

L. Alberti • V. Francani • M. Masetti • A. Parri

VALUTAZIONE DEL LIVELLO MASSIMO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA NEL COMUNE DI MILANO

Estratto da:

Supplemento 2

4
2000 7 • 4(2000)

QUADERNI DI TECNICHE
DI PROTEZIONE AMBIENTALE



L. Alberti, S. Piratta

L'uso del GIS per la gestione delle acque e la valutazione del rischio di inquinamento nella pianura tra i fiumi Ticino e Olona

L. Alberti, V. Francani, M. Masetti, A. Parri

Valutazione del livello massimo raggiungibile dalla falda nel Comune di Milano

S. Piratta, V. Francani, M. Cottino, F. Sertore

Applicazioni GIS per la gestione dei progetti di bonifica nelle aree industriali contaminate - esempi

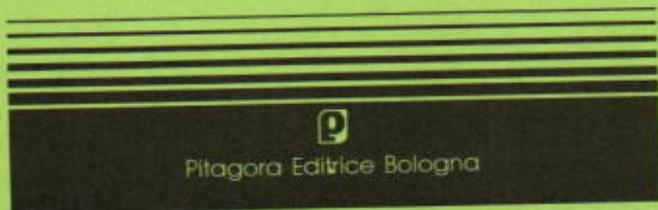
A. Bararino, P. Ciabatti, V. Igucci, M.C. Proverzano, G. Sestini

Studio idrogeologico ed idrochimico dell'acquifero multitalda della Piana di Castelvetrano e Campobello di Mazara (Sicilia occidentale)

P. Budetta, A. Sento

Assetto geostrutturale e caratterizzazione geomorfologica dell'Arco naturale di Palmuro (Campania)

segue n.4 di settembre



Valutazione del livello massimo raggiungibile dalla falda nel Comune di Milano^(*)

Luca Alberti⁽²⁾, Vincenzo Francani⁽¹⁾, M. Masetti⁽²⁾, Andrea Parri⁽²⁾

Riassunto. L'innalzamento dei livelli di falda nel sottosuolo della città di Milano costituisce un fenomeno, in atto dall'inizio degli anni '90, ben noto per i problemi che pone alla salvaguardia delle infrastrutture sotterranee. La risalita dei livelli delle acque sotterranee, ha però anche lo svantaggio di andare a risaturare porzioni del sottosuolo potenzialmente contaminate dalle attività produttive che si svolsero nelle vaste aree industriali dismesse milanesi. La conseguenza di tale fenomeno è la rimobilizzazione di sostanze inquinanti legate alla matrice del suolo e fino ad ora immobilizzate. La nota presenta la realizzazione, utilizzando il codice Modflow, di un modello matematico di flusso riguardante parte della Provincia di Milano, al fine di ottenere una corretta previsione degli innalzamenti della falda nei prossimi decenni.

[Parole chiave: *modello di flusso, innalzamento falda, Milano*].

Abstract. *The rising of groundwater head in the city of Milan, started since the beginning of nineties, causes many problems for the protection of the underground infrastructures. The phenomena also induce the re-saturation of the soils contaminated by the industrial activities located in the Milan brown-areas. Therefore the contaminants up to now bind to the ground matrix, are being mobilised. The paper presents a flux model, based on the Modflow code, of a portion of the Province of Milan, implemented in order to forecast the rising of groundwater in the next 10 years.*

[Key words: *hydrogeological model, groundwater rise, Milan*].

1. INTRODUZIONE

Nonostante il sensibile decremento che a partire dal 1998 hanno subito i livelli piezometrici, la soggiacenza della falda a Milano rimane molto ridotta, determinando in alcune zone allagamenti degli scantinati e problemi per le infrastrutture (linee della Metropolitana) progettate per livelli di falda molto inferiori. Sono infatti necessari drenaggi operati in continuo mediante pozzetti e pompe, o sporadicamente, quando il livello di falda si solleva in seguito alle forti piogge.

Da questa situazione consegue uno stato di disagio notevole per buona parte della città, sia per il degrado qualitativo della falda conseguente al contatto con i terreni più superficiali, che sono anche quelli più fortemente contaminati, sia per i problemi di stabilità degli edifici che nascono dalla rilevante escursione piezometrica annuale (anche 4 m) e dalla vicinanza della falda alla superficie nelle aree in cui predominano i limi e le argille. Ai fini di provvedere alla gestione della falda e di progettare correttamente gli interventi per il controllo del livello piezometrico, nasce pertanto la necessità di formulare una ragionevole previsione sul futuro comportamento della falda.

Gli studi recentemente condotti riguardanti il fenomeno dell'innalzamento della falda nel milanese, hanno individuato in diversi fattori le ragioni della risalita del suo livello avvenuta dal 1990 ad oggi (PROVINCIA DI MILANO, 1996; BERETTA G.P. e AVANZINI M., 1998). Pur dovendosi attribuire le responsabilità maggiori alla diminuzione dei prelievi idrici delle aziende, un ruolo importante è svolto anche dall'aumento delle piogge e dalla diminuzione

^(*) Pubbl. n. 2161 del GNDCI, linea 4 (responsabile Prof. Massimo Civita).

⁽¹⁾ Responsabile dell'U.O. 4.3 del DIAR, Politecnico di Milano e del progetto IDAV.

⁽²⁾ Collaboratori del Politecnico di Milano DIAR, Sezione Ambientale, p.za L. da Vinci 32.

dei prelievi pubblici, nonché a fattori stagionali quali le pratiche irrigue svolte in parte del territorio provinciale.

La valutazione del livello massimo raggiungibile dalla falda, nei prossimi decenni, non può quindi prescindere dalla valutazione d'insieme di tutti questi fattori e delle loro possibili variazioni.

Si è quindi ritenuto opportuno applicare un modello di flusso alle differenze finite, utilizzando il codice di calcolo Modflow, prodotto dall'United States Geological Survey e utilizzato dall'ente nazionale americano per la protezione dell'ambiente (E.P.A.).

2. MODELLO DI FLUSSO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

2.1. Fase di impostazione del modello idrogeologico

La modellazione del flusso idrico sotterraneo ha preso in considerazione un dominio piuttosto ampio. Tale scelta è stata dettata dal fatto che per le caratteristiche della pianura milanese, le oscillazioni della falda nel capoluogo lombardo non possono essere considerate svincolate dagli effetti del prelievo idrico attuato nel comune di Milano e nei comuni a monte caratterizzati da un'intensa urbanizzazione.

L'analisi della struttura idrogeologica degli acquiferi, del tipo di flusso idrico, delle condizioni al contorno del sistema e delle condizioni interne singolari, hanno permesso di identificare nell'area di studio i seguenti elementi caratteristici fondamentali per l'impostazione del modello concettuale:

- assenza di limiti naturali al contorno lungo i limiti nord e sud della provincia di Milano;
- presenza di diversi orizzonti acquiferi interessati dalle opere di captazione e schematizzati, ai fini della modellizzazione, in un corpo idrico superiore (acquifero superficiale) costituito da sedimenti di natura ghiaioso-sabbiosa, sede di una falda libera ed uno sottostante (acquifero tradizionale), sabbioso-ghiaioso e conglomeratico, contenente una falda semiconfinata;
- presenza di un orizzonte semipermeabile interposto tra le suddette falde, costituito da elementi di natura limosa e limoso-sabbiosa, che può essere individuato con una discreta continuità nella porzione meridionale dell'area mentre tende ad assottigliarsi e progressivamente a scomparire verso Nord, dove non si ha più la distinzione tra i due acquiferi;
- differenza di carico idraulico tra la prima falda (superficiale) e la seconda falda (semiconfinata) con drenanza verso il basso;
- presenza del cono di depressione della città di

Milano che influenza la direzione del flusso idrico sotterraneo.

2.1.1. La struttura idrogeologica

Il sottosuolo della pianura milanese è formato da una successione di sedimenti plio-pleistocenici, costituiti prevalentemente da limi e argille di origine marina nella parte basale mentre nella parte sommitale si hanno alternanze di ghiaie, sabbie, limi e argille di origine alluvionale e fluvioglaciale. Nella serie padana le principali variazioni litologiche sono contraddistinte dalla progressiva prevalenza di terreni limosi argillosi che avviene sia con l'aumento della profondità sia procedendo da nord verso sud; nel primo caso esse sono legate alle già evidenziate modifiche dell'ambiente di sedimentazione mentre nel secondo alla diminuzione dell'energia di trasporto degli agenti deposizionali. Nella pianura milanese si possono distinguere tre acquiferi principali:

- *L'Acquifero Tradizionale (TR)*: è un acquifero freatico con elevati valori di trasmissività (da $5 \cdot 10^{-2}$ a $1 \cdot 10^{-3}$ m²/s). Il suo spessore varia da 60 a 120 m. I sedimenti che lo costituiscono sono di origine quaternaria (Unità a conglomerati e arenarie, Un. sabbioso-ghiaiosa e Un. ghiaioso-sabbiosa); principalmente si tratta di ghiaie e sabbie, ma spostandosi da nord della provincia di Milano verso sud la presenza di livelli limosi e argillosi va aumentando. A cominciare all'incirca dal centro del comune di Milano questi livelli a litologia fine permettono di distinguere un acquifero TRa e un TRb: il primo contiene una falda superficiale a carattere freatico mentre il secondo una falda semiconfinata in quanto il livello di separazione è costituito da lenti discontinue con spessori compresi tra 0 e 10 m. La falda avente sede nell'acquifero TR viene chiamata *1° Falda* mentre dove è possibile distinguere tra TRa e TRb, vengono distinte la *Falda Superficiale* (TRa) dalla *Falda Semiconfinata* (TRb).

- *L'Acquifero Continentale (C)*: è localizzato nei sedimenti del Pleistocene (Unità argilloso-sabbiosa) d'origine deltizio-lagunare. La separazione della circolazione idrica dall'acquifero superiore TR è garantita da livelli d'argilla continui e d'elevato spessore. L'acquifero C rappresenta un'importante risorsa per la qualità delle sue acque, ma la bassa permeabilità e trasmissività ne limita le possibilità di sfruttamento. La falda con sede in questo acquifero viene chiamata *2° Falda*.

- *L'acquifero Marino (M)*: è l'acquifero più profondo con un tetto posto tra -230 e -300 m dal piano campagna in corrispondenza della città di Milano. È sfruttato da un ridottissimo numero di

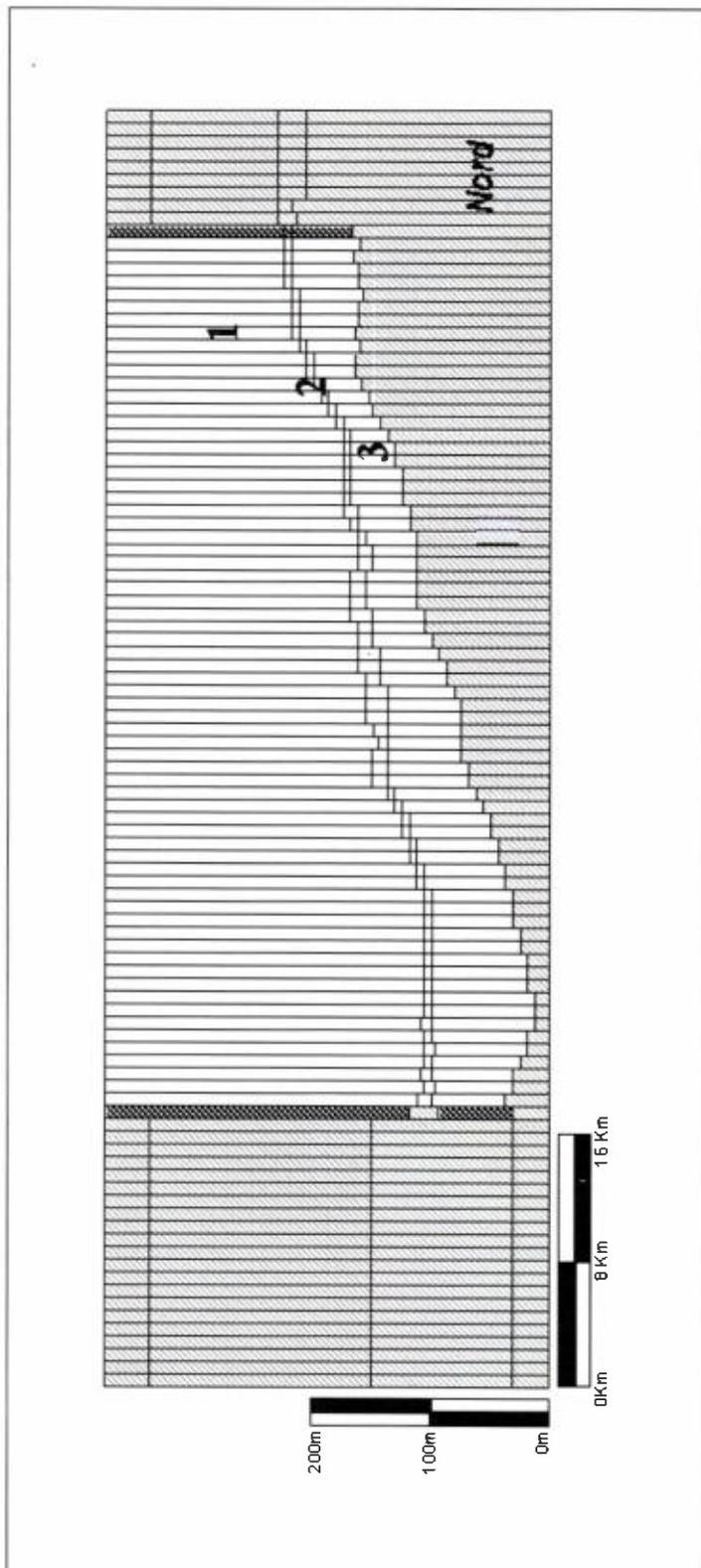


Figura 1. Discretizzazione verticale del sottosuolo lungo una sezione N-S.

pozzi e quindi le informazioni che lo riguardano sono attualmente molte scarse.

2.1.2. Modello concettuale

La ricostruzione della struttura idrogeologica è stata compiuta analizzando e in parte rielaborando le ricostruzioni degli acquiferi della pianura milanese pubblicate da precedenti Autori (CONSORZIO ACQUA POTABILE, 1995; PROVINCIA DI MILANO, 1995). Si sono inoltre esaminate le stratigrafie di numerosi pozzi ad uso pubblico e privato e di piezometri esistenti nell'area di studio che hanno permesso la costruzione di nuove sezioni idrogeologiche dirette Nord-Sud ed Est-Ovest. È stato così possibile individuare con un certo dettaglio l'andamento delle basi della falda superficiale e di quella semiconfinata, nonché dell'orizzonte semipermeabile.

La base dell'acquifero superficiale decresce regolarmente da Nord verso Sud a partire da valori di circa 180 m a circa 60 m s.l.m. Analogo andamento presenta la base dell'acquifero semiconfinato (TR/TRb), con valori variabili da 160 m a 10 m s.l.m. La base dello strato intermedio è posta da 175 m a 50 m s.l.m.

Il modello concettuale adottato prende in considerazione la circolazione idrica dell'acquifero TR. Gli acquiferi C non sono stati presi in considerazione nel modello concettuale proposto. La circolazione idrica in questi corpi idrici risulta, infatti, ben distinta da quella dell'Acquifero Tradizionale in gran parte del territorio provinciale (CONSORZIO ACQUA POTABILE, 1995). Solo nel settore più settentrionale gli acquiferi non sono ben separati dando luogo ad un monostrato: per poter considerare comunque l'effetto di questo scambio idrico esistente in tale settore si è scelto di simulare attraverso un'opzione di filtrazione (leakance) gli scambi idrici diretti verso il basso la cui quantificazione è stata possibile mediante l'utilizzo dei risultati di modelli di maggior dettaglio realizzati in precedenza (ALBERTI L., 1998): il volume idrico medio coinvolto nello scambio è stato valutato per un fronte di un chilometro essere pari a $1,83 \cdot 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il modello concettuale risulta essere quindi composto da tre layers che partendo dal piano campagna e approfondendosi nel sottosuolo rappresentano:

- strato 1: acquifero superficiale presente sino alla profondità media di 40-45 m, contenente la falda libera;
- strato 2: setto di separazione semipermeabile, di spessore 5-20 m;
- strato 3: acquifero sottostante contenente la falda semiconfinata, con profondità variabile tra 80 e 120 m.

In effetti, la distinzione in tre layers a nord di Milano è del tutto fittizia in quanto il setto semipermeabile perde di continuità areale lasciando posto ad un unico acquifero, quello Tradizionale: in questo settore i tre layers avranno quindi le stesse proprietà idrogeologiche rappresentando diverse porzioni dello stesso acquifero (fig. 1).

2.2. Parametri di input del codice numerico

2.2.1. Discretizzazione spaziale dell'area

L'area modellizzata è costituita dalla porzione centrale della Provincia di Milano; ad essa è stata sovrapposta una griglia di forma trapezoidale a maglie quadrate di lato 400 m. Essa consiste di 127 colonne, 100 righe e 4 strati per un totale di 16.565 celle attive (fig. 2). Il dominio modellizzato ha una superficie complessiva di 2.579 km².

2.2.2. Condizioni al contorno

Il modello di flusso qui presentato è di tipo stazionario, ma costituisce il primo passo per la realizzazione in seguito di un modello più completo in grado di simulare le oscillazioni della falda nel tempo. La scelta delle condizioni al contorno, oltre a basarsi sulla presenza di eventuali limiti fisici naturali, è stata quindi dettata anche dall'esigenza di porre una tipologia di condizioni sufficientemente «elastiche» perché potessero poi essere utilizzate anche in un modello transitorio.

Si sono utilizzate le seguenti condizioni al contorno:

- **Lato Nord:** condizioni miste del tipo Cauchy, simulate tramite il pacchetto General Head Boundary (GHB). Tali celle hanno quota piezometrica variabile nel tempo; il valore di carico piezometrico è determinato dalla portata calcolata attraverso la conduttanza longitudinale e la differenza di quota piezometrica tra la cella in esame ed un punto noto, esterno all'area, posto, in questo caso, a distanza pari a 3.200 m. Per tutti gli strati, data la struttura idrogeologica presente in questo settore, si è utilizzato il valore di quota piezometrica della falda freatica rilevata nell'ottobre 1996.

- **Lato Sud:** condizioni miste del tipo Cauchy, simulate tramite il pacchetto General Head Boundary (GHB).

Per il primo strato si è utilizzato il valore di quota piezometrica riferita alla falda freatica, mentre per il terzo quello riferito alla falda semiconfinata. Tutti i livelli piezometrici sono stati rilevati durante la campagna piezometrica dell'ottobre 1996.

Per il secondo strato si è posta la condizione al contorno di flusso nullo, approssimazione valida in

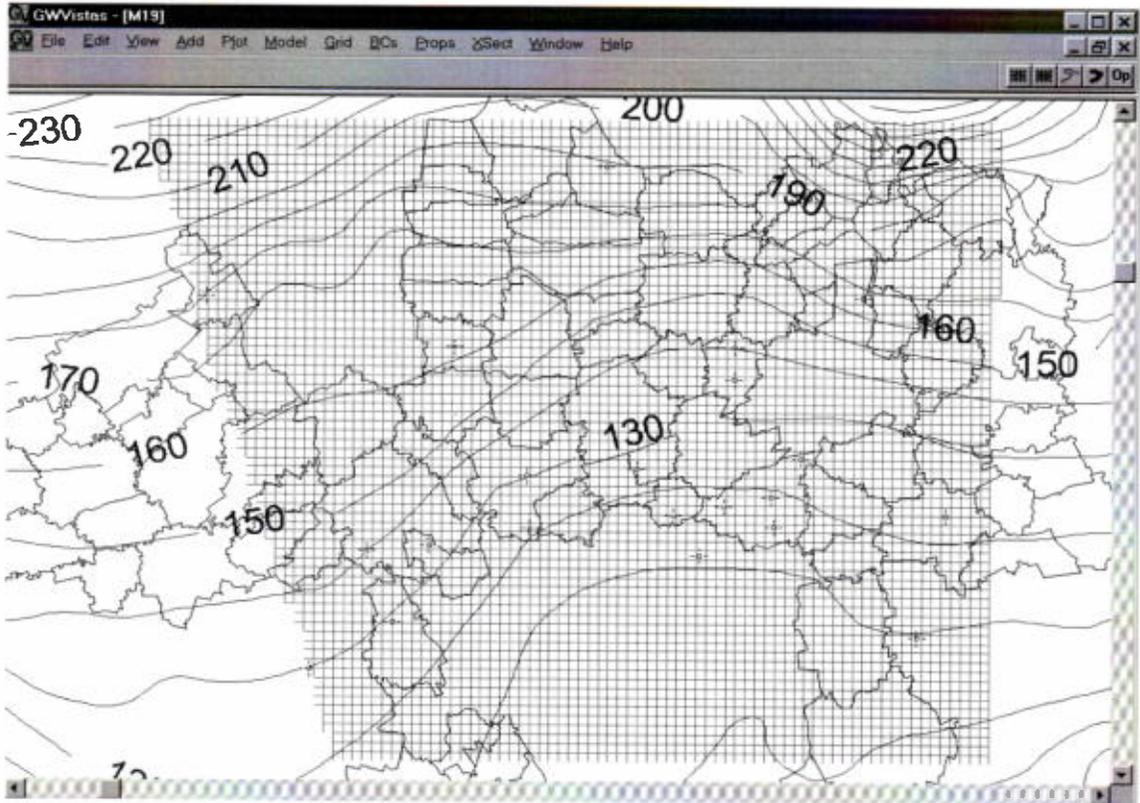


Figura 2. Dominio del modello e andamento della superficie piezometrica rilevata nell'ottobre 1996.

quanto nei livelli meno permeabili il flusso idrico ha una forte componente verticale.

- **Lato Est:** limite di non flusso.

Questa scelta si è basata sull'osservazione della morfologia della superficie piezometrica nel tempo (fig. 3). Prendendo in considerazione anche anni in cui l'estrazione di acqua dal sottosuolo era molto inferiore a quella attuale, l'area del comune di Milano costituisce sempre una zona di richiamo delle acque sotterranee contrastata dal forte effetto di drenanza esercitato dai fiumi Ticino e Adda rispettivamente posti a ovest ed est. Tale situazione determina la presenza di due spartiacque sotterranei, la cui posizione dimostra di conservarsi stabile nel tempo costituendo dei buoni limiti idrogeologici a carattere regionale. La stabilità nel tempo di questi limiti e la loro sufficiente distanza dall'area Bicocca ha determinato la scelta di simularli tramite condizioni di non flusso. Dove tale asserzione non è stata ritenuta valida (celle R11-R28), si sono applicate condizioni al contorno di tipo GHB.

- **Lato Ovest:** limite di non flusso.

La scelta è stata dettata da valutazioni analoghe

a quelle descritte per il lato orientale del modello.

2.3. Parametri idrogeologici degli acquiferi

I valori di conducibilità idraulica sono stati calcolati tenendo conto che ogni strato non rappresenta solo i livelli permeabili, ma una porzione di acquifero che comprende materiali a diversa permeabilità. A tal fine si è utilizzata l'equazione (ANDERSON M. e WOESSNER W., 1992):

$$(Kx)_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^m K_{i,j,k} b_{i,j,k}}{B_{i,j}} \quad (B)_{i,j} = \sum_{k=1}^m b_{i,j,k}$$

dove $B_{i,j}$ rappresenta lo spessore complessivo dello strato utilizzato nel modello, dato dalla somma dei singoli livelli litologici b ; a ciascuno di questi livelli è attribuita la propria permeabilità, ovvero, per quelli permeabili, il valore ricavato mediante prova di pompaggio o attraverso il metodo Cassan, mentre per quelli a litologia fine, è stato ipotizzato un valore medio pari a $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

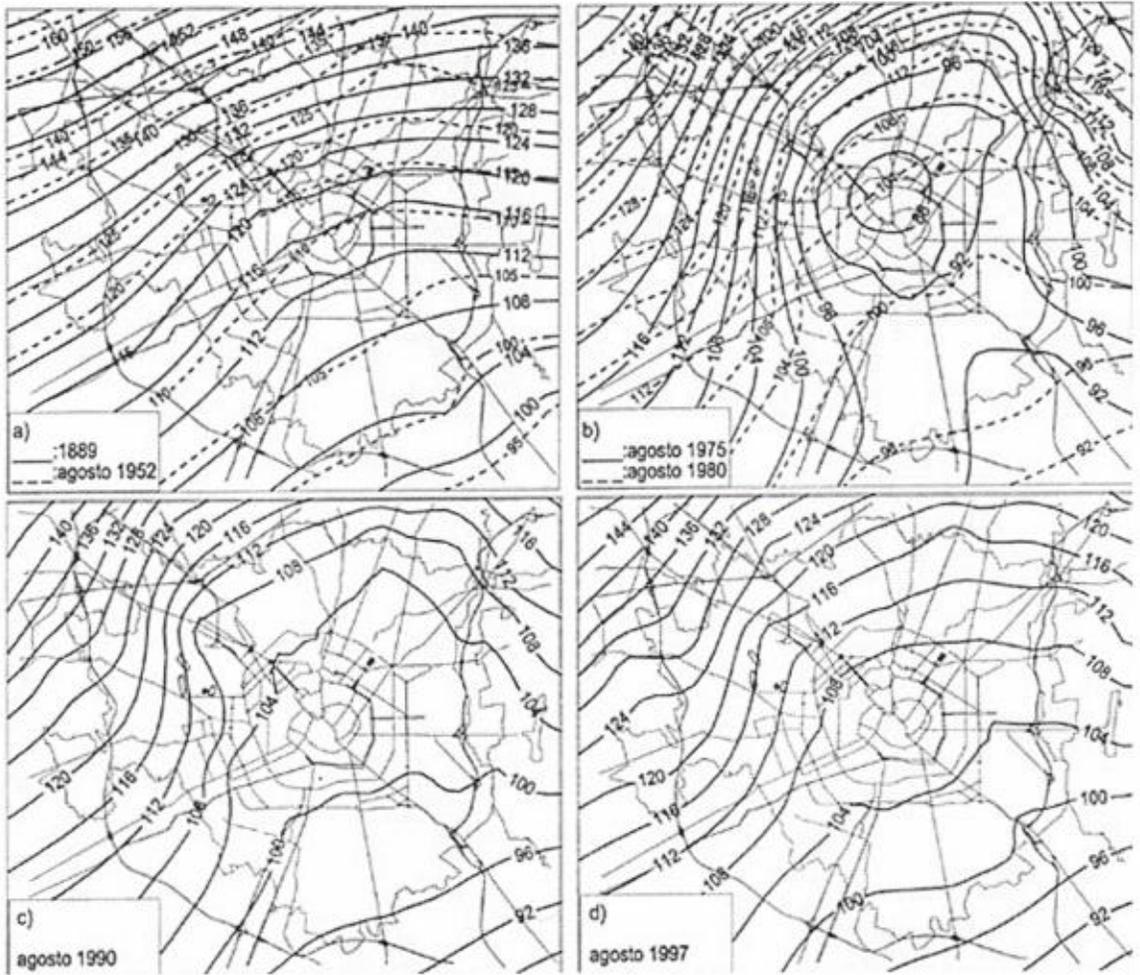


Figura 3. Oscillazioni della falda superficiale nel tempo nella sola area di Milano (fonte: FRANCANI V. et al., 1999).

Per l'acquifero superficiale (TRa) si sono quindi ricavati valori di permeabilità medi di $5 \cdot 10^{-4}$ m/s, tranne in corrispondenza del paleoalveo del fiume Lambro dove si ha un valore di $1 \cdot 10^{-3}$ m/s e dei terrazzi rissiano-mindeliani ($2,5 \cdot 10^{-4}$ m/s). Per il TRb si hanno valori di permeabilità variabili tra $2,5 \cdot 10^{-4}$ e $5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Anche in questo layer si registra un aumento della permeabilità dovuto ai depositi antichi del fiume Lambro (da $1 \cdot 10^{-3}$ m/s a $5 \cdot 10^{-3}$ m/s) e l'influenza dei terrazzi a Nord.

Le lenti limoso-argillose presenti nel layer 2, laddove a Sud dell'area modellizzata acquistano una continuità tale da determinare la separazione tra i due acquiferi, costituiscono un setto semipermeabile avente una permeabilità media di $5 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Per quanto riguarda la conducibilità idraulica del

primo acquifero in corrispondenza dell'area di interesse, si osservano valori medi pari a $1 \cdot 10^{-3}$ m/s.

2.3.1. Ricarica delle falde

La ricarica è costituita dagli apporti legati alla percentuale di infiltrazione nel sottosuolo, derivanti dagli afflussi meteorici e dalle irrigazioni sull'area di interesse.

Come valore di infiltrazione efficace è stata considerata una percentuale del termine di surplus idrico ricavato tramite elaborazione dei valori di precipitazione meteorica secondo il metodo proposto da Thornthwaite (THORNTHWAITE e MATER, 1957). Tale percentuale varia tra lo 0% e il 70% a seconda del grado di urbanizzazione dell'area considerata.

Le elaborazioni effettuate riguardano il trimestre

agosto-ottobre 1996, immediatamente precedente il periodo di determinazione delle altezze piezometriche. I valori di altezza di precipitazione mensile e di temperatura media mensile sono stati ricavati dalle registrazioni effettuate in corrispondenza delle seguenti stazioni termopluviometriche:

- Rete Ersal: Certosa di Pavia, Minoprio, Landriano, Monza, Vanzago;
- Rete idrografico: Paullo, Lodi, Milano Cer-

nusco sul Naviglio, Olginate, Vigevano.

Il termine di ricarica attribuibile alle portate irrigue distribuite all'interno dell'area è stato ricavato tramite analisi dei dati forniti dal Consorzio Villoresi (tab. 1). I dati presi in esame riguardano essenzialmente i valori di portata derivati e scaricati in corrispondenza del Fiume Ticino (per il canale Villoresi e il Naviglio Grande) e del Fiume Adda (per il Naviglio Martesana). Dai valori di portata giorna-

Tabella 1. Portate irrigue mensili (1996) dei canali secondari e della Martesana espresse in m³/s (Consorzio Villoresi).

Canale	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Parabiago	5.165	4.896	0	3.495	8.722	13.292	13.402	12.916	1.788	0	2.081	6.211
Rho	0.006	0	0	0.003	0.091	0.372	0.347	0.389	0.073	0	0	0.047
Passirana+Arese	0.081	0	0	0.284	1.087	2.156	2.152	1.976	0.657	0	0.056	0.548
Garbagnate	0.033	0	0	0.021	0.289	0.671	0.709	0.696	0.248	0	0.058	0.159
Val Seveso	0	0	0	0.006	0.305	0.548	0.55	0.583	0.257	0	0	0
Nova+Cinisello	0	0	0	0	0.03	0.206	0.164	0.132	0.049	0	0	0
Brugherio	0	0.11	0	0.09	0.19	0.28	0.36	0.35	0.06	0	0	0
Carugate+Cernusco	0	0.17	0	0.22	1.03	2.02	1.92	1.85	0.6	0	0.9	0
Martesana	9.940	9.940	1.54	2.55	18.05	31.590	31.1	23.52	12.34	0	2.63	9.940

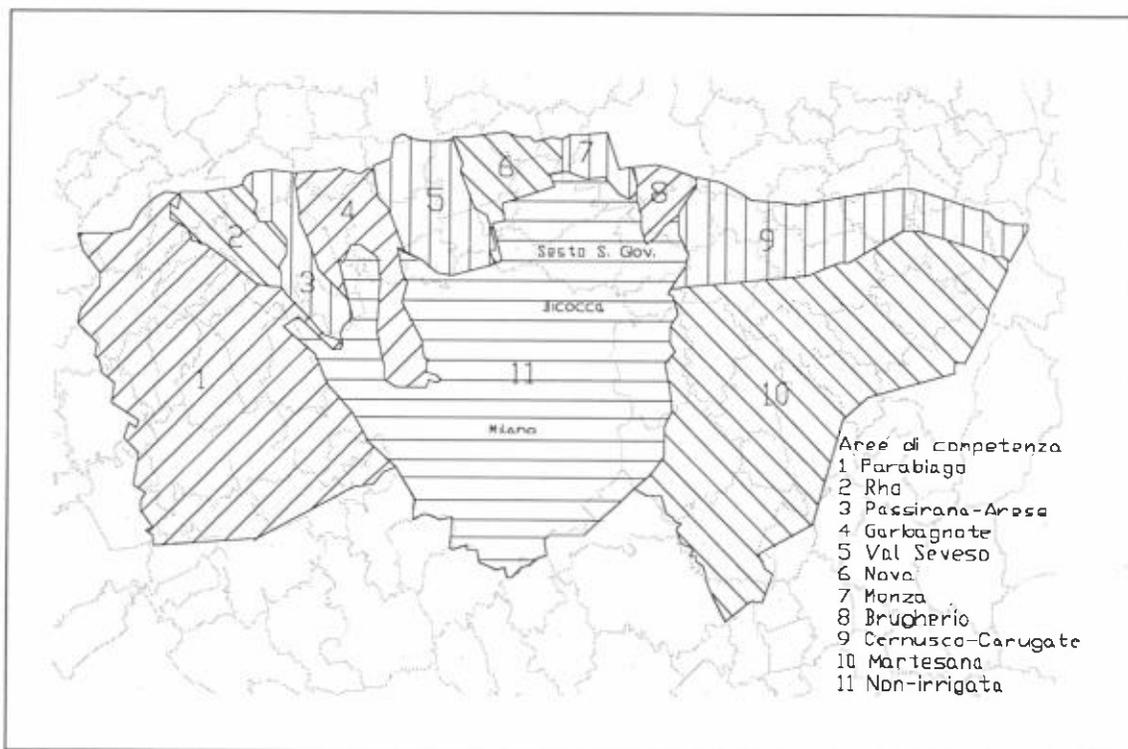


Figura 4. Aree di competenza irrigua delle bocche secondarie del C.le Villoresi all'interno del dominio di modellazione.

lieri registrati dal Consorzio sono state ricavate le portate medie mensili e, in seguito, quelle annuali, per gli anni che vanno dal 1992 al 1996. Per quanto riguarda gli scarichi, invece, sono stati disponibili solo dati parziali relativi ai valori medi mensili del 1996.

Le prese secondarie monitorate sono 14, tutte quelle presenti nel dominio modellato. L'analisi della cartografia disponibile ha consentito di individuare le aree di competenza attribuibili a ciascuno dei derivatori secondari (fig. 4).

In base alle indicazioni fornite dal Consorzio, inoltre, sono state considerate perdite dai canali pari al 20% delle portate totali derivate. Nel caso del Canale Villoresi tali perdite sono state ripartite in modo differente a seconda del grado di cementazione del tratto considerato. La porzione di canale a valle di Monza è risultata quella avente le più elevate perdite avendo il maggior numero di tratti di fondo in terra. Come nel caso delle precipitazioni, le elaborazioni effettuate riguardano il trimestre agosto-ottobre 1996.

Nell'ambito del modello matematico, quindi, sono state individuate zone a ricarica differenziata a seconda del grado di urbanizzazione e dell'uso agricolo del territorio. Sulla base delle elaborazioni eseguite, è stato considerato un valore medio di ricarica, espresso in termini di altezza d'acqua disponibile per unità di superficie, pari a $1,15 \cdot 10^{-8}$ m/s. In corrispondenza delle zone irrigue il contributo percentuale attribuibile ad infiltrazione meteorica varia dal 1,4% al 42%, mentre il contributo dovuto ad irrigazione varia dal 58% al 98,6% della ricarica totale.

In corrispondenza dell'area occupata dalla città di Milano il valore di ricarica comprende quasi esclusivamente le sole perdite delle reti di distribuzione, che si aggirerebbero mediamente intorno al 18% del sollevato (PROVINCIA DI MILANO, 1996).

2.3.2. Prelievi idrici dal sottosuolo

I prelievi costituiscono un importante termine di uscita dal modello che da alcuni Autori è stato indicato come il fattore responsabile del sollevamento della falda milanese negli anni '90. Per questo motivo si è cercato di definire al meglio questo termine del bilancio idrico soprattutto in corrispondenza della città di Milano e del suo hinterland.

Sono state considerate le portate emunte dai pozzi che ricadono nell'area considerata, distinguendo fra prelievo pubblico e privato. Per la città di Milano i valori dei prelievi sono stati forniti dall'Ufficio tecnico, Settore Acquedotto del Comune di Milano. I dati relativi ai prelievi pubblici e privati in

corrispondenza dei comuni circostanti sono stati desunti dall'esame della documentazione resa disponibile rispettivamente dalla Provincia di Milano e dal Genio Civile. I dati disponibili hanno consentito l'ubicazione dei singoli pozzi sia pubblici che privati in corrispondenza della città di Milano, mentre nei comuni circostanti le portate estratte dai singoli pozzi sono state sommate ed attribuite a quattro celle a flusso costante, sempre mantenendo, comunque, la distinzione fra pubblico e privato.

Per controllare l'attendibilità dei dati si è effettuato un confronto con i prelievi relativi al 1991 (PROVINCIA DI MILANO, 1993), mentre per lo studio delle variazioni temporali sono state analizzate le serie storiche dell'Acquedotto di Milano e informazioni tratte da altri Autori (AVANZINI M. e BERETTA G.P., 1998).

Allo scopo di suddividere i prelievi tra la falda superficiale e quella semiconfinata e questi da quelli delle falde profonde dell'acquifero C, è stato compiuto un dettagliato esame delle stratigrafie e dei dati disponibili relativi alla profondità dei singoli pozzi e ai livelli finestrati.

2.4. Calibrazione dei parametri e taratura del modello

Nella fase di calibrazione del modello si è cercato di agire sul minor numero di parametri e su quelli i cui valori apparivano più incerti a causa dei metodi utilizzati per la loro determinazione. I valori di prelievo idrico non sono stati calibrati in quanto da considerarsi un parametro con un buon grado di affidabilità rilevato da Enti preposti a tale compito (Comuni, Genio Civile, Provincia). I parametri che sono stati soggetti a calibrazione sono stati:

- valori di permeabilità degli acquiferi nelle zone in cui si aveva a disposizione un numero ridotto di stratigrafie; la calibrazione non ha in questo caso mai comportato una variazione dei valori rilevati superiore al mezzo ordine di grandezza;

- valori di conduttanza delle condizioni al contorno GHB poste a sud; la calibrazione è stata effettuata in funzione dei valori di permeabilità pubblicati da precedenti Autori relativamente alle aree poste a sud del dominio modellato;

- volumi idrici apportati alla falda dalle perdite dei canali irrigui.

Tramite la calibrazione dei parametri è stata effettuata la taratura del modello sulla base della piezometria rilevata nell'ottobre del 1996. Per giudicare se il modello fosse tarato sono stati utilizzati 25 target corrispondenti ad alcuni dei punti di misura utilizzati per monitorare la falda dal Consorzio Ac-

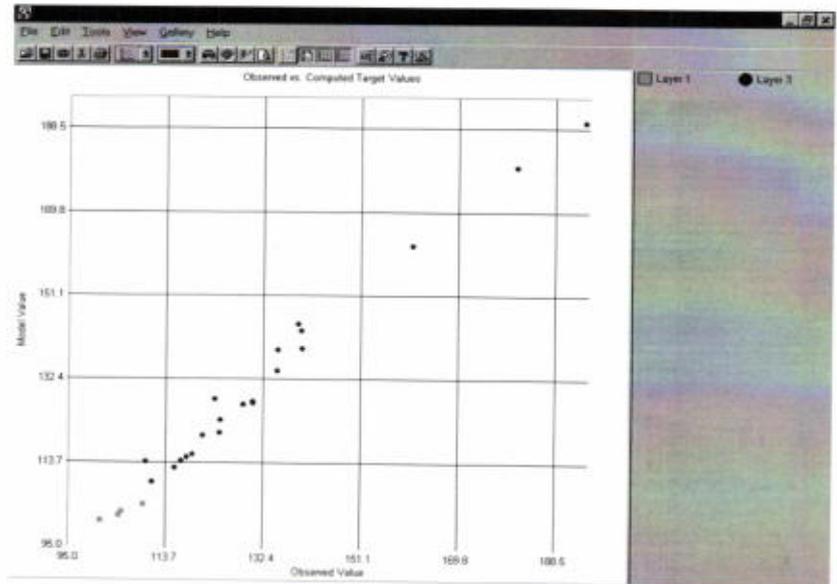


Figura 5. Valori piezometrici simulati rispetto a quelli rilevati durante la campagna piezometrica del 1996.

qua Potabile di Milano. L'ubicazione dei target non risulta essere omogeneamente distribuita in quanto si è voluto utilizzarne un numero maggiore in corrispondenza di Milano: è qui infatti che si desidera che siano minimizzati gli errori compiuti dalla simulazione del flusso idrico sotterraneo.

Considerando i residui ovvero la differenza tra il valore piezometrico misurato e quello simulato, la media dei loro valori assoluti risulta essere pari a 2,69 m. Si tratta di un valore estremamente ridotto soprattutto in considerazione del fatto che si tratta di un modello a scala regionale nel cui dominio i valori piezometrici hanno un ampio spettro di variazione (circa 130 m). In generale un modello si considera tarato quando il rapporto tra la deviazione standard dei residui e l'intervallo dei valori piezometrici nel dominio risulta essere inferiore al 15%. Nel nostro caso tale valore risulta essere pari al 3,1%.

Un ultimo elemento che si vuole qui considerare per giudicare la taratura è costituito dal grafico in fig. 5 dove sono rappresentati i valori piezometrici simulati rispetto a quelli rilevati durante la campagna piezometrica: la disposizione dei punti lungo una retta inclinata di 45° indica una buona capacità da parte del modello nel simulare il flusso idrico sotterraneo e i suoi gradienti piezometrici.

3. CAUSE SOCIO-ECONOMICHE

Un'analisi dell'innalzamento della falda nel mi-

lanese non può prescindere dallo studio delle voci che compongono il bilancio idrico dell'area. Secondo il gruppo di ricerca, incaricato dalla Regione Lombardia di realizzare un'indagine sui problemi idrogeologici della regione (FRANCANI V., BERETTA G.P., AVANZINI M.), le principali voci (tab. 2) di entrata: irrigazioni, afflusso da monte, piogge, non hanno registrato negli anni modifiche tali da giustificare un fenomeno così marcato. Cambiamenti significativi sono stati riscontrati invece nelle voci di uscita, all'interno delle quali, l'elemento di maggiore rilevanza sono risultati essere senza dubbio i prelievi. I dati del Comune di Milano, Settore Acquedotto, mostrano come in vent'anni, l'entità della risorsa idrica complessivamente estratta dall'acquifero Tradizionale si sia drasticamente ridotta. Il consumo d'acqua è strettamente legato all'evoluzione economica e sociale della popolazione e pertanto, nell'ottica della costruzione di un modello di flusso a scopo previsionale, un'analisi di questi aspetti può contribuire a migliorare la comprensione del fenomeno ed a determinare i parametri che, in futuro, maggiormente potranno influenzarne il bilancio idrico.

3.1. Analisi dei parametri socioeconomici

3.1.1. Imprese e occupazione

Secondo gli studi IReR e ASSOLOMBARDA, dal 1936 al 1980 il peso del capoluogo milanese sul totale dell'area provinciale è sceso dal 51,8% al 28,7% in termini di superficie urbanizzata, dal 67,7%

Tabella 2. Incidenza percentuale dei parametri del bilancio idrico sotterraneo nel settore Adda-Ticino e nel territorio di Milano (II trimestre 1994).

<i>Afflussi</i>	<i>Ticino/Adda (4.315 km²)</i>	<i>Milano (181,7 km²)</i>
Infiltrazione efficace/perdite reti	36,90%	38,2%
Irrigazioni/Perdite da corsi d'acqua	48,40%	—
Afflusso da monte	14,70%	61,8%
<i>Deflussi</i>	<i>Ticino/Adda (4.315 km²)</i>	<i>Milano (181,7 km²)</i>
Drenaggio dai fontanili	11,20%	—
Prelievi idrici	46,11%	84,26%
Drenaggio fiumi	42,69%	—
Deflusso valle/laterale	—	15,74%

al 50% come popolazione residente e dal 69,7% al 42,5% in termini d'addetti all'industria. Il calo degli addetti alla grande industria, all'interno della Regione Lombardia, ha colpito principalmente Milano (GASPARINI, 1981; MAZZOCCHI, 1981; PREDETTI, 1985) dove, negli anni '70-'80, si concentravano la maggiore parte dei poli industriali. Dal 1981 al 1992 il comune di Milano ha infatti perso 68.766 posti di lavoro, principalmente all'interno dell'industria chimica, cartaria e della trasformazione dei metalli.

3.1.2. Rispecializzazione settoriale

Il progresso tecnologico e le esigenze di mercato

hanno imposto lo «smembramento» dei mastodontici apparati produttivi tipici degli anni cinquanta e sessanta. La riorganizzazione delle industrie in unità di piccole e piccolissime dimensioni è legata alla conversione del processo produttivo che, dalla trasformazione delle materie prime, si sposta verso attività di assemblaggio, confezionamento e commercializzazione del prodotto. I nuovi campi di espansione diventano l'high tech ed il terziario; quest'ultimo in particolare, tra il 1980 ed il 1990 registra un incremento percentuale a Milano pari all'83,4%. In valore assoluto tale crescita si concretizza con un aumento dei posti di lavoro di 44.986 unità. L'evoluzione

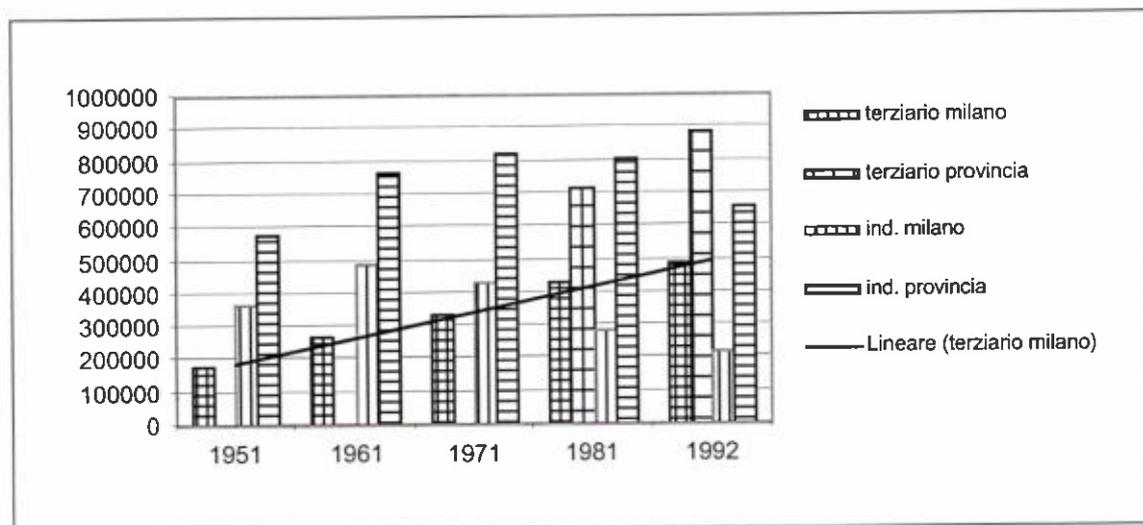


Figura 6. Numero di addetti per settore a Milano e Provincia.

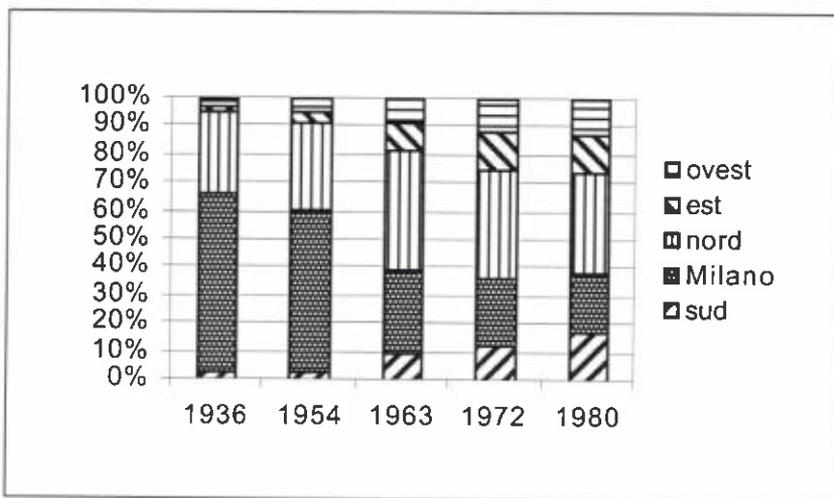


Figura 7. Percentuale di suolo occupato da insediamenti produttivi nell'AMM (da IReR modificato).

subita nell'ultimo decennio ha cambiato in sostanza il volto della metropoli milanese che, pur rimanendo a livello regionale statisticamente sovra-industrializzata, ha sviluppato una predominante componente di terziario (fig. 6).

3.1.3. Decentramento produttivo

La ricerca di aree meno congestionate e meno costose per l'insediamento degli stabilimenti sposta i comparti produttivi verso la periferia e le grandi vie di comunicazione (tangenziali, autostrade) di recente costruzione. La destinazione dei suoli a scala provinciale evidenzia la migrazione delle aziende, da Milano verso l'Hinterland e all'interno dell'AMM. (Area Metropolitana Milanese) dai comuni a nord verso quelli sudorientali ed occidentali (fig. 7). A Milano le grandi aree industriali dismesse, principale prodotto di questo fenomeno migratorio, sono ormai stimate in 6.400.000 m².

3.2. Popolazione

Sino dalla fine del secolo scorso, l'intensa industrializzazione alla quale fu soggetta Milano, determinò un rapido incremento della popolazione che passò rapidamente dai 400.000 abitanti del 1885 ai 600.612 del 1911 fino al milione attorno alla metà degli anni '30. A scala provinciale, l'espansione urbana interessò principalmente il capoluogo ed i comuni limitrofi a nord. L'aggregazione avveniva per fasce concentriche ed interessava i comuni più grandi (da 10.000 a 50.000 abitanti) e vicini a Milano (< 20 km).

Tra gli anni cinquanta e sessanta, la popolazione milanese aumentò di quasi 500.000 unità (tab. 3) raggiungendo nel 1975 il massimo storico con 1.732.000 abitanti. Ancora più vertiginoso fu il ritmo di crescita dei comuni dell'Hinterland che, in questo stesso periodo, videro aumentare del 180% il numero dei loro abitanti. Alla fine degli anni Sessanta a Milano iniziano a manifestarsi i segni che preludono al fenomeno della deconcentrazione urbana. Come evidenzia la tab. 3, mentre il saldo demografico in provincia si mantiene sostanzialmente in pareggio, Milano subisce una flessione del 7% (negli anni Settanta) e del 15% (negli anni Ottanta).

L'analisi della dinamica demografica mette in evidenza lo spostamento della popolazione in aree sempre più lontane da quello che prima era invece il centro di attrazione: il capoluogo milanese. Anche a scala provinciale, si assiste al ridimensionamento del peso demografico della provincia di Milano a favore delle province vicine. Il decremento demografico della città di Milano diviene negli anni Ottanta-

Tabella 3. Tassi di variazione percentuale della popolazione (1951-1991), AMM = Area Metropolitana Milanese (da FOLLONI G. e MAFFENINI W. modificato).

	1951/1961	1961/1971	1971/1981	1981/1991
Milano	+24%	+9%	-7%	-15%
A.M.M.	+24%	+31%	+10%	+4%
Lombardia	+13%	+15%	+4%	-1%

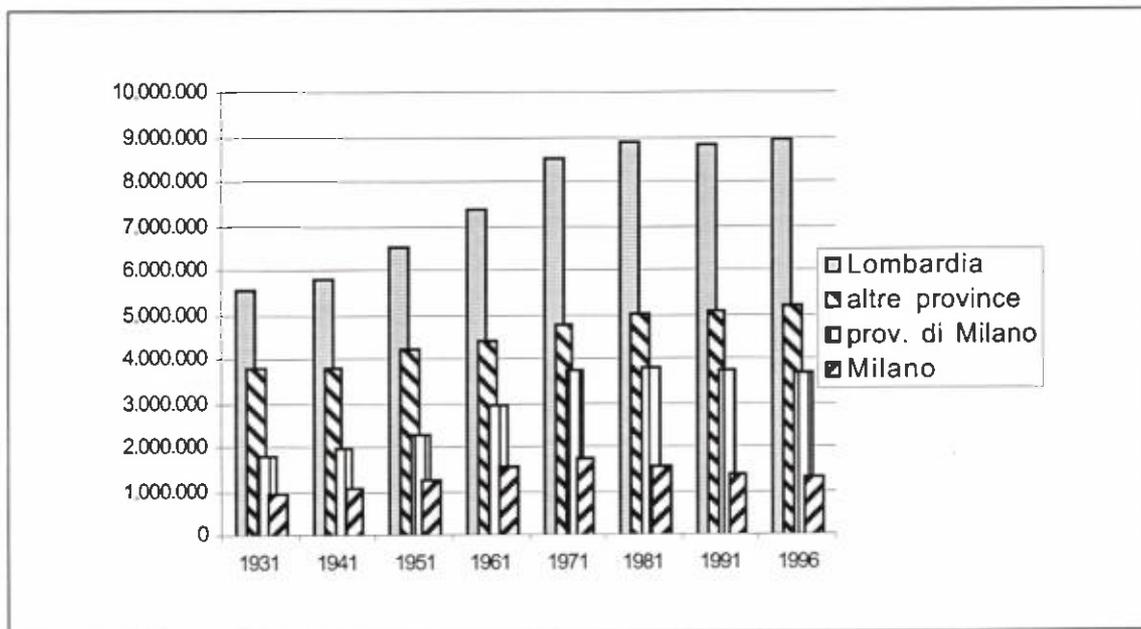


Figura 8. Evoluzione della popolazione residente in Lombardia (ISTAT modificato).

ta e Novanta una tendenza stabile, mentre in generale nei comuni dell'Hinterland l'aumento della popolazione perdura fino al 1990. I comuni settentrionali, come Sesto S. Giovanni e Monza, registrano a partire dal 1980 un calo di popolazione analogo, anche se meno accentuato, a quello del capoluogo lombardo, diversamente quelli a sud vedono tuttora aumentare i propri residenti, anche se in modo meno marcato rispetto a prima. Esempi emblematici sono i comuni di Assago, Buccinasco e Pieve Emanuele, che nell'ultimo ventennio hanno più che raddoppiato i propri abitanti.

Previsioni per i prossimi anni

Secondo il rapporto IRER (Istituto Regionale di Ricerca della Lombardia) 1996-1997 dopo il forte incremento demografico degli anni Sessanta, il suo progressivo rallentamento nel decennio successivo e la sostanziale stabilità (pur con fasi di calo e di ripresa) tra l'inizio degli anni Ottanta ed i giorni nostri, la popolazione lombarda sembra orientata a subire, nell'ipotesi peggiore di fecondità costante ed assenza di apporti migratori, un consistente ridimensionamento numerico. Tra il 1996 ed il 2001 si verrebbe a perdere, per il solo effetto della dinamica naturale, circa 110 mila abitanti. Un calo che sembra destinato a quintuplicarsi nel corso del primo decennio del nuovo secolo e ad accentuarsi ulteriormente

negli anni successivi. Nell'arco di 15 anni, la popolazione lombarda perderebbe circa il 7% della sua consistenza attuale e tornando allo stesso numero di residenti, che la caratterizzavano nel corso della seconda metà degli anni Sessanta. Tali decrementi potrebbero essere fortemente mitigati da una ripresa del tasso di fecondità o più verosimilmente dall'apporto migratorio; un afflusso annuo di 20 mila immigrati, infatti, conterrebbe il calo demografico entro dimensioni modeste (circa 30 mila unità).

4. SIMULAZIONI PREVISIONALI

Una volta costruito il modello di flusso ed effettuata la sua taratura esso è in grado di simulare correttamente la morfologia della superficie piezometrica sotto diverse condizioni idrogeologiche. Sulla base del modello tarato sono state quindi effettuate una serie di simulazioni di carattere previsionale al fine di calcolare, nel milanese l'innalzamento della falda sotto diverse condizioni di estrazioni di acque dal sottosuolo.

Gli scenari prospettati sono 5 e i risultati forniti per ognuno di essi sono rappresentati nella tabella 4.

Per tutte le simulazioni sono state utilizzate le condizioni di ricarica riferite al 1979, anno durante il quale sono state registrate a Milano piogge per un totale di 1.358 mm, il valore più elevato registrato

negli ultimi 30 anni e nettamente superiore alla media annua dell'ultimo trentennio che risulta essere pari a 900 mm.

Scenario A

Nell'ultimo decennio nel comune di Milano e dell'hinterland è stata registrata una riduzione del 49% dei consumi idrici privati. Tale situazione è legata principalmente alla crisi dell'industria meccanica e chimica, al decentramento delle attività produttive e alla forte crescita del settore terziario. Nel solo territorio del comune di Milano tra il 1994 e il 1996 si è avuta una riduzione dei prelievi privati del 16% (da 32,6 milioni m³/anno a 27,3 milioni m³/anno). Ipotizzando che il consumo idrico privato nei prossimi anni possa ulteriormente ridursi, il primo scenario considera per la sola città di Milano un nuovo decremento del 30%, che porta il volume idrico inserito nel modello a rappresentare il solo 19% dei prelievi privati registrati nel 1979.

Vista la forte riduzione dei prelievi industriali registrata negli anni precedenti non si ritiene lecito aspettarsi un decremento maggiore di quello ipotizzata in quanto comporterebbe l'azzeramento quasi totale delle attività produttive industriali, già attualmente fortemente ridotte rispetto al 1990.

La simulazione fornisce in effetti come risultato un innalzamento molto lieve della falda che nella zona nord est di Milano (Bicocca) si attesterebbe sui 19,8 m dal piano campagna, 7 m al confine tra Milano e S. Donato (imbocco Paulllese) e 12,9 m

nella zona sud ovest (Naviglio Grande-P.zza Frattini).

Scenario B

Il secondo scenario prende in considerazione oltre alla riduzione del 30% dei prelievi privati anche una riduzione dei prelievi pubblici nella città di Milano. Questi sono stati diminuiti del 5% portandoli a 237 milioni di m³/anno che, considerando un consumo pro capite di 218 m³/anno (PROVINCIA DI MILANO, 1993), significa una diminuzione della popolazione in Milano di circa 60 mila abitanti rispetto a quella residente nel 1996.

Per avere un parametro di raffronto si deve tenere conto che tale cifra corrisponde alla popolazione residente in un comune di medio-grandi dimensioni (es. Legnano o Siena). Per ritrovare valori di prelievo idrico pubblico quali quelli prospettati bisogna ricondursi alla situazione del 1955 (fig. 9).

La simulazione prevede un innalzamento ancora piuttosto ridotto con soggiacenza pari a 18,2 m in Bicocca, 11,4 m presso il Naviglio Grande e 5,6 m presso l'imbocco della Paulllese.

Scenario C

Si è ritenuto opportuno verificare le conseguenze di uno scenario previsionale simile al precedente nel caso di uno spopolamento ulteriore della città di Milano, corrispondenti alle previsioni per il 2005, tale da ridurre il prelievo pubblico del 10%.

In questo scenario previsionale il prelievo pubblico corrisponde al valore registrato a Milano nel

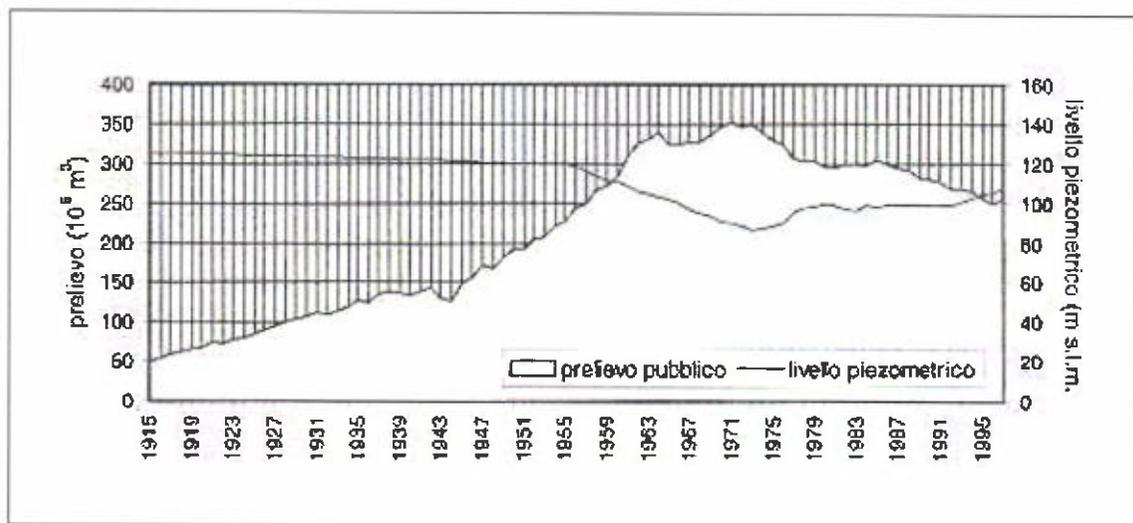


Figura 9. Andamento del prelievo pubblico e del livello piezometrico nella città di Milano (BERETTA G.P. e AVANZINI M., 1998).

1953-54. L'innalzamento della falda previsto dal modello è ovviamente maggiore di quanto calcolato nel caso precedente, ma nella zona a nord di Milano rimane ampiamente al di sotto del piano campagna circa 16 m (Bicocca 16,4 m) non evidenziando particolari situazioni di pericolo per gli edifici e le infrastrutture sotterranee. Più allarmante appare invece la situazione nella zona sud-est dove abbiamo una soggiacenza di soli 4,3 m nella zona d'imbocco della Paultese. Presso il Naviglio Grande si hanno circa 10 m di soggiacenza.

Scenario D

In considerazione del fatto che il fenomeno della riduzione dei prelievi idrici potrebbe riguardare non solo Milano, ma anche il suo hinterland è stato costruito il quarto scenario ipotizzando una riduzione del 5% dei prelievi pubblici e del 30% di quelli privati anche nei comuni confinanti con il capoluogo lombardo.

Globalmente ciò significa una riduzione del 12% (circa 40 milioni di m³/anno) dei volumi idrici totali prelevati in Milano e nei comuni confinanti.

Nella zona Bicocca si avrebbe un sollevamento del livello piezometrico fino a 14,1 m dal piano campagna, mentre nella zona a sud di Milano la soggiacenza si riduce nettamente arrivando a soli 3 m nella zona d'imbocco della Paultese e 8,5 m presso il Naviglio Grande.

Scenario E

È uno scenario simile al precedente in cui si è voluto ridurre ulteriormente il prelievo privato nell'hinterland milanese. Prospettando una crisi produttiva nei principali poli industriali storici, è stata attuata un'ulteriore riduzione dei prelievi idrici nei comuni di Sesto S. Giovanni, Pioltello, Rho e Arese

annullando quasi del tutto l'attività produttiva industriale anche in questi centri abitati.

Nonostante queste ipotesi fortemente pessimistiche la falda nella zona nord del comune di Milano non desterebbe particolari preoccupazioni, in Bicocca si avrebbero 12,7 m di soggiacenza, mentre a sud continuerebbe a sussistere una situazione di criticità in particolare per la zona est (2 m zona Paultese).

Si ritiene importante sottolineare che in tutte le simulazioni previsionali non è mai stata presa in considerazione l'ipotesi di un aumento dei prelievi idrici pubblici o privati nei restanti comuni della provincia di Milano; lo spopolamento della città di Milano e del suo hinterland non costituisce infatti una riduzione della popolazione dell'intera provincia, ma è logicamente ipotizzabile la sua redistribuzione verso i comuni circostanti l'area milanese.

CONCLUSIONI

Tramite un modello matematico è stato possibile simulare il flusso idrico sotterraneo per un'ampia porzione della provincia di Milano. La correttezza di tale operazione è stata controllata in base al confronto tra la piezometria rilevata nel 1996 e quella riprodotta dal modello matematico. Sinteticamente il confronto ha fornito i seguenti risultati:

- rapporto «deviazione standard dei residui/intervallo valori piezometrici» pari al 3,1% molto inferiore al 15% comunemente accettato per modelli regionali e inferiore al 10% consentito per modelli locali;

- media dei valori assoluti dei residui, dove per residuo s'intende la differenza tra il valore piezometrico misurato realmente e quello simulato, pari a 2,2 m per l'area di Milano e relativo hinterland e solamente 2,69 m su tutta l'area del modello.

Tabella 4. Risultati delle simulazioni di previsione condotti sulla base del modello tarato.

<i>Ipotesi</i>	<i>Riduzione Prelievi</i>	<i>Riduzione Prelievi</i>	<i>Riduzione Prelievi</i>	<i>Riduzione Prelievi</i>	<i>Riduzione Prelievi</i>	<i>Soggiacenza Falda</i>
	<i>Milano Pubblici</i>	<i>Milano Privati</i>	<i>Hinterland Pubblici</i>	<i>Hinterland Privati</i>	<i>Poli ind. Hinterland (Nord)</i>	<i>Nord-est Milano (m p.c.)</i>
A	—	30%	—	—	—	19,8
B	5%	30%	—	—	—	18,2
C	10%	30%	—	—	—	16,4
D	5%	30%	5%	30%	—	14,1
E	5%	30%	5%	30%	50%	12,7

– errore ridottissimo (0,4%) nel bilancio di massa calcolato dal modello.

Sulla base del modello tarato sono state effettuate 5 nuove simulazioni di tipo previsionale che considerano diversi scenari di evoluzione socio-economica dell'area metropolitana milanese. Tutti i modelli previsionali forniscono come risultati livelli della falda che si mantengono nel settore nord della città di Milano al di sotto delle infrastrutture sotterranee.

La redazione del modello previsionale presenta quindi elementi rassicuranti sui rischi ai quali sarà nel futuro soggetta l'area urbana. Un valido contributo alla limitazione del sollevamento sarà senza dubbio fornito dai provvedimenti che da più parti vengono posti in essere già da un anno; si segnala la significativa azione del Comune di Milano, che ha posto in funzione prelievi da pozzo per oltre 1 metro cubo/s, e del Consorzio Villoresi, che ha ridotto in modo considerevole le erogazioni di acque irrigue nel periodo invernale.

Queste iniziative hanno avuto ripercussioni evidenti sul comportamento del livello piezometrico, che risulta in visibile diminuzione.

Il mantenimento della profondità della falda presenta in effetti importanti conseguenze anche dal punto di vista della qualità delle acque, in quanto riduce in modo consistente la vulnerabilità delle falde alle contaminazioni, ed impedisce il contatto delle acque sotterranee con i sedimenti superficiali ai quali si propagano le infiltrazioni di sostanze (soprattutto nitrati), provenienti da scarichi contaminanti.

Lo studio eseguito indica quindi che il degrado qualitativo delle acque sotterranee potrà essere controllato, e che gli effetti del sollevamento della falda in generale saranno limitati, pur avendo l'indagine definito solo in via ancora ipotetica e cautelativa il livello massimo raggiungibile.

Tuttavia si sottolinea che esistono elementi di rischio dove la presenza di rogge e canali consente un afflusso considerevole di acqua alla falda nel corso dei periodi di piena; in queste aree il sollevamento della falda ha portato il livello piezometrico molto vicino alle fondazioni degli edifici dove, sia pure occasionalmente, l'apporto concentrato di acque potrà determinare disagi. Analogamente, si potranno avere contaminazioni determinate da queste stesse circostanze per il dilavamento di sostanze contenute nei primi metri di terreno.

BIBLIOGRAFIA

ALBERTI L. (1988) - *Studio idrogeologico della dinamica*

degli acquiferi della pianura legnanese tra Ticino e Olona (NW Milano). Quaderni di Geologia Applicata, 5, 2, Pitagora Editrice, Bologna.

ANDERSON M., WOESSNER W. (1992) - *Applied Groundwater Modeling: Simulation of flow and advection transport*. Academic Press, Inc.

BERETTA G.P., COLOMBO F., FRANCANI V., ROSTI G. (1995) - *Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano Vol. 1: lineamenti idrogeologici*. Provincia di Milano Assessorato all'Ambiente e Politecnico di Milano (D.S.T.M.), stampa: litografia Solari, Peschiera Borromeo (MI).

BERETTA G.P. (1987) - *Studi idrogeologici sulla Pianura Padana 3: contributo per la carta idrogeologica della Lombardia*. Litotipografia Grafiche Somalia Snc, Cormano (Milano).

CASATI P. (1986) - *Le acque sotterranee nel territorio di Monza*. A cura di P. Casati.

CASSAN M. (1980) - *Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols*. Eyrolles, Parigi.

CASTANY G. (1963) - *Traité pratique des eaux souterraines*. Dunod, Parigi.

CAVALLIN A., FRANCANI V., MAZZARELLA S. (1983) - *Studio idrogeologico della pianura compresa tra Adda e Ticino*. Costruzioni n. 326-327, Milano.

CAVALLIN A., CLERICI F., MAZZARELLA S. (1980) - *Coefficienti di trasmissività, immagazzinamento e permeabilità dell'acquifero milanese determinati con prove in situ*. Bollettino dell'Associazione Mineraria Subalpina, Anno XVII, n. 2.

CHIESA G. (1982) - *Potenzialità idrica delle falde*. A.N.I.P.A., Milano.

FEDERLOMBARDA (1973) - *Atlante delle condizioni insediative industriali*.

FOLLONI G., MAFFENINI W. - *Dinamiche localizzative ed insediative nell'area metropolitana milanese*, Rivista internazionale di scienze sociali n. 4.

FRANCANI V., BERETTA G.P. (1995) - *Indagine preliminare sull'uso sostenibile delle falde profonde in provincia di Milano*. CAP.

FRANCANI V., AVANZINI M., BERETTA G.P. (1999) - *Il controllo della falda*. Costruzioni n. 516, anno XLVIII, La Fiaccola srl, Milano.

FRANCANI V., DENTI E., FUMAGALLI L., PEZZERA G., SALA P. (1988) - *Studi idrogeologici sulla Pianura Padana 4*. Litotipografia Grafiche Somalia Snc, Cormano (Milano).

FRANCANI V., POZZI R. (1976) - *Le acque sotterranee della media valle del fiume Olona: problemi idrogeologici*. C.N.R.- Istituto di Ricerca sulle Acque, 28 (5).

FRANCANI V., POZZI R. (1981) - *Condizioni di alimentazio-*

ne delle riserve idriche del territorio milanese. La Rivista della Strada, L. 303, Milano.

LAVENI L. (1995) - *Prime valutazioni circa lo sfruttamento delle falde profonde nella provincia di Milano.* Tesi di laurea, Facoltà di Scienze della Terra, Milano.

IRER (1998) - *Rapporto IReR 1996-1997.* Milano.

IRER - *Recupero di aree industriali dismesse in ambiente urbano.* Milano.

IRER - *Trasformazione territoriali ed organizzazione urbana,* Milano.

MARTINIS B., MAZZARELLA S. (1971) - *Prima ricerca idrica profonda nella pianura lombarda.* Memorie Ist. Geol. e Min. Università di Padova, vol. XXVIII, Padova.

MARTINIS B., ROBBA E. (1978) - *Contributo alla stratigrafia dei depositi Quaternari del sottosuolo di Milano.* Riv. It. Paleont., vol. 84, Milano.

MCDONALD M., HARBAUGH A. (1988) - *A modular three-dimensional finite-difference ground-waterflow model.* U.S. Government printing office.

PROVINCIA DI MILANO, ASSESSORATO ALL'ECOLOGIA E IDRAULICA (1985) - *Il canale Scolmatore delle Piene a Nord-Ovest di Milano nel sistema drenante ed irriguo della Provincia di Milano.* Le Monnier, Firenze.

REGIONE LOMBARDIA, SETTORE AGRICOLTURA E FORESTE (1992) - *Compensori di Bonifica.* Cegeco s.r.l., Modena.

RIVA A. (1941) - *Gli anfiteatri morenici a Sud del Lario e le pianure diluviali tra Adda e Olona.* Boll. Soc. Geol. It., vol. LX.

RUMBAUGH J., RUMBAUGH D. (1996) - *Groundwater Vistas advanced model design & analysis.* Environmental Simulations Inc.

UNIONCAMERE (1998) - *Annuario statistico regionale 1997.*