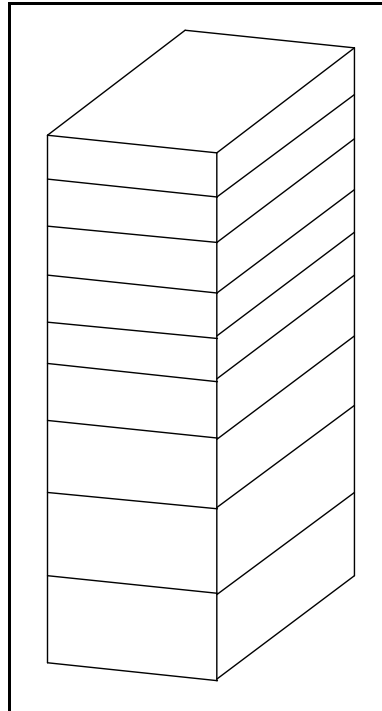
In tutti questi casi il meccanismo che sovrintende alla subsidenza è sostanzialmente il medesimo, dato che, indipendentemente dalla causa scatenante, l'effetto è quello dello spostamento del fluido attraverso la roccia e da questa verso l'esterno.

Nel paragrafo 3.1.2 sono stati già esposti i riferimenti principali che sono stati utilizzati per sviluppare il modello qui descritto. La teoria della consolidazione, come proposta da Verruijt [11], costituisce ancora oggi la base fondamentale per affrontare questo genere di problemi e può essere applicata in una, due o tre dimensioni in base alle esigenze e in base alle disponibilità operative.

Già nel corso dell'esperienza precedente, condotta sulla conoide del Reno, si è considerato preferibile optare per una applicazione monodimensionale verticale, che esprime quindi il contesto più semplice, dedicando invece molta attenzione alla fase di sviluppo e taratura dl modello, considerando che, ancora oggi, le incertezze elevate dipendenti dalla conoscenza del territorio fanno preferire una applicazione semplice ma ben fatta piuttosto che il contrario.

L'applicazione proposta per la fascia costiera ricalca quindi quella precedentemente realizzata per la conoide alluvionale del Reno e consiste in un insieme di modelli monodimensionali verticali, ciascuno dei quali corrisponde ad una colonna di celle del modello di flusso:

Figura 4.32: Schema di una colonna, per ciascuna colonna $i=1,n$



Per ciascuna colonna sono note, come soluzione del modello di flusso, le serie del carico idraulico discretizzato nel tempo e nello spazio; dal modello di flusso il modello di subsidenza rileva anche la struttura geometrica e la distribuzione delle litologie sulla quale è appoggiata la parametrizzazione di entrambi i modelli.

Per risolvere l' Equazione 3.1 di pagina 12 è quindi necessaria solo la conoscenza del modulo di compressibilità m_v , che a sua volta determina il coefficiente di consolidazione c_v espresso dalla:

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

e che entra direttamente nell'equazione che governa il fenomeno. E' quindi la determinazione della compressibilità m_v a rappresentare la vera difficoltà applicativa del problema.

Rispetto all'applicazione sul Reno sono state introdotte alcune modifiche per migliorare soprattutto l'ambiente di lavoro e alcuni aspetti relativi alle condizioni di calcolo:

1. l'ambiente operativo è stato inserito in un contesto grafico 3D per sfruttare al meglio tutte le opportunità di un livello elevato di interazione tra l'utente e l'applicazione;

2. la variazione di pressione, dedotta dalla soluzione con il modello di flusso, è stata inserita direttamente nell'equazione, mentre nel caso precedente era stata adottata una soluzione più semplice, corrispondente ad una variazione di pressione totale per ciascun ciclo di tempo. Questo ha consentito di ottenere una risposta molto più modulata nel tempo del processo di consolidazione.

4.2.2 Interfaccia Sutrawin e modalità di collegamento col modello di flusso

Il codice di calcolo che simula la compattazione è stato inserito all'interno di un ambiente di sviluppo dedicato all'idrogeologia (SutraWin) che ha le seguenti caratteristiche:

- ambiente Windows con grafica 3d basata su OpenGL;
- moduli operativi per la gestione e la manipolazione dei dati di ingresso e uscita;
- generatore di griglie irregolari adatte per applicazioni agli elementi finiti;
- moduli per l'adattamento della griglia al modello idrogeologico concettuale (uso di sezioni geologiche, adattamento a superfici complesse ecc.);
- modulo 3d di geostatistica derivato da GSLIB [42](Deutsch, C.V., Journel, A.G, (1997). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide* (Applied Geostatistics Series), Second Edition, Oxford University Press, 369 pp);
- Sutra3d [43] (Voss, C.I., A.M. Provost, (2002). *SUTRA: A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport*. Water-Resour. Invest. Rep. 02-4231. USGS, Reston, VA.);
- modulo per la simulazione monodimensionale della compattazione.

Per rispondere alle esigenze legate a questo progetto, SutraWin è stato dotato anche di una interfaccia compatibile con ModFlow 2000, in grado di importare progetti completi e le soluzioni corrispondenti. Questa interfaccia consente di trasferire molto velocemente nel nuovo ambiente un progetto sviluppato con ModFlow.

4.2.3 Calibrazione (taratura) del modello numerico di subsidenza

4.2.3.1 Individuazione del metodo

La taratura del modello di subsidenza avviene assumendo come traguardo la variazione di quota al suolo rilevata in corrispondenza di ciascuna colonna del modello e in corrispondenza di un appropriato intervallo di tempo. Un obiettivo non secondario della taratura è quello di raggiungere un grado di eterogeneità elevato nell'attribuzione dei coefficienti, dato che attraverso l'eterogeneità è possibile ottenere, in linea di principio, risultati migliori.

Indicando con z l'abbassamento noto nella posizione h dello spazio e al tempo t , e z^* l'equivalente stimato dal modello nella stessa posizione dello spazio e del tempo, deve essere per ogni colonna del modello:

$$z(h,t) - z^*(h,t) \rightarrow 0 \quad \text{Equazione 4.1}$$

Ovvero:

$$\left(z_{\text{naturale}}(h,t) + z_{\text{acqua}}(h,t) + z_{\text{gas}}(h,t) \dots \right) - z^*(h,t) \rightarrow 0 \quad \text{Equazione 4.2}$$

La calibrazione consiste quindi nella ricerca per tentativi dell'insieme dei coefficienti m_v in grado di minimizzare lo scarto tra osservazioni e valori stimati e massimizzare invece la varianza dell'insieme degli m_v adottati.

La principale difficoltà del processo di calibrazione risiede nel fatto che non è sempre univoco il rapporto tra le cause (prelievo di acqua sotterranea, prelievo di gas) e l'effetto che viene invece osservato cumulativamente al suolo (Figura 3.22). Il primo passo consiste quindi nella definizione dell'obiettivo della taratura: infatti, poiché il modello di flusso simula esclusivamente le perdite dovute all'estrazione di acqua da falda, è necessario definire il primo termine della (4.2) in modo che possa rappresentare l'esito della compattazione per effetto della sola estrazione d'acqua. Per questo motivo, è stato necessario definire una strategia per isolare:

1. il contributo della subsidenza "naturale";
2. il contributo della subsidenza dovuta all'estrazione di idrocarburi.

Il contributo della subsidenza naturale è stato valutato ed opportunamente detratto al valore di subsidenza totale, in base a quanto precedentemente descritto al paragrafo 3.1.4.6.

E' più difficile l'operazione analoga per la valutazione del secondo contributo, quello da estrazione di idrocarburi, dato che le stime di tali effetti sono disponibili solo localmente e per casi specifici ([17], Gambolati G. (1998), CENAS: Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence. Kluwer). Alla scala dell'intero modello è possibile richiamare l'analisi condotta nel precedente paragrafo 3.1.4.6.2 e relativa ai dati di coltivazione attuale e pregressa dei giacimenti di idrocarburi presenti sul territorio e di possibile influenza sulla fascia costiera, che permette almeno dal punto di vista qualitativo di individuare le zone dove tali estrazioni possono essere una concausa possibile insieme all'estrazione dell'acqua.

Definito adeguatamente l'obiettivo della taratura o perlomeno i possibili criteri di lettura dei risultati delle simulazioni, la ricerca dell'insieme ottimo di m_v è stata condotta su base combinatoriale associando all'analisi alcuni vincoli per limitare il numero delle combinazioni. Questi vincoli sono stati definiti come segue:

- a) la conduttività idraulica ottenuta al termine della taratura del modello di flusso è stata riaggregata in 31 classi litologiche;
- b) ciascuna di queste classi è stata definita con un limite minimo e massimo di m_v ;
- c) le classi sono state applicate per intervalli discreti a ciascuna colonna del modello ma in modo indipendente da colonna a colonna

Assumendo per ciascuna colonna un numero finito (piccolo) di classi litologiche, il numero di combinazioni n da verificare per ciascuna colonna j può essere indicato con:

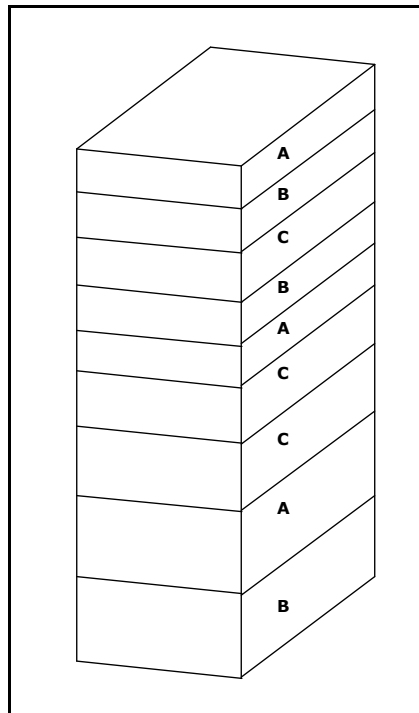
$$n_j = \{classi\} \cdot \frac{m_{v\max} - m_{v\min}}{\Delta m_v}$$

Il calcolo avviene attribuendo un valore iniziale di m_v a tutte le celle della medesima classe (es.: classe A), poi il valore iniziale viene incrementato progressivamente calcolando volta per volta la compattazione con la (3.1). Si procede poi con tutte le altre classi nello stesso modo finché non si è raggiunto lo scarto minimo rispetto al valore di compattazione misurato.

L'obiettivo della eterogeneità è tenuto sotto controllo valutando gli scarti ottenuti sull'intero insieme di colonne del modello; analizzando l'errore medio in funzione dell'intervallo di scansione si nota che, ad intervalli di scansione più piccoli, corrisponde un errore medio di calibrazione minore, quindi maggiore affidabilità anche se con tempi di calcolo più lunghi.

La calibrazione non vincola invece i risultati che vengono ottenuti tra colonna e colonna e in questo modo ciascuna classe può assumere un valore diverso da colonna a colonna.

Figura 4.33: schema dell'analisi per combinazioni



Infine va rilevato che l'ordine con cui le classi di m_v vengono esplorate è significativo, dato che il test viene eseguito per valori di compattazione che tendono ad aumentare. Per evitare lo schiacciamento eccessivo di classi appartenenti a tipi litologici poco comprimibili (ghiaie e sabbie principalmente), l'insieme delle classi è ordinato per comprimibilità decrescente. Ad ogni buon conto sono stati eseguiti dei test anche con l'ordinamento inverso, ma senza ottenere differenze apprezzabili.

4.2.3.2 *Applicazione del metodo*

Per comprendere meglio le dinamiche ricostruite con il modello di subsidenza sono state impostate due simulazioni, condotte sulla base del procedimento descritto al precedente paragrafo e fissando per ciascuna di esse intervalli diversi di compressibilità (punto b di pagina 60) secondo quanto riportato nella successiva Tabella 4.1. In particolare:

- la Simulazione (A) è stata condotta utilizzando i limiti massimi e minimi delle compressibilità desunte dai dati bibliografici disponibili secondo quanto precedentemente riportato nel paragrafo 3.1.4.5 (Intervallo A);
- la Simulazione (B) è stata condotta aumentando di un ordine di grandezza i limiti massimi e minimi delle compressibilità del punto precedente (Intervallo B).

L'analisi dei risultati delle due simulazioni ha permesso, al livello dell'intera area di studio, di:

- effettuare alcune valutazioni sulla capacità del modello di subsidenza di riprodurre, e con quali coefficienti di compressibilità, le velocità di abbassamento del suolo osservate;
- confrontarsi con le cause che possono aver contribuito agli abbassamenti che, come già anticipato, possono non essere univocamente determinate nel caso di compresenza di estrazione di acqua ed estrazione di gas;
- individuare le zone in cui il modello di subsidenza non è in grado di operare correttamente a causa delle difficoltà del modello di flusso a riprodurre gli andamenti del carico idraulico osservato.

Tabella 4.1: valori di m_v negli scenari di Intervallo A e Intervallo B

Id Litologie GMS	Litologia semplificata	Compressibilità m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) intervallo A	Compressibilità m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) intervallo B
214,300,1	ghiaia	$3 \cdot 10^{-7} \div 9 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8} \div 9 \cdot 10^{-6}$
2,3,24	sabbia media		
4,5,6	sabbia fine		
7,8,25,9,10	sabbia argillosa	$7 \cdot 10^{-6} \div 7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-7} \div 7 \cdot 10^{-6}$
11,12,26,13,14,15	limo sabbioso		
16,17,27,18,19	limo argilloso	$1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^{-3}$
20,28,21,22,23,29	argilla limosa		

Le figure che seguono sono state prodotte per consentire l'analisi di dettaglio del comportamento del metodo di calibrazione del modello di subsidenza secondo tali ipotesi. Esse sintetizzano, per ogni colonna del modello risulta col modello di subsidenza, rappresentata da un punto sul grafico, il rapporto tra i valori calcolati ed i valori osservati di subsidenza. Sul grafico viene indicato anche l'intervallo $\pm 10\%$ rispetto al valore del dato osservato. Il numero di colonne risolte è pari a 2366.

Occorre ricordare che in entrambe le situazioni analizzate nelle figure (Intervallo A ed Intervallo B) le osservazioni, e di conseguenza gli scarti analizzati, fanno riferimento ai valori di subsidenza di Figura 3.27 che sono quindi complessivi rispetto alle cause che la possano avere generata.

Lo scenario dell'Intervallo A, più restrittivo ma più aderente alle conoscenze di carattere bibliografico, riproduce gli abbassamenti rilevati per circa il 65% delle colonne del modello (scarti inferiori al 10% rispetto alle osservazioni) e la media degli errori, sia sottostime che sovrastime, è di 1.8 cm nei 5 anni della simulazione (Figura 4.34 e Tabella 4.4).

L'Intervallo B, più ampio, permette di riprodurre con una buona approssimazione gli abbassamenti rilevati, per circa il 95% delle colonne del modello (scarti inferiori al 10% rispetto alle osservazioni) e la media degli errori è di 1.7 cm nei 5 anni (Figura 4.35 e Tabella 4.4). Gli scarti eccedenti il 10% sono qui indicati rispettivamente come sottostime e sovrastime e sono stati analizzati in dettaglio per trovare la forma di calibrazione migliore; infatti, la Tabella 4.2 riporta separatamente gli scarti in più (sovrastime) e in meno (sottostime) nei due casi A e B.

Figura 4.34: subsidenza osservata e calcolata con la calibrazione dell'Intervallo A.

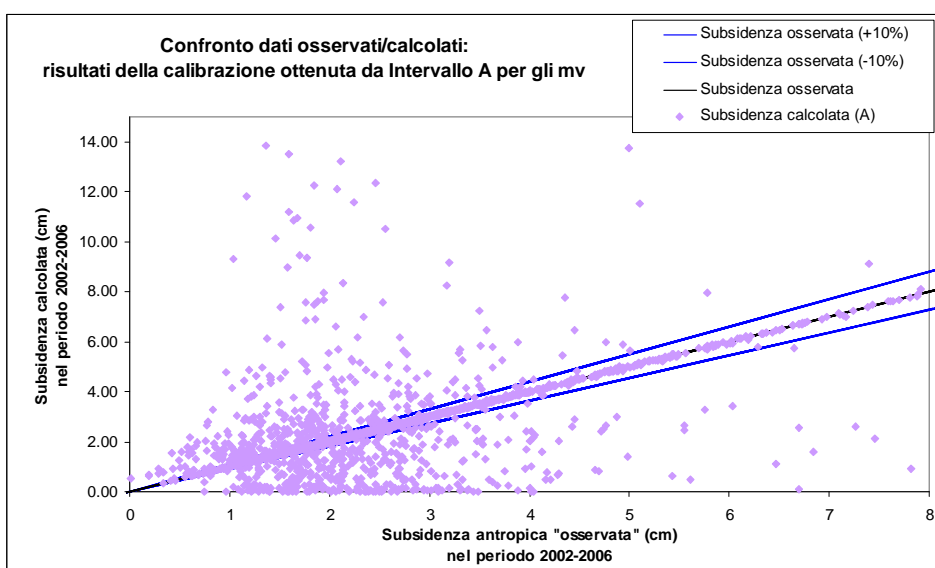
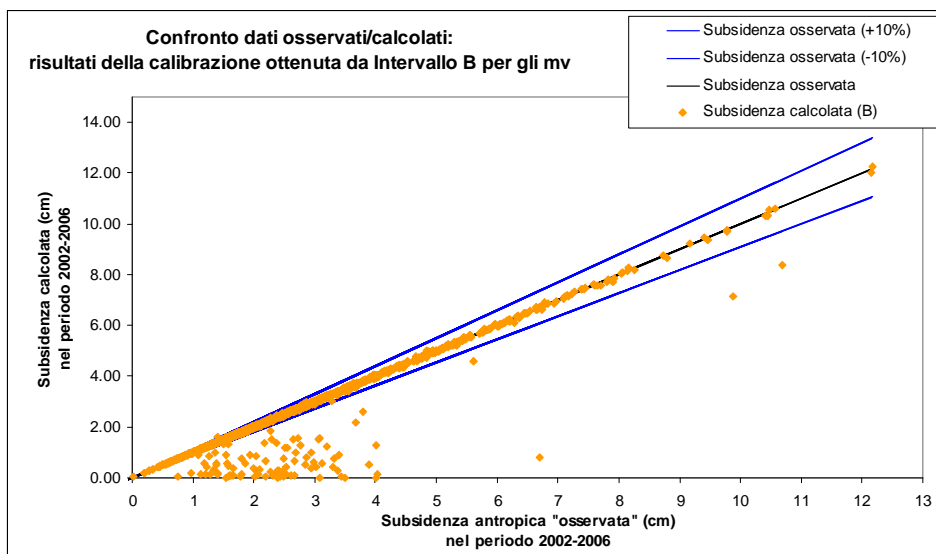


Figura 4.35: subsidenza osservata e calcolata con la calibrazione dell'Intervallo B.



Il valore riportato nella quinta colonna (media calcolata (B-A)) rappresenta quindi l'errore della calibrazione (A) recuperato con la calibrazione (B), utilizzando intervalli più ampi di m_v secondo quanto riportato in Figura 4.36 e in Figura 4.37. In Figura 4.37, in particolare, sono esplicitati i valori medi necessari a recuperare al meglio le sovrastime mediante l'abbassamento del valore minimo di m_v e le sottostime con l'aumento del massimo di m_v .

Tabella 4.2: analisi degli scarti tra la calibrazione (A) e la calibrazione (B) per le colonne con errore maggiore del 10%

Colonne con scarto maggiore del 10 %	Media osservata in cm	Media calcolata in cm (A)	Media calcolata in cm (B)	Media calcolata in cm (B-A)	Note
296	2.70	1.30	2.70	1.40	La calibrazione con l' Intervallo A sottostima; la calibrazione con l'Intervallo B recupera completamente la sottostima
382	1.84	3.72	1.84	-1.88	La calibrazione con l' Intervallo A sovrastima; la calibrazione con l'Intervallo B recupera completamente la sovrastima
93	2.56	0.08	0.78	0.70	La calibrazione con l' Intervallo A sottostima; la calibrazione con l' Intervallo B non riesce a recuperare l'errore
5	0.08	3.85	0.54	-3.32	La calibrazione con l' Intervallo A sovrastima; la calibrazione con l'Intervallo B non riesce a recuperare l'errore
776	2.23	2.35	2.03	-0.33	Totali

Figura 4.36: valori medi di m_v ottenuti dalle due calibrazioni A e B in funzione delle classi litologiche

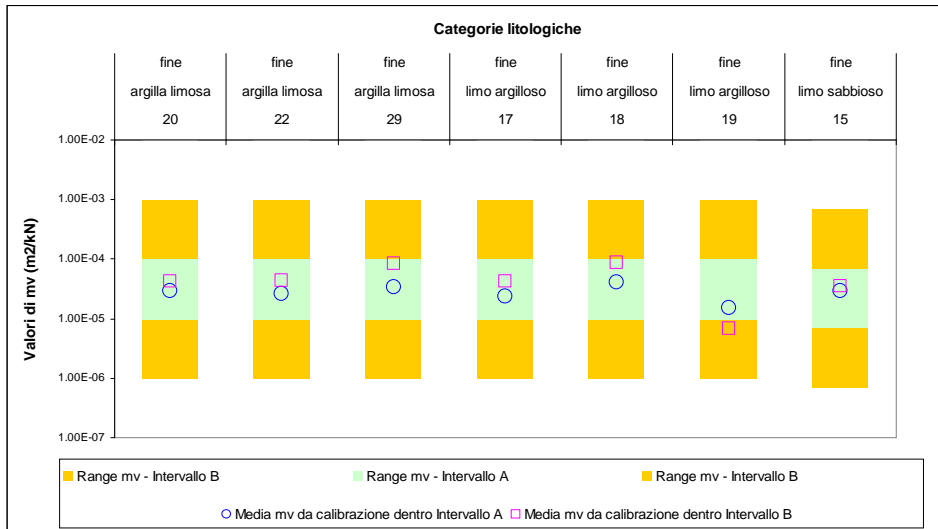
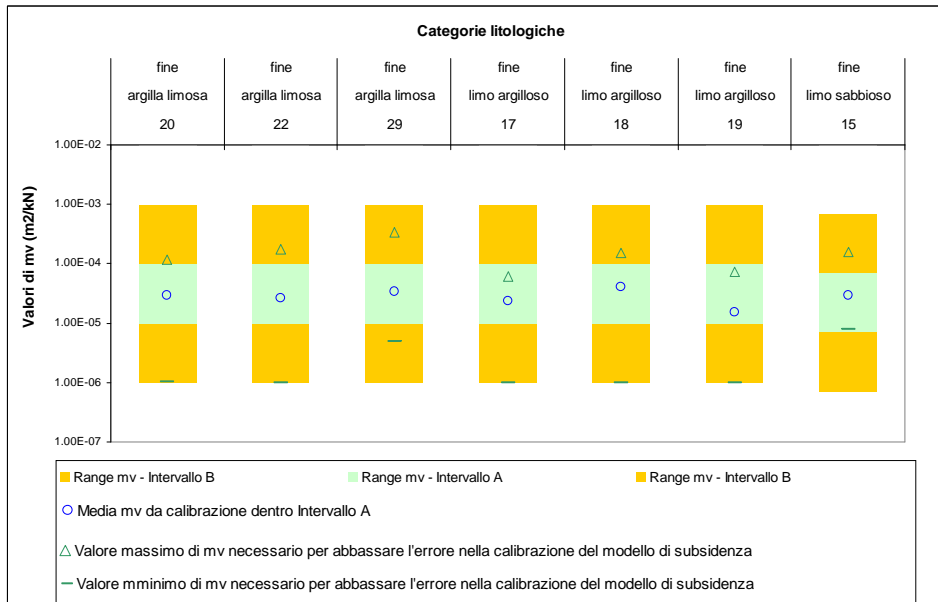


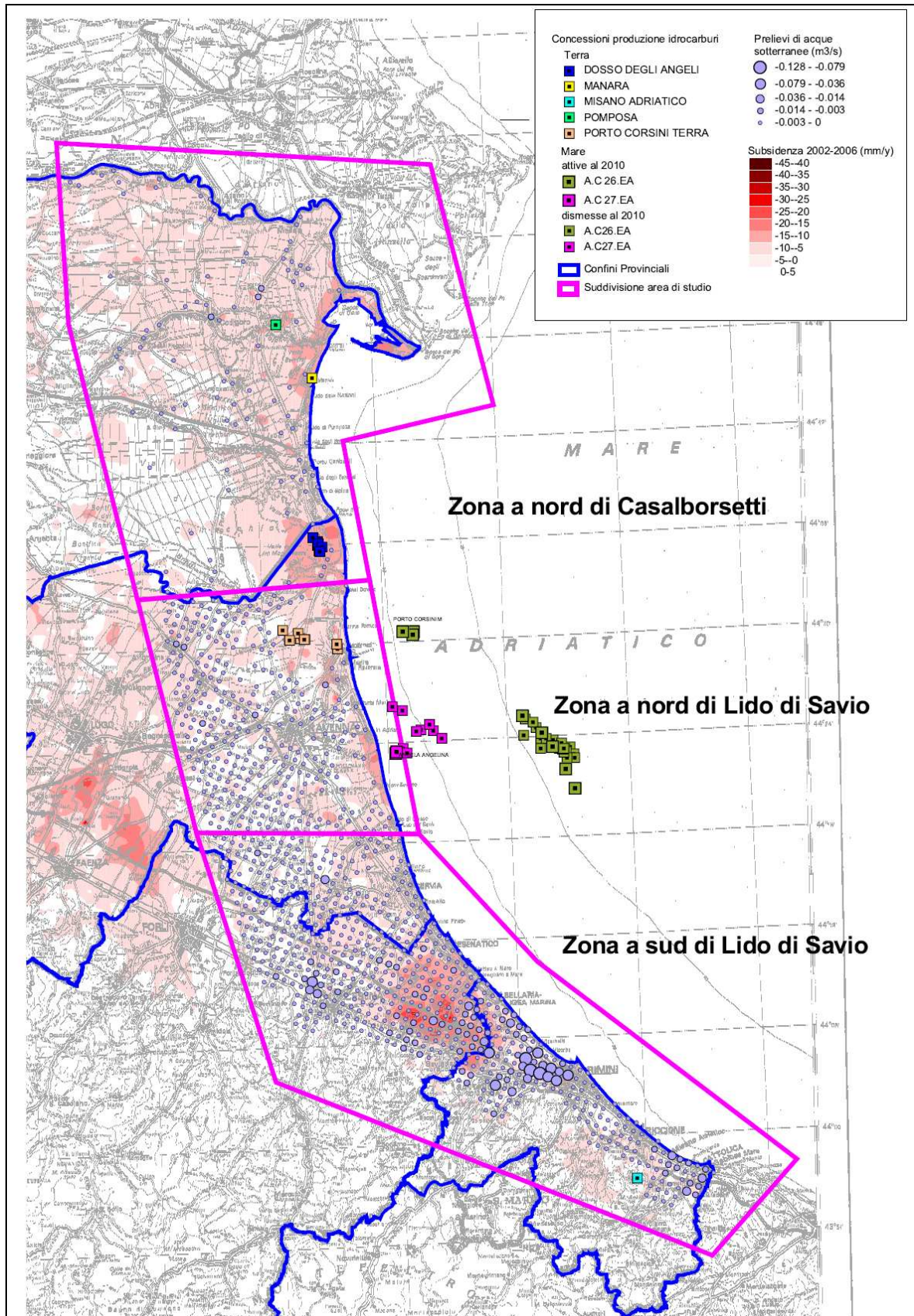
Figura 4.37: valori medi di m_v utilizzati per recuperare le sovrastime e le sottostime



Nella Figura 4.38 l'intero modello di subsidenza è stato suddiviso in tre zone, opportunamente individuate per cercare di discriminare, all'interno dell'analisi che verrà condotta, tra le possibili cause/concause di subsidenza:

- zona a sud di Lido di Savio: individuata anche da [16] (*Eni S.p.A – AGIP, ARPA Emilia-Romagna (2003), Studio della Subsidenza Antropica generata dall'estrazione di acqua di falda lungo la costiera emiliano-romagnola.*) come zona non soggetta ad effetti di subsidenza dovuti ad estrazione di gas, anche se in realtà va segnalato il giacimento di gas naturale di Misano Adriatico in produzione dal 2004 con una produzione media dichiarata pari a 1.7 milioni di Sm³;
- zona a nord di Lido di Savio dove occorre valutare la compresenza sia dell'estrazione di gas, sia di acque sotterranee. Questa zona, sulla base della distribuzione dei prelievi di acque sotterranee (Figura 3.20), particolarmente esigui nella porzione settentrionale della stessa, può essere ulteriormente suddivisa nelle due sottozone poste rispettivamente a nord ed a sud di Casalborgsetti.

Figura 4.38: suddivisione del modello in funzione delle possibili cause di subsidenza



Nella stessa Figura 4.38 sono quindi riportati anche la distribuzione dei prelievi di acque sotterranee e l'ubicazione dei pozzi/piattaforme di estrazione gas ritenute pertinenti per l'area di interesse.

La Tabella 4.3 riporta in sintesi i valori corrispondenti agli errori complessivi di calibrazione, derivati dalle due ipotesi di scenario per ciascuna sottozona e totale. Nella Tabella 4.4 sono riportate invece le percentuali di colonne risolte con un errore contenuto entro il 10% del valore di subsidenza osservata e posta come obiettivo della calibrazione, e l'errore medio (valore assoluto delle sovrastime e sottostime) relativo alle rimanenti colonne del modello.

Tabella 4.3: sintesi degli errori di calibrazione per zona e per scenario sui cinque anni di simulazione

Zona	Errore medio complessivo della simulazione(cm)	
	Intervallo A	Intervallo B
Zona a sud di Lido di Savio	1.34	0.22
Zona a nord di Lido di Savio ed a sud di Casalborsetti	0.49	0.05
Zona a nord di Casalborsetti	0.24	0.03
Totale	0.61	0.09

Tabella 4.4: sintesi degli errori di calibrazione: dettaglio sovrastime e sottostime per zona e per scenario sui cinque anni di simulazione

Zona	Percentuale delle colonne con errore dentro il 10%		Errore medio delle colonne con errore oltre il 10%(cm)	
	Intervallo A	Intervallo B	Intervallo A	Intervallo B
Sud di Lido di Savio	45	89	2.4	1.8
Nord di Lido di Savio ed a sud di Casalborsetti	66	97	1.4	1.5
Nord di Casalborsetti	78	98	1.0	1.2
Totale	66	96	1.8	1.7

L'analisi prosegue quindi esaminando le singole zone.

4.2.3.3 Zona a sud di Lido di Savio

L'areale posto a sud di Lido di Savio è già stato evidenziato in [16] come non soggetto a subsidenza antropica dovuta ad estrazione di gas. Si rileva tuttavia la presenza del giacimento di Misano Adriatico per il quale si segnala che:

1. è in produzione dal 2004 con una media di 1.7 milioni di Sm³ di gas estratti dal sottosuolo;
2. è collocato in posizione a monte dell'areale oggetto della modellazione;
3. non si evidenziano al momento particolari alterazioni delle velocità medie di abbassamento del suolo nello spazio, rispetto alle zone limitrofe per il periodo 2002-2006, e nel tempo rispetto al periodo precedente 1992-2000.

Si può quindi confermare quanto precedentemente espresso e ritenere l'intero areale come soggetto a subsidenza di tipo antropico e generata dalla sola estrazione di acqua dal sottosuolo. Ciò semplifica l'analisi per questa zona in quanto i valori di subsidenza antropica riportati nella precedente Figura 3.27 possono essere analizzati in rapporto ai soli prelievi di acque sotterranee imputati al modello di flusso. Le figure e le tabelle successive riportano il dettaglio, per la zona a sud di Lido di Savio, dell'analisi precedentemente condotta per l'intero modello (figure da Figura 4.39 a Figura 4.42) che può essere così sintetizzata:

- viene evidenziata la necessità di dover mediamente aumentare i valori dei coefficienti di compressibilità in alcune zone (che sono situate nella parte nord orientale della zona esaminata posta a nord di Cesenatico) per poter correttamente riprodurre la subsidenza osservata (confronto della Figura 4.39 con la successiva Figura 4.40). Gli errori medi recuperabili con l'allargamento dell'intervallo di m_v in fase di calibrazione sono riportati in Tabella 4.5;
- tale aumento è comunque contenuto entro il mezzo ordine di grandezza rispetto ai valori massimi previsti dall'intervallo A del relativo scenario di calibrazione del modello (Figura 4.41 e Figura 4.42).
- rimane comunque una zona più ristretta posta a nord di Cervia dove i dati di subsidenza non riescono comunque ad essere riprodotti dal modello, ciò è imputabile quasi sicuramente al modello di flusso che andrà quindi verificato in questa zona soprattutto in relazione alla voce dei prelievi.

Figura 4.39: subsidenza osservata e calcolata con la calibrazione dell'Intervallo A (zona a sud di Lido di Savio)

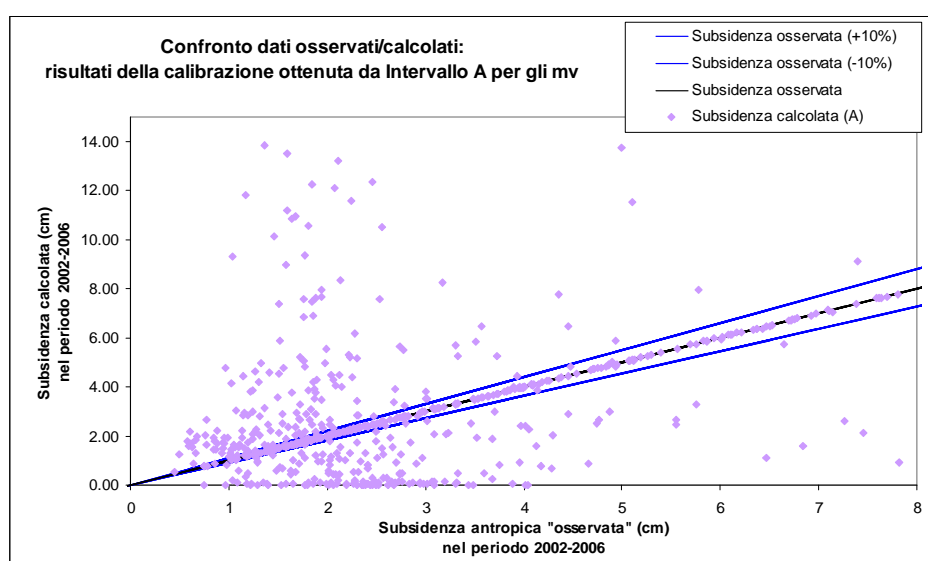


Figura 4.40: subsidenza osservata e calcolata con la calibrazione dell'Intervallo B (zona a sud di Lido di Savio)

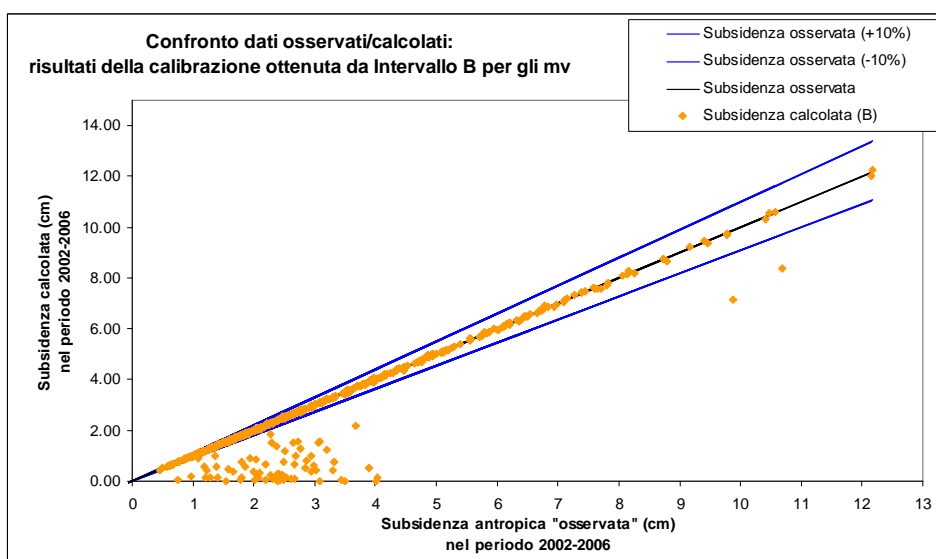


Tabella 4.5: scarti calcolati con A e B (zona a sud di Lido Savio) per le colonne con errore maggiore del 10%

Colonne con scarto maggiore del 10 %	Media osservata in cm	Media calcolata in cm (A)	Media calcolata in cm (B)	Media calcolata in cm (B-A)	Note
103	3.29	1.52	3.28	1.76	La calibrazione con l' Intervallo A sottostima; la calibrazione con l'Intervallo B recupera completamente la sottostima
179	1.88	4.72	1.88	-2.84	La calibrazione con l' Intervallo A sovrastima; la calibrazione con l'Intervallo B recupera completamente la sovrastima
70	2.60	0.08	0.75	0.67	La calibrazione con l' Intervallo A sottostima; la calibrazione con l' Intervallo B non riesce a recuperare l'errore
3	0.00	0.21	0.23	0.03	La calibrazione con l' Intervallo A sovrastima; la calibrazione con l'Intervallo B non riesce a recuperare l'errore
355	2.41	2.84	2.05	-0.79	Totali

Figura 4.41: valori medi di m_v ottenuti dalle due calibrazioni A e B in funzione delle classi litologiche B (zona a sud di Lido Savio)

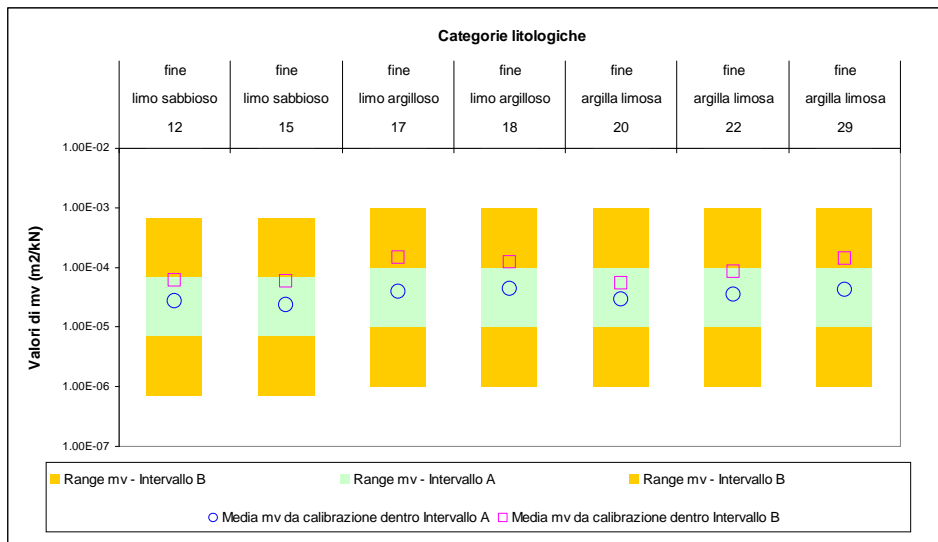
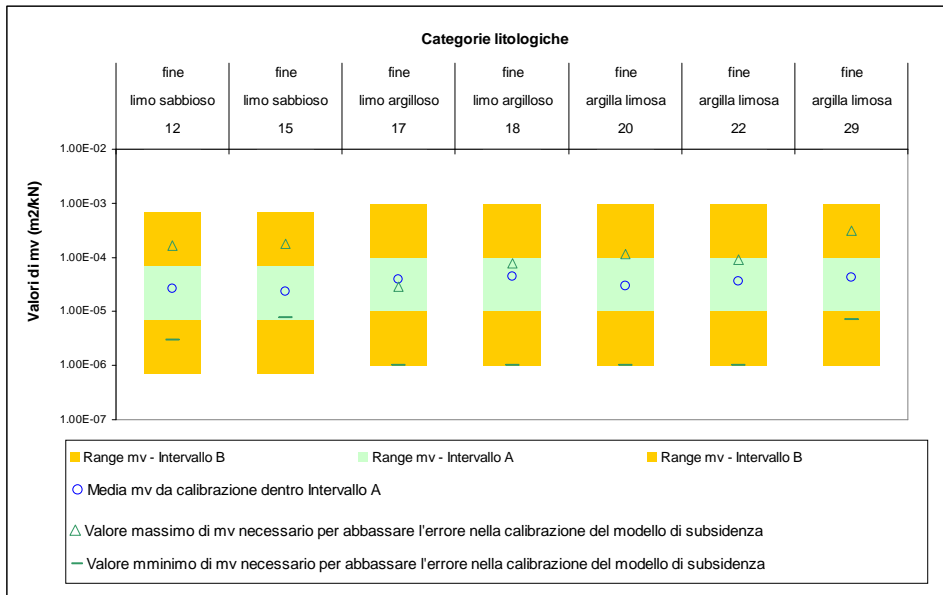


Figura 4.42: valori medi di m_v utilizzati per recuperare le sovrastime e le sottostime B (zona a sud di Lido Savio)



4.2.3.4 *Zone a nord di Lido di Savio*

L'areale del modello di subsidenza posto a nord di Lido di Savio è caratterizzato invece dalla compresenza di estrazione di gas e di acqua come possibili concause del fenomeno della subsidenza ed è stato ulteriormente suddiviso in due sottozone principali dove l'analisi precedentemente condotta viene qui proposta:

- zona a nord di Lido di Savio ed a sud di Casalborsetti: figure da Figura 4.43 a Figura 4.46.
- zona a nord di Casalborsetti: figure da Figura 4.47 a Figura 4.50.

Figura 4.43: subsidenza osservata e calcolata con la calibrazione dell'Intervallo A (zona a nord di Lido di Savio ed a sud di Casalborsetti)

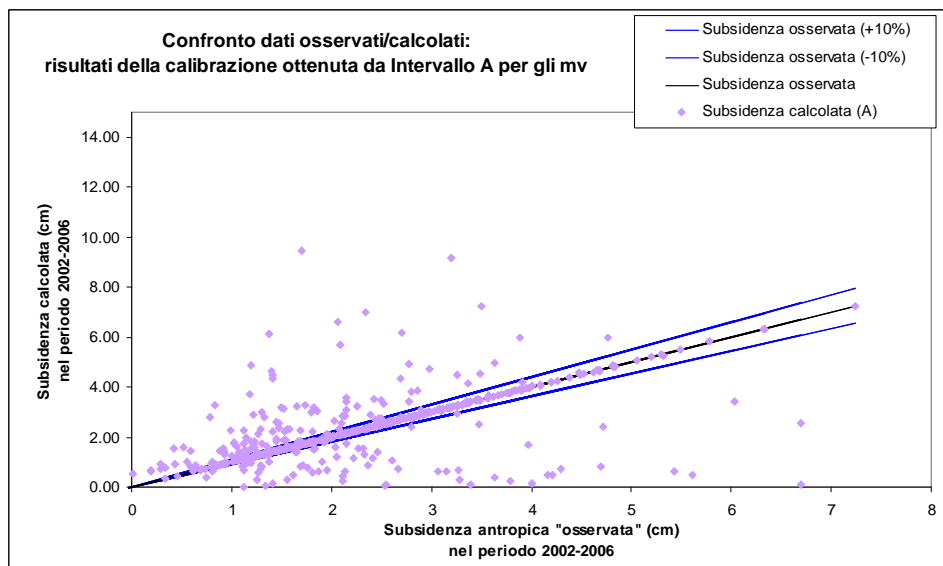


Figura 4.44: subsidenza osservata e calcolata con la calibrazione dell'Intervallo B (zona a nord di Lido di Savio ed a sud di Casalborsetti)

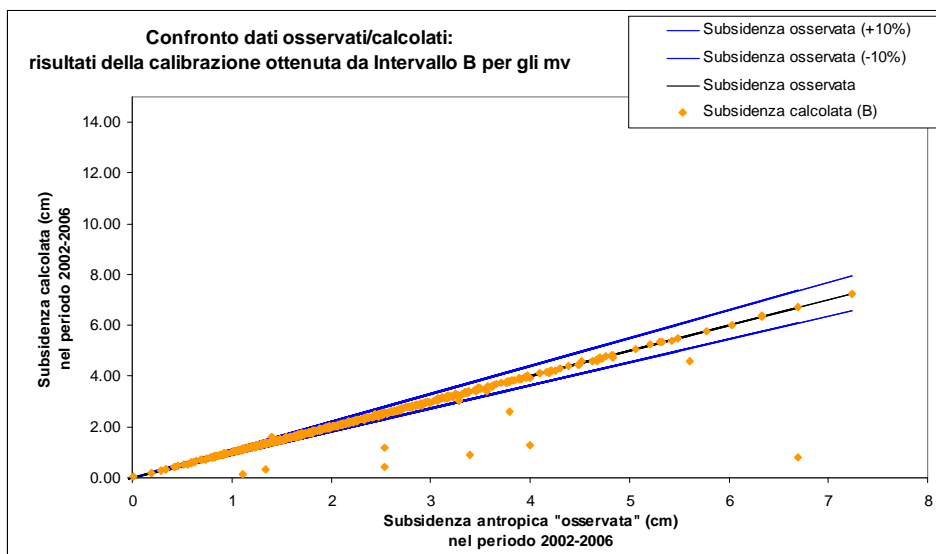


Tabella 4.6: scarti calcolati con A e B (zona a nord di Lido di Savio ed a sud di Casalborsetti) per le colonne con errore maggiore del 10%

Colonne con scarto maggiore del 10 %	Media osservata in cm	Media calcolata in cm (A)	Media calcolata in cm (B)	Media calcolata in cm (B-A)	Note
58	2.46	1.05	2.45	1.40	La calibrazione con l' Intervallo A sottostima; la calibrazione con l'Intervallo B recupera completamente la sottostima
114	1.59	2.76	1.59	-1.17	La calibrazione con l' Intervallo A sovrastima; la calibrazione con l'Intervallo B recupera completamente la sovrastima
9	3.45	0.14	1.36	1.22	La calibrazione con l' Intervallo A sottostima; la calibrazione con l' Intervallo B non riesce a recuperare l'errore
5	0.08	3.85	0.54	-3.32	La calibrazione con l' Intervallo A sovrastima; la calibrazione con l'Intervallo B non riesce a recuperare l'errore
186	1.91	2.13	1.82	-0.31	Totali

Figura 4.45: valori medi di m_v ottenuti dalle due calibrazioni A e B in funzione delle classi litologiche (zona a nord di Lido di Savio ed a sud di Casalborsetti).

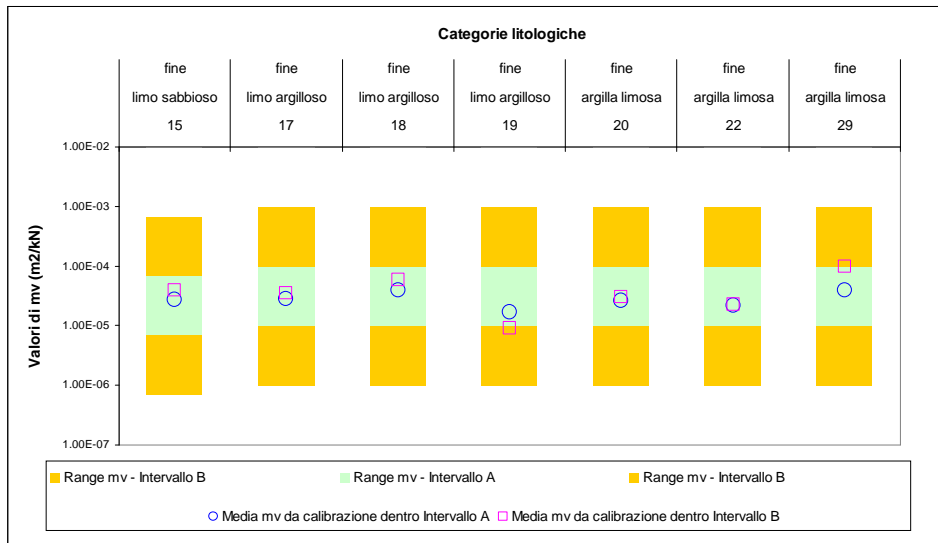


Figura 4.46: valori medi di m_v utilizzati per recuperare le sovrastime e le sottostime (zona a nord di Lido di Savio ed a sud di Casalborsetti)

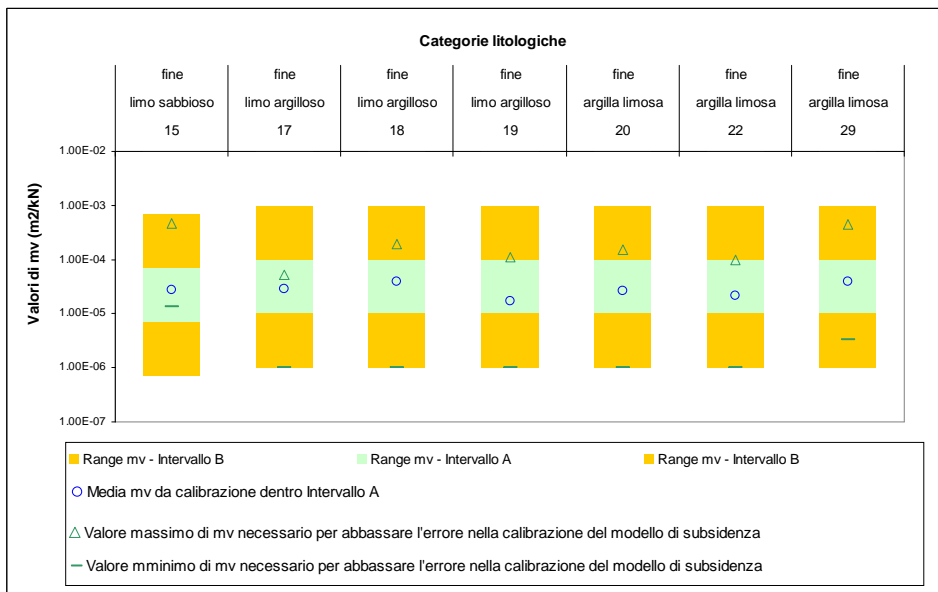


Figura 4.47: subsidenza osservata e calcolata con la calibrazione dell'Intervallo A (zona a nord di Casalborsetti)

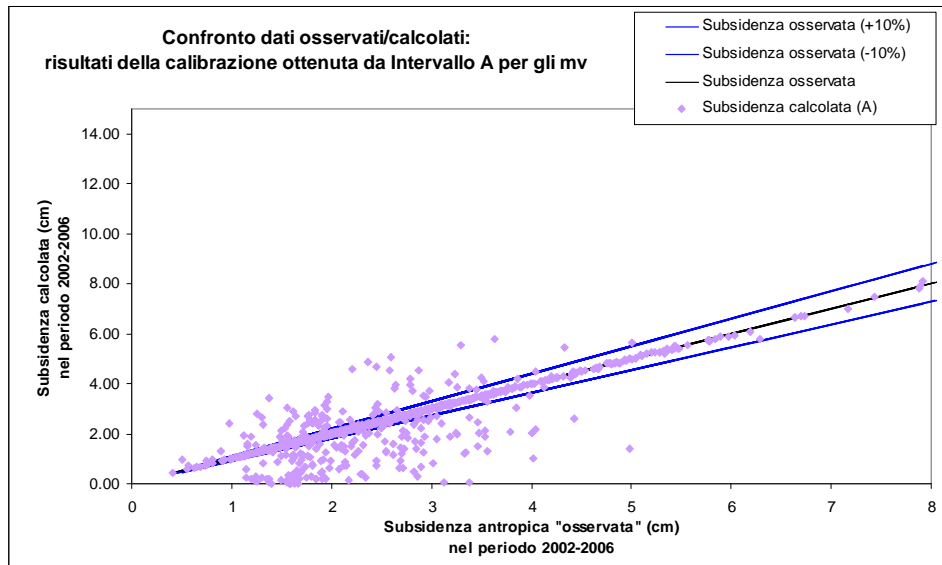


Figura 4.48: subsidenza osservata e calcolata con la calibrazione dell'Intervallo B (zona a nord di Casalborsetti)

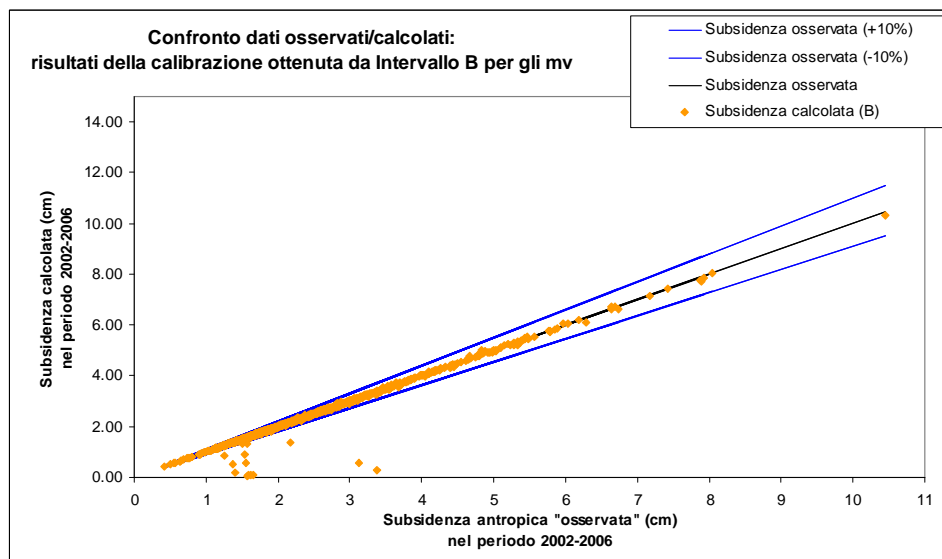


Tabella 4.7: scarti calcolati con A e B (zona a nord di Casalborsetti) per le colonne con errore maggiore del 10%

Colonne con scarto maggiore del 10 %	Media osservata in cm	Media calcolata in cm (A)	Media calcolata in cm (B)	Media calcolata in cm (B-A)	Note
135	2.36	1.24	2.35	1.11	La calibrazione con l' Intervallo A sottostima; la calibrazione con l'Intervallo B recupera completamente la sottostima
89	2.09	2.93	2.09	-0.84	La calibrazione con l' Intervallo A sovrastima; la calibrazione con l'Intervallo B recupera completamente la sovrastima
14	1.81	0.06	0.58	0.53	La calibrazione con l' Intervallo A sottostima; la calibrazione con l' Intervallo B non riesce a recuperare l'errore
238	2.22	1.80	2.15	0.35	Totali

Figura 4.49: valori medi di m_v ottenuti dalle due calibrazioni A e B in funzione delle classi litologiche (zona a nord di Casalborsetti)

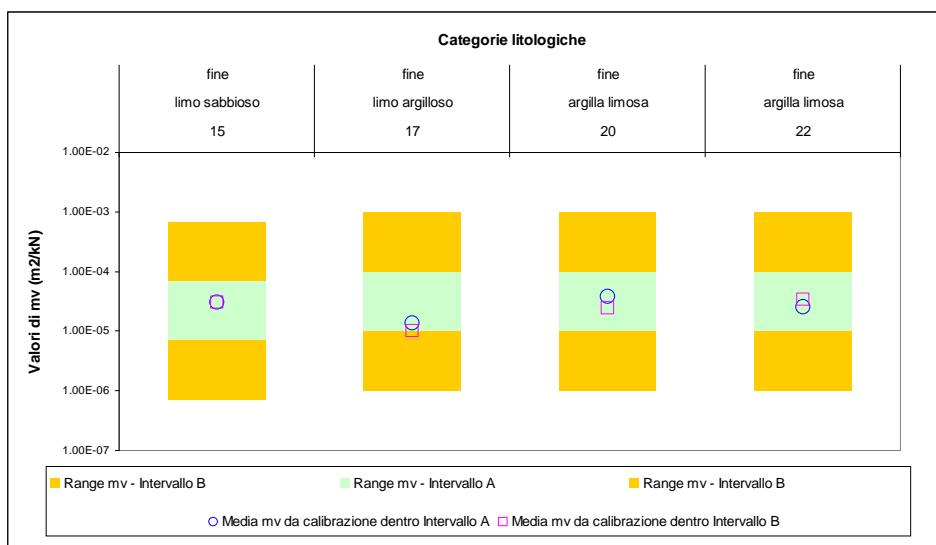
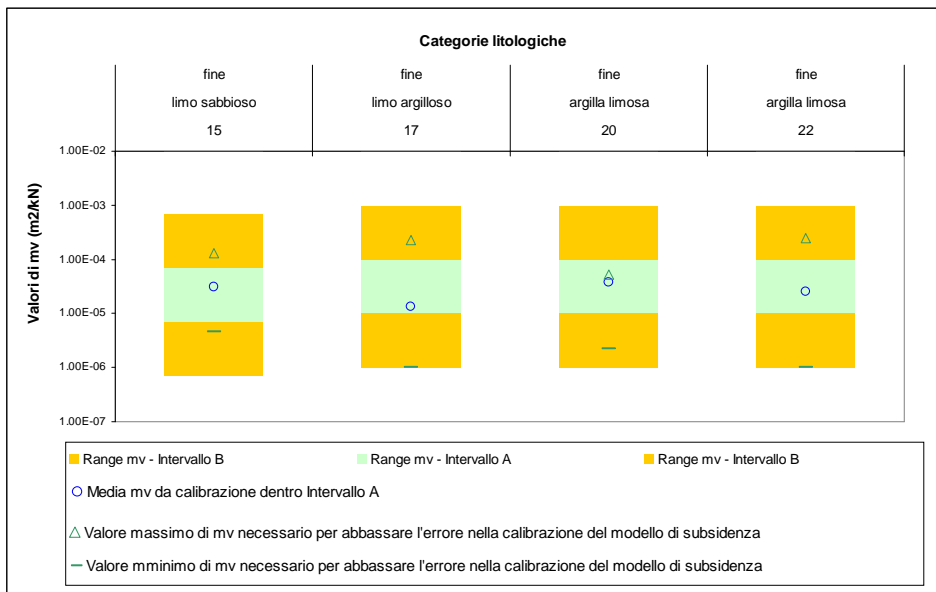


Figura 4.50: valori medi di m_v utilizzati per recuperare le sovrastime e le sottostime (zona a nord di Casalborsetti)



In questo caso gli elementi appena riportati e che hanno permesso di effettuare le considerazioni del caso precedente e relativo alla zona a sud di Lido di Savio, non possono essere analizzati allo stesso modo, proprio in ragione della possibile concomitanza di prelievo di gas ed acqua quali possibili cause di subsidenza. Per la comprensione di una situazione di tale complessità, occorre quindi introdurre ulteriori elementi che in maniera diretta o indiretta permettano di individuare:

- le zone del modello dove è attiva una compresenza di concause al fenomeno della subsidenza (acqua e gas);
- le rispettive quote parti di subsidenza indotta (il modello qui presentato simula solo la compattazione dovuta all'estrazione dell'acqua).

Infatti, in assenza di elementi specifici e diretti per distinguere il contributo del gas da quello dell'acqua, si è fatto un tentativo di tipo indiretto col fine di raggiungere lo stesso obiettivo. Risulta infatti evidente che le situazioni evidenziate come "sottostime", non sono in questo caso dovute ad un possibile errore di calibrazione, ma piuttosto, o almeno in parte, al fatto che in questa zona anche il gas agisce come possibile causa dell'abbassamento del suolo. Si riportano di seguito due esempi specifici che derivano dalla bibliografia disponibile.

4.2.3.4.1 Analisi di casi specifici. Caso 1: zona costiera prospiciente la piattaforma Angela-Angelina

Il campo Angela-Angelina può essere utilizzato come esempio in quanto produce orientativamente, almeno un terzo dei suoi effetti di subsidenza fino a 2 km dalla linea di riva esaurendosi poi a 4-5 km dalla stessa, al limitare del suo campo di influenza (Figura 4.51). Inoltre il giacimento ha prodotto in modo abbastanza significativo nel periodo qui considerato (2002-2006), con una media annua di circa 1.000.000.000 Sm³.

Queste e altre informazioni sono state ricavate da [17] (Gambolati G. (1998), *CENAS: Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*. Kluwer), in cui sono presentate alcune simulazioni realizzate all'epoca proprio per stimare l'effetto dell'estrazione del gas (Figura 4.51 e Figura 4.52).

Da [17] viene considerato sia il campo di influenza degli effetti del giacimento che si spingono nell'entroterra fino a circa 4-5 km dalla linea di riva e l'entità della subsidenza indotta da estrazione di gas valutabile tra i 4.5 mm/anno sulla linea di costa e 1.25 mm/anno ai limiti del sopra citato campo di

influenza. Tenendo inoltre in considerazione che nel periodo di riferimento 2002-2006 (considerato nelle simulazioni con EMIRO-COSTA) vi è stata una produzione maggiore rispetto alla media che ha prodotto la Figura 4.52 (pari a $700.000.000 \text{ Sm}^3$), si ritiene essere una stima adeguata per il contributo della subsidenza da estrazione gas per il periodo 2002-2006 un valore pari a 4 mm/anno.

Relativamente invece all'estrazione dell'acqua, in [10] (Alma Mater Studiorum, DICMA (2008), *Analisi di dettaglio dei dati rilevati dai due assestimetri di Castelmaggiore*. A cura di Ezio Mesini. Rapporto tecnico con allegati.) sono riportati gli andamenti di alcune installazioni assestimetriche che permettono di stimare in circa 2.7 mm/anno (relativamente al periodo 1994-2002) lo schiacciamento dei primi 370 m di terreno in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti. Inoltre seguendo la falsariga degli elaborati precedenti, sono stati estratti da EMIRO-COSTA i risultati ottenuti per la sola porzione di territorio che ricade entro il raggio di influenza di Angela-Angelina (Figura 4.53) e sono state nuovamente verificati i risultati della procedura di calibrazione, trovando che in questo caso sarebbe necessario forzare la calibrazione al limite superiore degli intervalli adottati per gli m_v per poter spiegare tutta la subsidenza in termini d'acqua.

Figura 4.51: raggio di influenza di Angela-Angelina e relativi effetti secondo Gambolati ([17]) relativamente ai periodi 1972-1995 (a sinistra) e 1972-2014 (a destra).

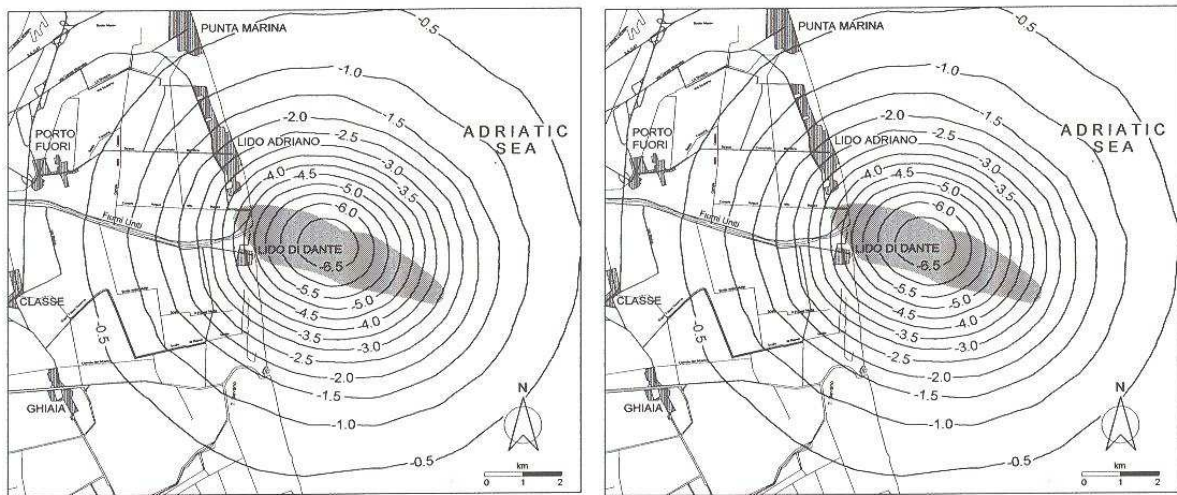


Figura 4.52: subsidenza indotta da Angela-Angelina secondo Gambolati ([17])

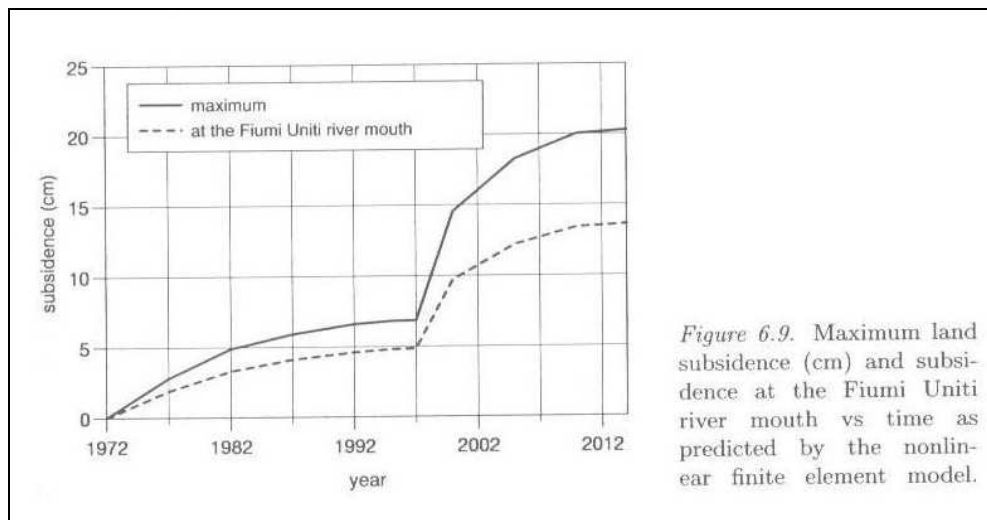
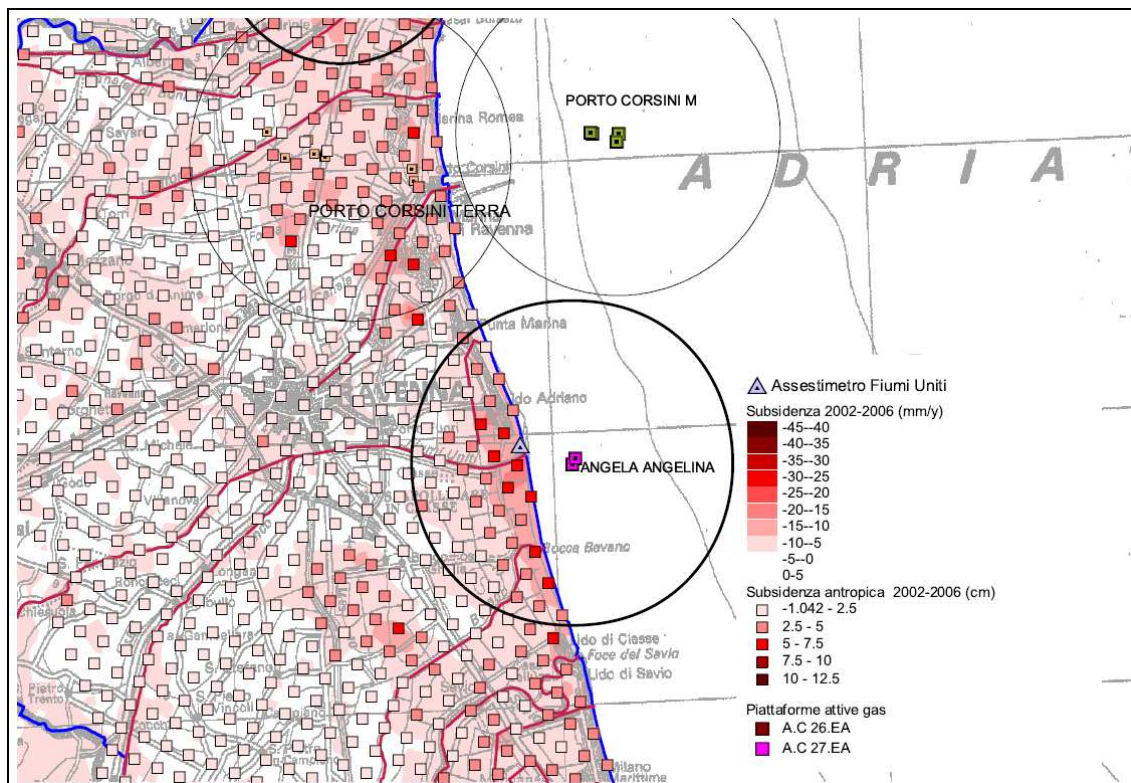


Figura 4.53: raggio di influenza di Angela-Angelina (6.5 km) secondo Gambolati ([17])



La sintesi delle possibili valutazioni è riportata nella Tabella 4.8, in cui il valore medio di subsidenza antropica (dedotto per sottrazione del termine di subsidenza naturale dal totale osservato) è posto a confronto sia con il possibile valore di subsidenza da gas (dedotta da [17] e assunto pari a 4 mm/anno) sia con quello attribuibile all'acqua (dedotto da [10] e pari a 2.7 mm/anno) ed infine con i valori ottenuti dal modello come subsidenza da acqua ed in funzione degli scenari elaborati con i 2 diversi intervalli di compressibilità già citati più volte.

Tabella 4.8: stima della subsidenza nell'area di influenza del giacimento Angela-Angelina posta all'interno della linea di costa.

Subsidenza media della zona	cm in 5 anni	mm/anno
a. Totale (Figura 3.22)	4.0	8.1
b. Naturale (Figura 3.25)	0.7	1.5
c. Antropica (a-b) Figura 3.27	3.3	6.6
d. Stima da gas da [17]	2.0	4.0
e. da acqua [10]	---	2.7
f. Subsidenza calcolata minimo intervallo A	0.6	1.2
g. Subsidenza calcolata A	1.9	3.8
h. Subsidenza calcolata B	3.1	6.3

Sulla base di queste ipotesi, le osservazioni che se ne deducono, per la sola zona in esame, sono quindi le seguenti:

1. i dati assesimetrici ai Fiumi Uniti (assimilabili alla subsidenza da acqua) e la stima del contributo da gas portano ad una valutazione complessiva di subsidenza (acqua e gas) praticamente coincidente con la stima della subsidenza dovuta a cause di tipo antropico (d+e=c in Tabella 4.8);

2. nel caso in esame la subsidenza dovuta ad estrazione di acqua rappresenta il 40% della subsidenza di tipo antropico ed il 33% della subsidenza totale;
3. la calibrazione ottenuta con l'intervallo A è ampiamente sufficiente a giustificare la quotaparte di subsidenza antropica dovuta all'estrazione di acqua sotterranea (3.8 mm/anno in confronto a 2.7 mm/anno);
4. quelle che appaiono come sottostime in Figura 4.54 rappresentano in realtà il contributo della subsidenza dovuto all'estrazione di gas o parte di esso in alcuni casi;
5. i valori medi degli m_v di Figura 4.55 e relativi all'intervallo A per questa zona appaiono sovrastimati, dato che mediamente concorrono a riprodurre un 40% in più della compattazione dovuta alla sola estrazione di acqua;
6. le considerazioni riportate ai precedenti punti 2-4 potrebbero essere fortemente condizionate dai risultati del modello di flusso e dalla sua bontà di calibrazione (paragrafo 4.1.2.3), che per questa particolare zona si può ritenere di qualità adeguata.

Figura 4.54: subsidenza osservata e calcolata con la calibrazione dell'Intervallo A all'interno dell'area di influenza di Angela-Angelina

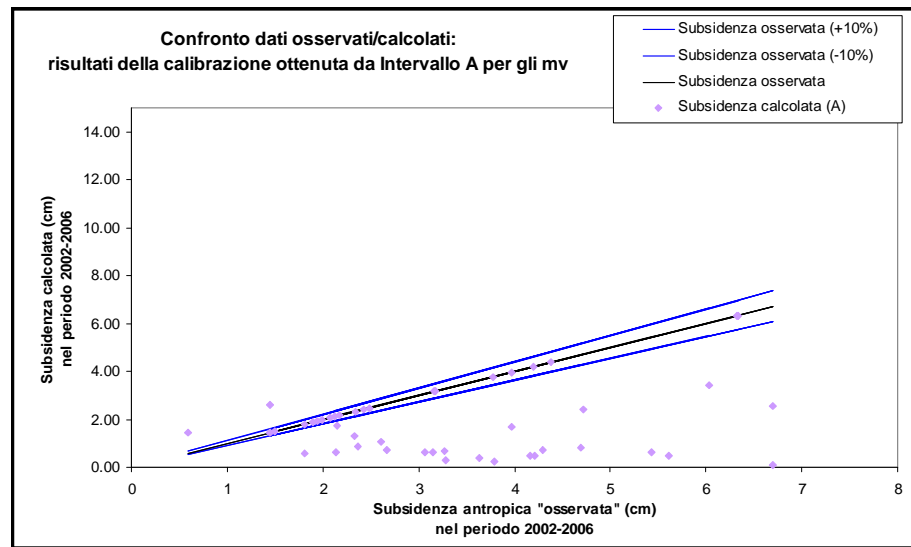
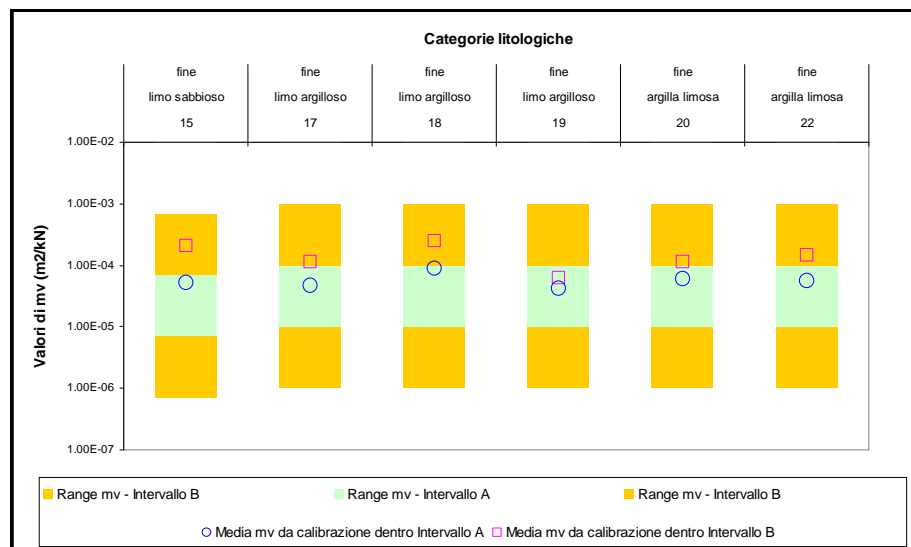


Figura 4.55: valori medi di m_v ottenuti dalle due calibrazioni A e B in funzione delle classi litologiche



In conclusione, per questo areale si ritiene opportuno ricalibrare verso il basso gli m_v nella misura precedentemente indicata, in modo tale da tenere in considerazione anche l'effetto dell'estrazione di gas concomitante all'estrazione di acqua.

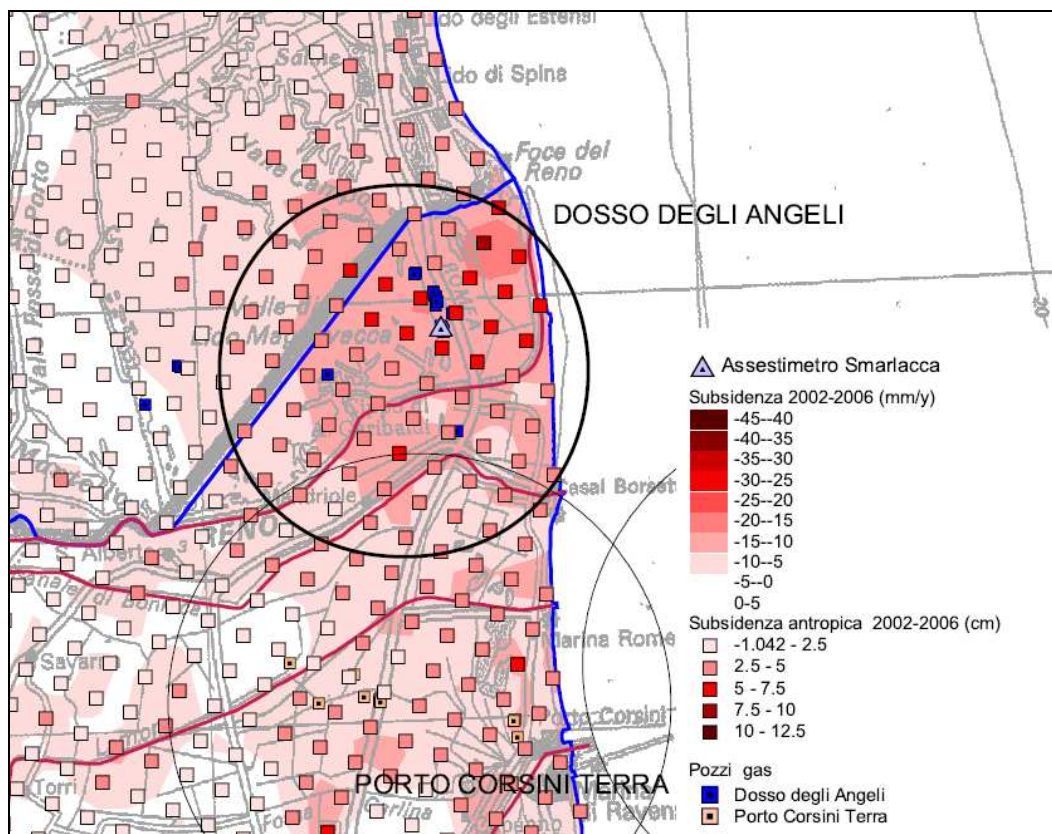
4.2.3.4.2 Analisi di casi specifici. Caso2: zona costiera tra Casalborsetti e Foce Reno

La zona in esame riguarda il tratto costiero compreso tra Casalborsetti e Foce Reno dove, a partire dagli anni '70 e fino al 2004, il giacimento Dosso degli Angeli ha prodotto circa 30 miliardi di Sm^3 di gas naturale. Fino al 1990 la produzione media annuale è stata superiore al miliardo di Sm^3 , mentre negli anni si è successivamente ridotta sino ad esaurirsi nel 2004. Nel periodo di riferimento qui utilizzato (2002-2006) la produzione media è stata di 134 milioni di Sm^3 relativa al triennio 2002-2004. Proprio in ragione della graduale diminuzione del livello di produzione del giacimento è stato considerato per questo un raggio di influenza più piccolo rispetto al caso precedente così come riportato nella Figura 4.56.

L'analisi è proseguita poi come nel caso precedente e la Tabella 4.9 riporta i valori di subsidenza assunti come riferimento per l'analisi. Utilizzando ancora il grafico di Figura 4.52 per stimare la subsidenza da gas, prendendo in questo caso il tratto di curva più piatto (1992-1997), in relazione agli ormai bassi volumi di gas estratti, la tabella evidenzia un valore inferiore ad 1 mm/anno.

Relativamente invece all'estrazione dell'acqua, in [10] (Alma Mater Studiorum, DICMA (2008), *Analisi di dettaglio dei dati rilevati dai due assestimetri di Castelmaggiore*. A cura di Ezio Mesini. Rapporto tecnico con allegati.) sono riportati gli andamenti di alcuni assestimetri che permettono di stimare in circa 1.1 mm/anno (relativamente al periodo 1998-2002) lo schiacciamento dei primi 330 m di terreno in corrispondenza delle porzioni maggiormente subsidenti nell'area in esame (assestimetro Smarlacca).

Figura 4.56: raggio di influenza ipotizzato (5 km) per il giacimento di Dosso degli Angeli



Infine seguendo la falsariga degli elaborati precedenti, sono stati estratti da EMIRO-COSTA i risultati ottenuti per la sola porzione di territorio che ricade entro il raggio di influenza di Angela-Angelina (Figura 4.53) ed in funzione degli scenari elaborati con i 2 diversi intervalli di compressibilità già citati più volte.

Tabella 4.9: stima della subsidenza nell'area del giacimento Dosso degli Angeli

Subsidenza media della zona	cm in 5 anni	mm/anno
a. Totale (Figura 3.22	5.5	10.9
b. Naturale Figura 3.25	1.0	1.9
c. Antropica (a-b) Figura 3.27	4.5	9.0
d. Stima da gas (Estrapolato da [17])	0.4	0.8
e. Da acqua [10]	---	1.1
f. Subsidenza calcolata minimo intervallo A	1.4	2.8
g. Subsidenza calcolata A	4.5	8.9
h. Subsidenza calcolata B	4.5	9.0

Il quadro che emerge nel presente caso di studio ha però disatteso la coerenza generale dell'insieme dei dati ed informazioni così formulate e che avevano invece nel caso di studio precedente permesso di ripartire il dato di subsidenza complessiva in funzione delle due concause generatrici. In attesa di ulteriori possibili approfondimenti del caso vengono qui evidenziati i seguenti elementi:

1. la stima della subsidenza antropica generata da estrazione di gas (punto d. della Tabella 4.9 potrebbe essere sottostimata in ragione sia delle diverse caratteristiche geologiche del giacimento sia della diversa storia produttiva del campo pozzi di estrazione gas in esame (Dosso degli Angeli) rispetto a quello di Figura 4.52 derivato da [17] (Angela-Angelina);
2. il modello di flusso nel dettaglio della zona in esame è controllato da 4 pozzi caratterizzati da una buona corrispondenza tra dati osservati e dati calcolati; gli andamenti dei carichi idraulici utilizzati per il calcolo della compattazione dei sedimenti sono quindi coerenti con le osservazioni piezometriche;
3. gli andamenti di cui al punto precedente, sulla base della configurazione di minima dei coefficienti che controlla il modello di subsidenza (m_v) porterebbero ad una stima di subsidenza comunque superiore a quanto misurato dall'assestmetro;
4. il confronto del dato dell'assestmetro (1.1 mm/anno) con la subsidenza media della zona in esame (10.9 mm/anno) e di quella della zona subito al di fuori dell'area di influenza del giacimento di gas (7.4 mm/anno) indurrebbe ad una possibile sottostima della valutazione del contributo naturale al fenomeno della subsidenza in Tabella 4.9.

4.2.3.5 *Assetto delle compressibilità al termine della calibrazione effettuata*

Viene qui rappresentata la distribuzione dei valori delle compressibilità ottenute al termine di questa fase del lavoro di calibrazione eseguita sulla base dell'analisi condotta nei paragrafi precedenti. Nelle figure seguenti viene riportata la distribuzione degli m_v per l'intero modello e singolarmente per le tre macroaree principali individuate per l'analisi. I valori medi vengono anche in questo caso confrontati con i range utilizzati per le prime fasi del processo di calibrazione (da Figura 4.57 a Figura 4.61 e relative tabelle).

Figura 4.57: analisi dei valori di m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) al termine della calibrazione, intero modello

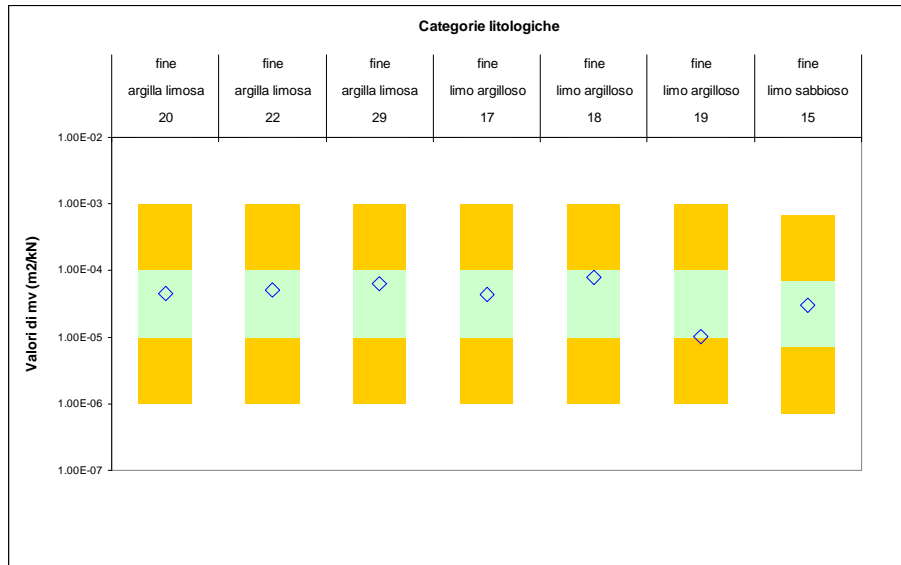


Tabella 4.10: distribuzione dei valori di m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) delle granulometrie fini per l'intero modello

Litologia semplificata	Litologia	Media m_v	Minimo m_v	Massimo m_v	StdDev m_v
argilla limosa	20	4.E-05	1.E-06	1.E-03	2.E-04
argilla limosa	22	5.E-05	1.E-06	1.E-03	2.E-04
argilla limosa	29	6.E-05	1.E-06	1.E-03	2.E-04
limo argilloso	17	4.E-05	1.E-06	1.E-03	2.E-04
limo argilloso	18	8.E-05	1.E-06	1.E-03	2.E-04
limo argilloso	19	1.E-05	1.E-06	1.E-04	1.E-05
limo sabbioso	15	3.E-05	7.E-07	7.E-04	5.E-05

Figura 4.58 Frequenza di distribuzione degli m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) a fine taratura, dato complessivo per l'intero modello

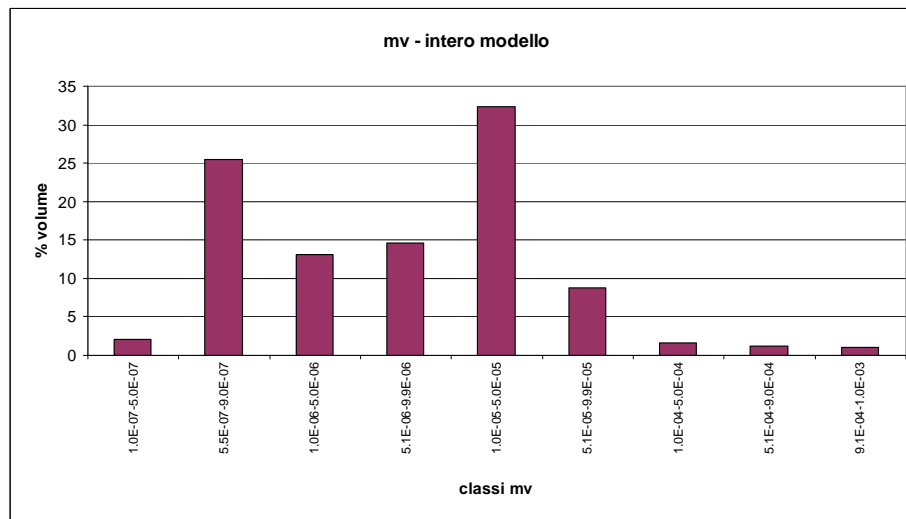


Figura 4.59: analisi dei valori di m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) al termine della calibrazione, zona a sud di lido di Savio

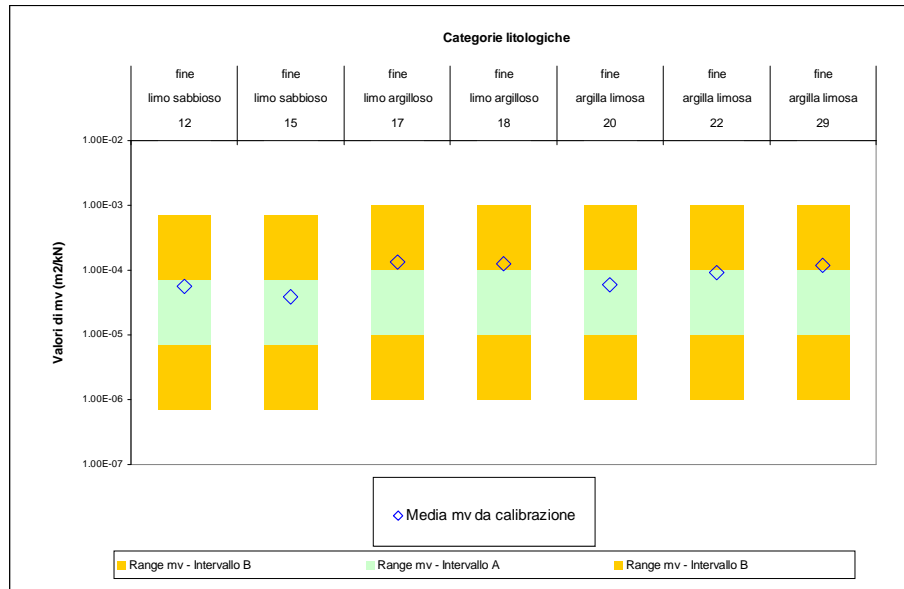


Tabella 4.11: distribuzione dei valori di m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) delle granulometrie fini, zona a sud di Lido di Savio

Litologia semplificata	Litologia	Media m_v	Minimo m_v	Massimo m_v	StdDev m_v
limo sabbioso	12	5.6E-05	7.0E-07	7.0E-04	1.6E-04
limo sabbioso	15	3.9E-05	7.0E-07	7.0E-04	1.2E-04
limo argilloso	17	1.3E-04	1.0E-06	9.9E-04	3.2E-04
limo argilloso	18	1.3E-04	1.0E-06	1.0E-03	3.1E-04
argilla limosa	20	6.0E-05	1.0E-06	1.0E-03	2.0E-04
argilla limosa	22	9.2E-05	1.0E-06	1.0E-03	2.7E-04
argilla limosa	29	1.2E-04	1.0E-06	1.0E-03	2.9E-04

Figura 4.60: analisi dei valori di m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) al termine della calibrazione, zona a nord di lido di Savio ed a sud di Casalborsetti

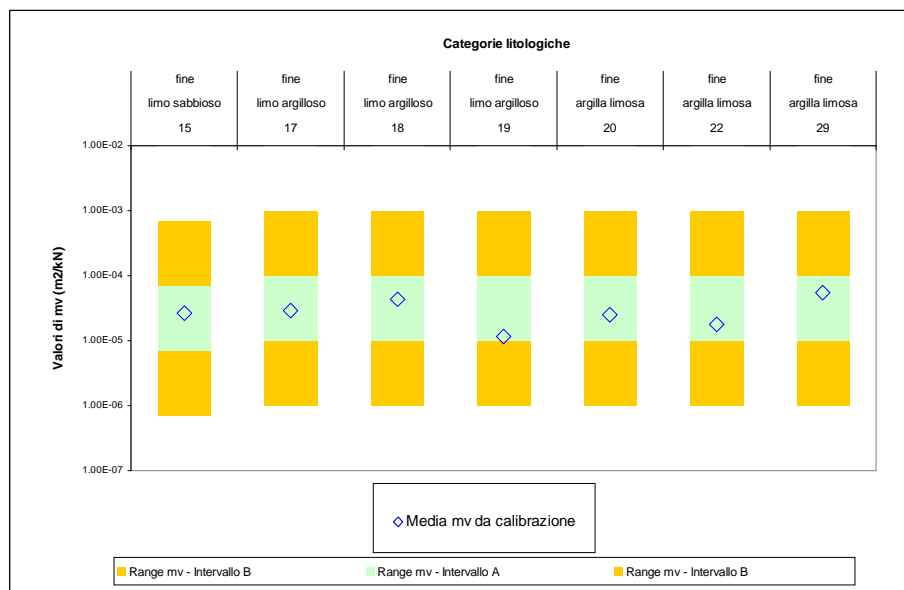


Tabella 4.12: distribuzione dei valori di m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) delle granulometrie fini, zona a nord di lido di Savio ed a sud di Casalborsetti

Lito Semplificata	Litologia	Media m_v	Minimo m_v	Massimo m_v	StdDev m_v
limo sabbioso	15	2.7E-05	7.0E-07	7.0E-04	6.2E-05
limo argilloso	17	2.9E-05	1.0E-06	9.9E-04	1.2E-04
limo argilloso	18	4.3E-05	1.0E-06	1.0E-03	1.4E-04
limo argilloso	19	1.2E-05	1.0E-06	8.6E-05	1.3E-05
argilla limosa	20	2.5E-05	1.0E-06	1.0E-03	8.6E-05
argilla limosa	22	1.8E-05	1.0E-06	1.0E-03	6.6E-05
argilla limosa	29	5.4E-05	1.0E-06	1.0E-03	1.6E-04

Figura 4.61: analisi dei valori di m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) al termine della calibrazione, zona a nord di Casalborsetti

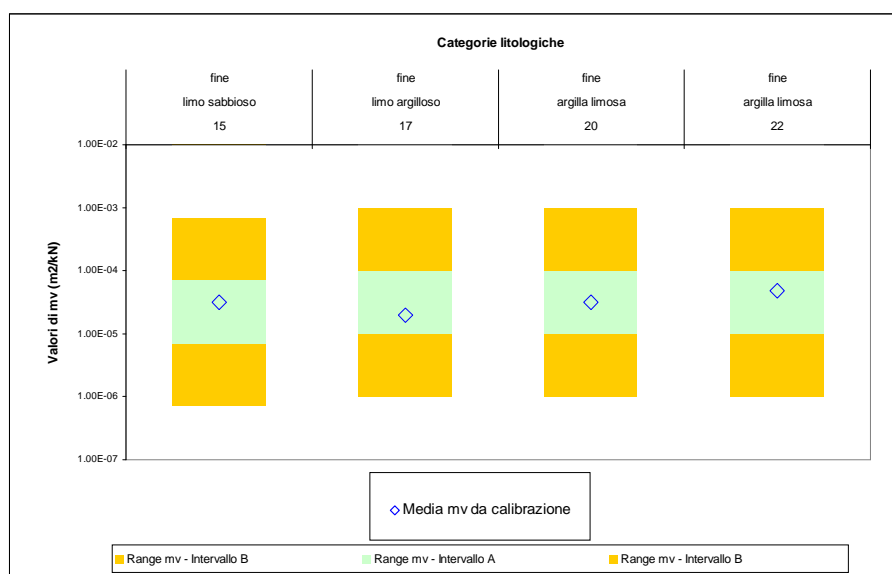


Tabella 4.13: distribuzione dei valori di m_v ($m^2 \cdot kN^{-1}$) delle granulometrie fini, zona a nord di Casalborsetti

Litologia Semplificata	Litologia	Media m_v	Minimo m_v	Massimo m_v	StdDev m_v
limo sabbioso	15	3.1E-05	7.0E-07	7.0E-04	3.4E-05
limo argilloso	17	2.0E-05	1.0E-06	9.9E-04	8.8E-05
argilla limosa	20	3.1E-05	1.0E-06	4.2E-04	3.7E-05
argilla limosa	22	4.7E-05	1.0E-06	1.0E-03	1.6E-04

Nella successiva Figura 4.63 l'analisi dei valori di m_v ottenuti a fine calibrazione viene condotta in funzione delle percentuali di volume di serbatoio associate alle principali categorie litologiche.

Nelle successive figure (da Figura 4.64 a Figura 4.68) viene invece proposta, in analogia alla consueta analisi relativa alla parametrizzazione del modello di flusso, la distribuzione degli m_v relativa invece alla calibrazione del modello di subsidenza. Le sezioni sono quelle riportate in traccia nella Figura 4.62

Figura 4.62: tracce delle sezioni per la rappresentazione della distribuzione della compressibilità

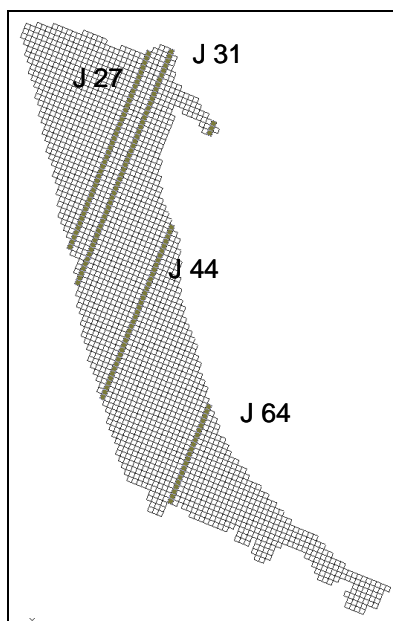


Figura 4.63: Frequenza di distribuzione degli m_v ($\text{m}^2 \cdot \text{kN}^{-1}$) a fine taratura, dato suddiviso per le principali classi litologiche.

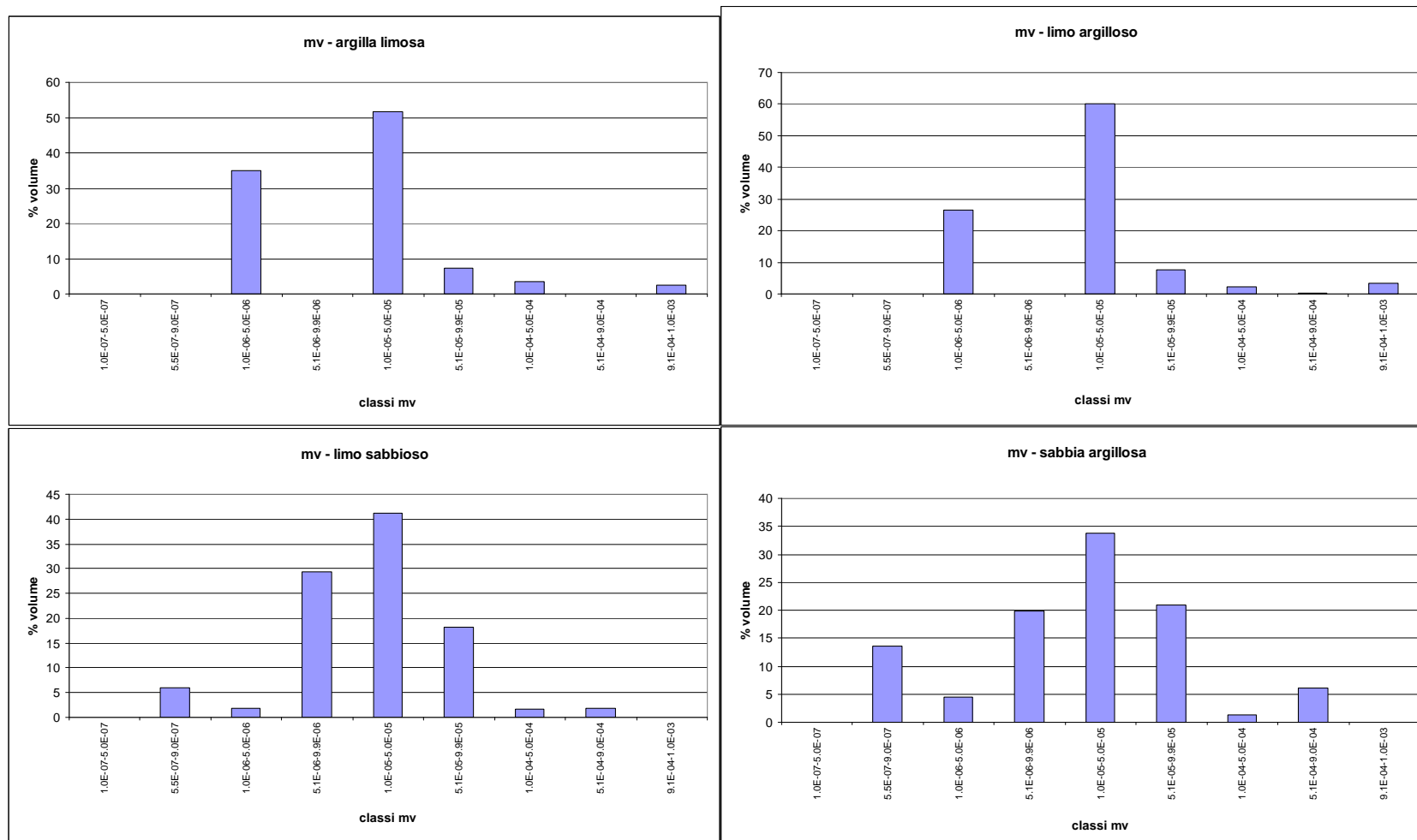


Figura 4.63, segue

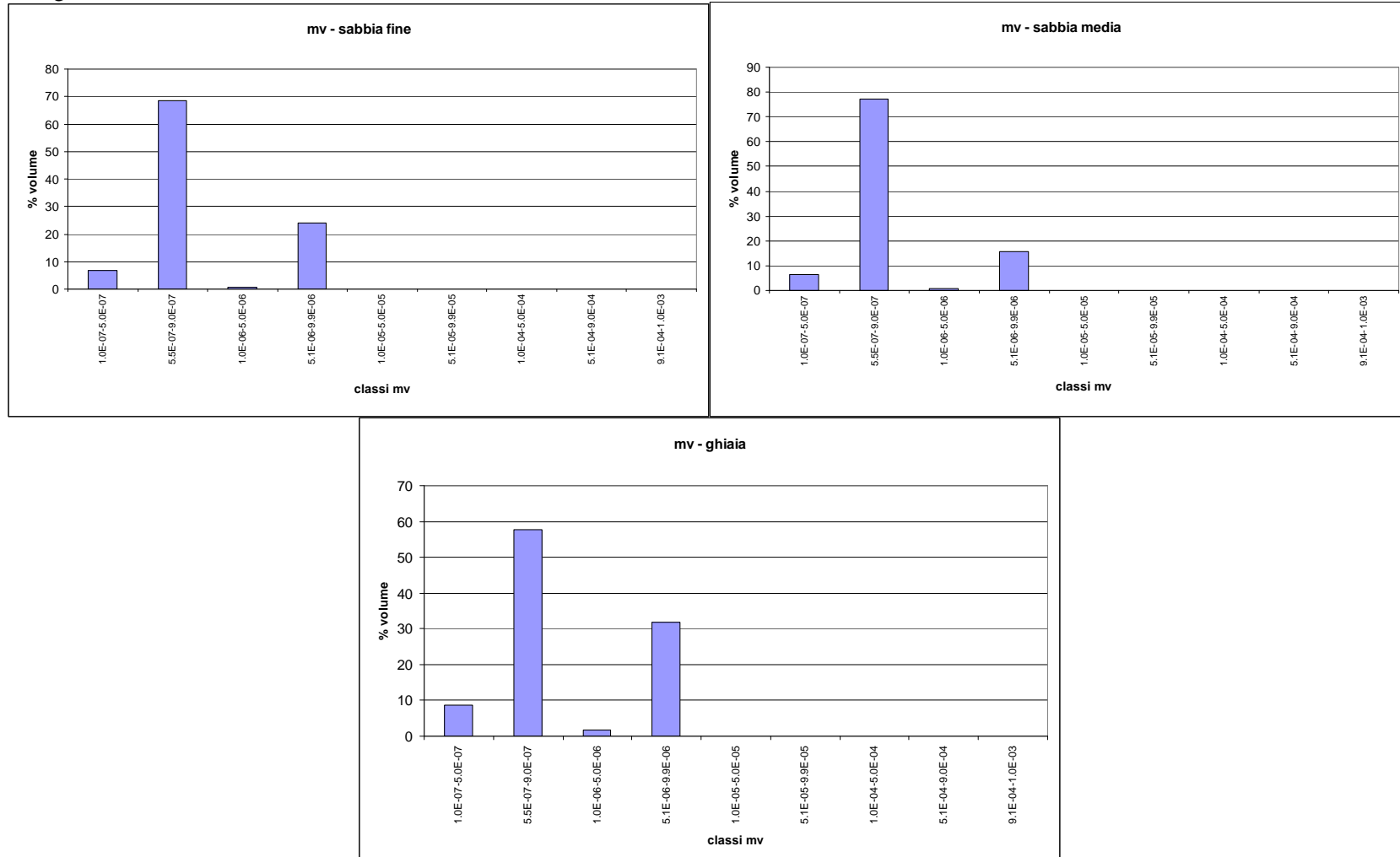


Figura 4.64: Distribuzione delle compressibilità m_v ($\text{m}^2 \cdot \text{kN}^{-1}$), layer 1, 12, 24

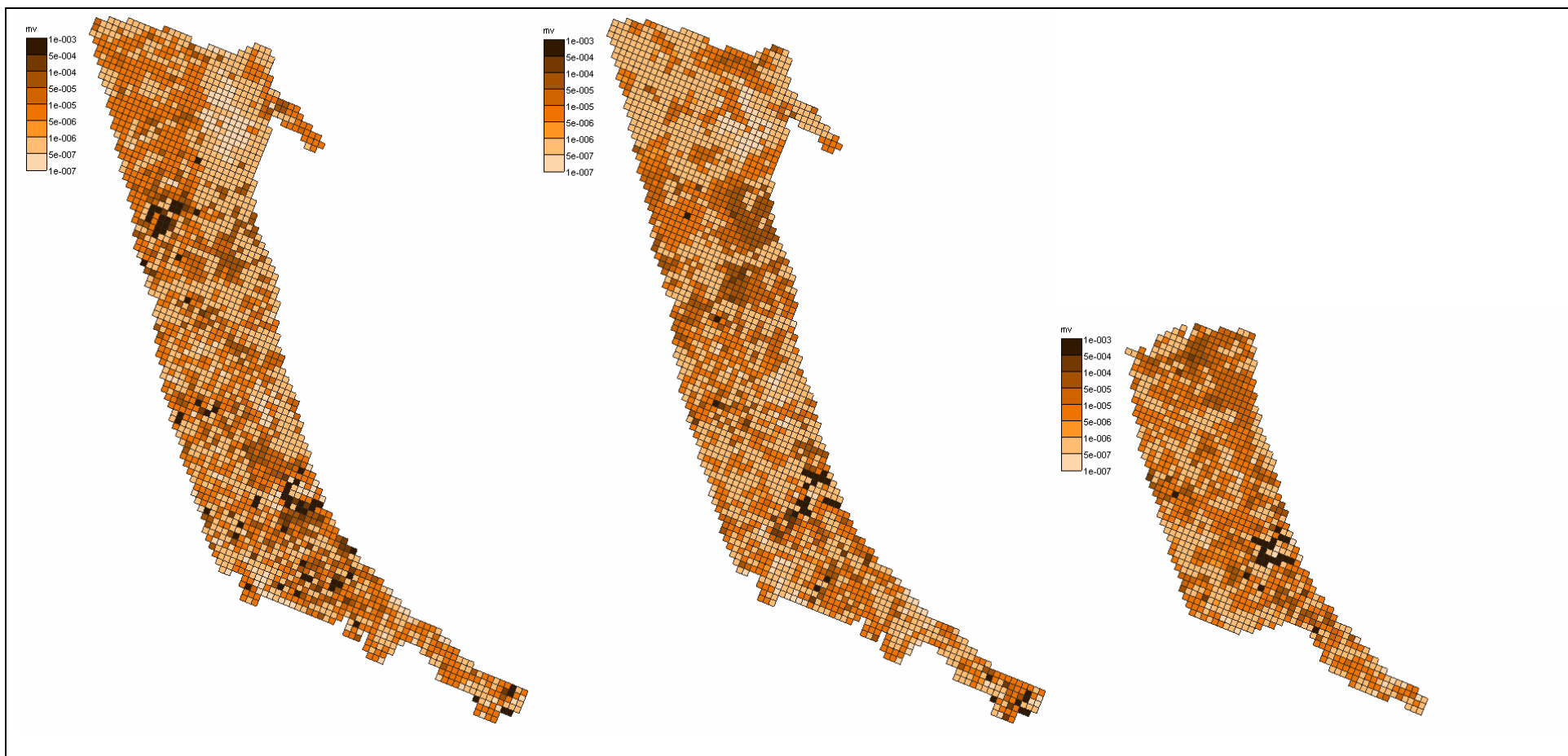


Figura 4.65: Distribuzione delle compressibilità m_v ($\text{m}^2 \cdot \text{kN}^{-1}$), sezione 27

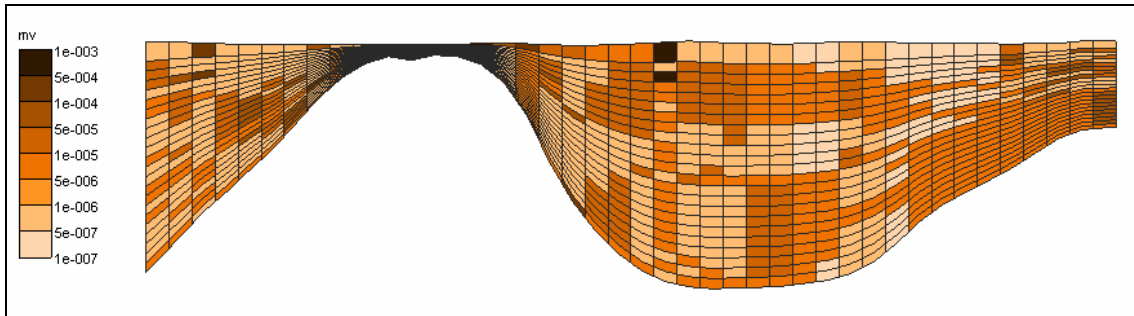


Figura 4.66: Distribuzione delle compressibilità m_v ($\text{m}^2 \cdot \text{kN}^{-1}$), sezione 31

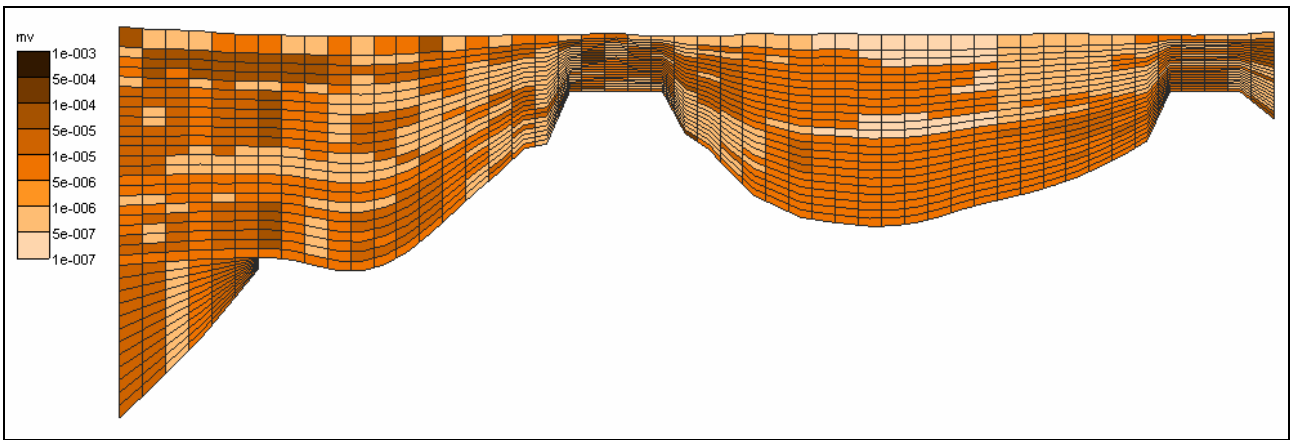


Figura 4.67: Distribuzione delle compressibilità m_v ($\text{m}^2 \cdot \text{kN}^{-1}$), sezione 44

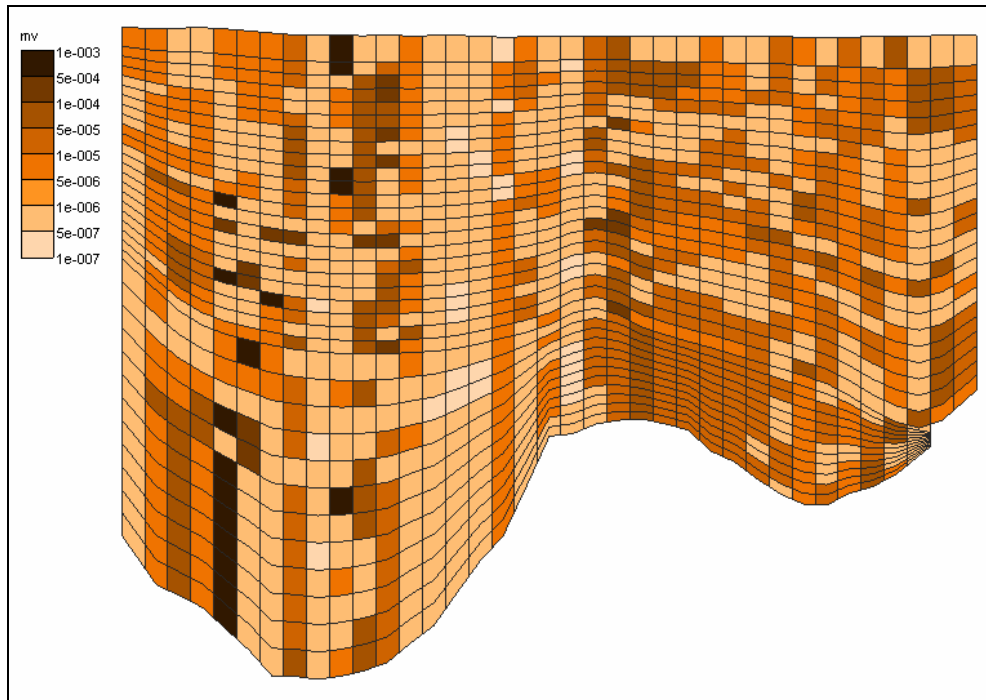
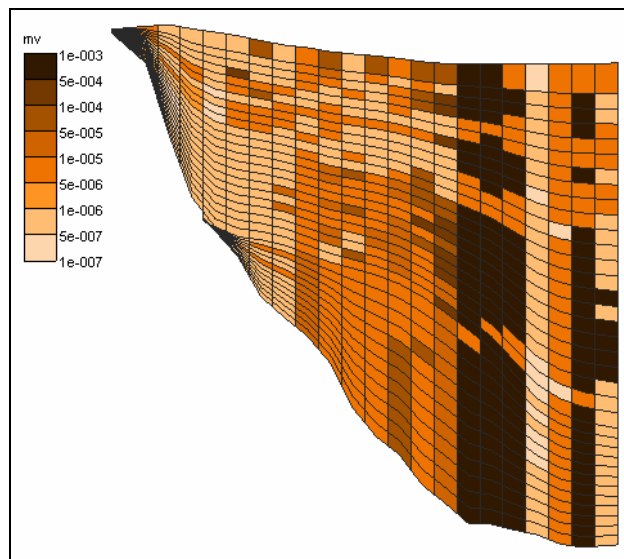


Figura 4.68: Distribuzione delle compressibilità m_v ($\text{m}^2 \cdot \text{kN}^{-1}$, sezione 64



5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003). *Modello matematico di simulazione delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Emiro3D)*, Elaborato di supporto Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna. Rapporto tecnico. Bologna.
- [2] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna e Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della Conoide Alluvionale del Fiume Reno*. Rapporto tecnico.
- [3] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007a). *Elaborazione ed analisi dati raccolti sulle acque superficiali e sotterranee a livello locale per lo sviluppo dei piani di tutela delle acque. Attività B. Modello di flusso e di trasporto dei nitrati nelle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. Rapporto tecnico.
- [4] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007b). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica*. Rapporto tecnico.
- [5] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008a): *Approfondimenti sulla Conoide Alluvionale del Fiume Reno, aggiornamento della modellistica e valutazione delle necessità di adeguamento della stessa in base a specifiche esigenze*. Rapporto tecnico. Bologna. 77 pp.
- [6] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008b). *Analisi preliminare degli effetti dei prelievi di acque sotterranee sulla evoluzione recente del fenomeno della subsidenza in Emilia-Romagna*. Rapporto tecnico.
- [7] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008c). *Studio sulla ricarica artificiale delle falde in Emilia-Romagna*. Rapporto tecnico.
- [8] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2009). *Applicazione della modellistica matematica di simulazione. Fase I: analisi del flusso delle acque sotterranee in relazione a scenari caratterizzati da particolari criticità nel rapporto ricarica-prelievi*. Rapporto tecnico.

- [9] Chahoud A., Gelati L., Patrizi G., Zaccanti G. (2010). *Land Subsidence Modelling of The Reno River Plain (Bologna, Northern Italy)*. Abstracts. of the Eighth Int. Symp. On Land Subsidence, Queretaro-Mexico, October 2010, p 20.
- [10] Alma Mater Studiorum, DICMA (2008), *Analisi di dettaglio dei dati rilevati dai due assestimetri di Castelmaggiore*. A cura di Ezio Mesini. Rapporto tecnico con allegati.
- [11] Verruijt A. (2005). *Soil Dynamics*. Delft University of Technology.
- [12] Verruijt A. (2004). *Soil Mechanics*. Delft University of Technology.
- [13] Verruijt A. (1995). *Computational geomechanics*. Kluwer Academic Publishers.
- [14] Idroser (1978). Progetto di piano per la salvaguardia e l'utilizzo ottimale delle risorse idriche in Emilia-Romagna.
- [15] Darini G. (2007). *Land Subsidence due to groundwater withdrawal: the case of Bologna*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile, XX Ciclo, Università degli studi di Cassino.
- [16] Eni S.p.A – AGIP, ARPA Emilia-Romagna (2003), Studio della Subsidenza Antropica generata dall'estrazione di acqua di falda lungo la costiera emiliano-romagnola.
- [17] Gambolati G. (1998), CENAS: Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence. Kluwer
- [18] Comune di Bologna, Regione Emilia-Romagna, Idroser S.p.A., (1989). *Studio sul fenomeno della subsidenza nel territorio bolognese*.
- [19] Carminati E. E Martinelli G. (2002), *Subsidence rates in the Po plain, Northern Italy: the relative impact of Natural and Anthropogenic causation*, in «Engineering Geology», Vol. 66.
- [20] Carminati E., Martinelli, G. E Severi P. (2003), *Influence of glacial cycles and tectonics on natural subsidence in the Po Plain, Northern Italy: insights from C 14 ages*, in «Geochemistry, Geophysics, Geosystems», Vol. 4, n. 10.
- [21] Carminati E., Doglioni C. E Scrocca D., (2003). *Apennines subduction-related subsidence of Venice (Italy)*, in «Geophysical Research Letters», Vol. 30, n. 13.
- [22] Brighenti, G., 1965a. L'influenza del declino di pressione sulla porosità e sulla permeabilità delle sabbie dei giacimenti gassiferi della valle padana. *Atti e memorie dell'Accademia Nazionale di Scienze, Lettere ed Arti di Modena*, 7, 11 p.
- [23] Brighenti, G., 1965b. Comprimibilità e permeabilità di rocce clastiche. Studio su cella triassiale. *Atti dell'Acc. Scienze Istituto di Bologna, Rend. Ser. XII, Tom. II, anno 253*, Bologna, 14 p.
- [24] Evangelisti, G. and Poggi, B., 1970. Sopra i fenomeni di deformazione dei terreni da variazioni della pressione di strato. *Atti dell'Acc. Scienze Ist. di Bologna, Memorie ser. II, n.6*, Bologna, pp. 1-124.
- [25] Chilingarian, G.V. and Rieke, III H.H., 1976. Compaction of argillaceous sediments. In *'Abnormal Formation Pressure'*, Elsevier, Amsterdam, pp. 49-100.
- [26] Comune di Ravenna, 1987. Commissione per lo studio della subsidenza. Relazione sull'attività della Commissione al 31 Dicembre 1987.
- [27] Elmi, C. et al., 1984. Il territorio di pianura de Comune di Bologna: aspetti geologici e geotecnici. *Giornale di Geologia*, ser. 3, vol. 46/2, Bologna, pp. 127-152.

- [28] Brighenti, G. and Fabbri, S., 1982b. Variazioni di porosità e di permeabilità nelle rocce sciolte sottoposte a compattamento. *Proc. of XVIII-th Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Bologna, pp. 77-88.
- [29] Brighenti, G. and Fabbri, S., 1984. Criteria for evaluating soil compressibility and permeability in areas subjected to subsidence due to hydrocarbon reservoir production. *Proc. Third Int. Symp. on Land Subsidence*, Venice, pp. 641-650.
- [30] Brighenti, G., 1985. Sulla permeabilità delle rocce contenenti minerali argillosi. *Boll. Ass. Min. Subalpina*, no. 1-2, Torino, pp. 49-64.
- [31] IDROSER, 1987. Studio sul fenomeno della subsidenza nel territorio bolognese. Rapporto IDROSER, febbraio 1989. Internal Report.
- [32] Bertoni W., Brighenti G., Gambolati G., Ricceri, G., Vuillemin F.. Land subsidence due to gas production in the on- and off-shore natural gas fields of the Ravenna area, Italy. *Proc. of the Fifth Int. Symp. On Land Subsidence*, The Hague, October 1995, pp 13-20.
- [33] Brighenti, G., Borgia, G.C., Mesini, E., Subsidence Studies in Italy, in *Subsidence due to Fluid Withdrawal*, eds G.V. Chilingarian, E.C. Donaldson & T.F. Yen, Elsevier, 1995, pp. 211-279.
- [34] Brighenti, G., Macini, P., E. Mesini, Subsidence in Northern Italy: compaction measurements of water/gas bearing formations, *Proc. 8th Congress of the International Association of Engineering Geology*, 207-214, Vancouver, Sept. 21-25, 1998.
- [35] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2005). *Le caratteristiche degli acquiferi della regione Emilia-Romagna. Report 2003*.
- [36] Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. Di Dio, Selca Firenze.
- [37] Regione Emilia-Romagna (2010): Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n°350 del 8/2/2010 – Allegato 2 “*Tipizzazione/caratterizzazione e individuazione dei corpi idrici superficiali e sotterranei, prima individuazione delle reti di monitoraggio*”.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] CARLE S.F. (1996) *A Transition probability-based approach to geostatistical characterization of hydrostratigraphic architecture*. PhD dissertation, University of California, Davis.
- [41] CARLE S.F. (1999) *T-PROGS: Transition Probability Geostatistical Software version 2.1*, University of California, Davis.
- [42] Deutsch, C.V., Journel, A.G, (1997). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide* (Applied Geostatistics Series), Second Edition, Oxford University Press, 369 pp

- [43] Voss, C.I., A.M. Provost, (2002). *SUTRA: A model for saturated–unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport*. Water-Resour. Invest. Rep. 02-4231. USGS, Reston, VA.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2003). *Completamento del quadro conoscitivo sui carichi puntuali e diffusi e verifica ed aggiornamento del catasto degli scarichi*. In Supporto tecnico alla Regione Emilia-Romagna, alle Province ed alle Autorità di Bacino per la elaborazione del Piano Regionale Di Tutela delle Acque e Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (Art. 44 del D. Lgs. 152/99 e Art. 115 L.R. 3/99) - Quadro conoscitivo Attività E. Rapporto tecnico. Bologna.
- [47] Pratzzoli W., *Validazione di un modello di bilancio idrico per colture “idroesigenti”* (2009). ARPA Rivista N. 3 maggio-giugno 2009.
- [48] <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/dgrme/dgrme.asp>. Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse (UNMIG) della Direzione Generale per le Risorse Minerarie ed Energetiche del Ministero dello Sviluppo Economico. Dati di Produzione Idrocarburi.