



Fondazione Lombardia per l'Ambiente

*Il caso della pianura
dell'Oltrepò Pavese
e del relativo
margine collinare*

Idrogeomorfologia e insediamenti a rischio ambientale

a cura di

Giuseppe Marchetti - Franco Cavanna - Pier Luigi Vercesi



RICERCHE & RISULTATI

Valorizzazione dei progetti di ricerca 1994/97

Giuseppe Marchetti è docente di Geomorfologia e di Geologia Ambientale presso la Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell'Università di Pavia. È autore o coautore di oltre cento pubblicazioni, in gran parte rivolte alle problematiche ambientali, rientranti nel campo dell'idrogeologia (tutela e uso delle acque), dell'evoluzione dei versanti, dei dissesti idrogeologici, delle attività estrattive e dello smaltimento dei rifiuti. Ha svolto un'intensa attività nel campo della programmazione urbanistico-territoriale. Significativi sono anche i suoi studi e le sue ricerche nel campo archeologico, basati sui rapporti intercorrenti fra la geomorfologia e il popolamento antico.

Ha fatto parte ed è tuttora membro di numerosi comitati tecnico-scientifici operanti a livello nazionale, regionale e provinciale. È stato recentemente nominato dal Ministero dei Beni Culturali e Ambientali, quale suo esperto, nel comitato tecnico-scientifico dell'Autorità di Bacino del Fiume Po.

Franco Cavanna, geologo, è Dottore in Ricerca in Scienze della Terra, nel settore applicativo, con specializzazione in idrogeologia. Ha svolto e svolge ricerche in campo geologico e geologico-applicativo presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pavia, ove ha anche tenuto seminari. Tra le attività svolte rientra la sua partecipazione alla predisposizione del "Piano per la tutela e l'uso delle risorse idriche destinate al consumo umano" per conto dell'USSL n. 3 della Regione Emilia-Romagna, nell'ambito della Convenzione stipulata fra detto Ente e l'Università di Pavia. È autore di varie pubblicazioni di carattere geologico e idrogeologico.

Pier Luigi Vercesi è docente di Sedimentologia e Geologia presso la Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell'Università di Pavia. È autore di numerose pubblicazioni sia di carattere stratigrafico-sedimentologico e geologico-strutturale sia inerenti a problematiche ambientali e applicative.

È stato ed è coordinatore di vari progetti di ricerca geologica di base concernenti programmi di interesse locale e nazionale. È responsabile di convenzioni con Enti pubblici e privati, soprattutto nel settore ambientale.

Ha svolto e svolge seminari e corsi di aggiornamento professionale per tecnici e docenti nel campo della geologia ambientale e della pianificazione territoriale.

Idrogeomorfologia e insediamenti a rischio ambientale

**Il caso della pianura
dell'Oltrepò Pavese
e del relativo margine collinare**

a cura di

**Franco Cavanna
Giuseppe Marchetti
Pier Luigi Vercesi**

Fondazione Lombardia per l'Ambiente

Foro Bonaparte 12 - 20121 Milano

tel. +39(2)809169

fax +39(2)72002398

flanet@flanet.org

http: //www.flanet.org

Consiglio di Amministrazione

Presidente: Giovanni Bottari

Vicepresidente: Achille Cutrera

Consiglieri: Giordano Cassetta, Massimo Donati, Salvatore Giannella,
Paolo Mantegazza, Emilio Massa, Roberto Schmid

Comitato scientifico

Silvio Garattini, Angelo Cavallin, Renzo Compiani, Emilio Gerelli,
Giorgio Guariso, Alfredo Liberatori, Gianfranco Mascazzini, Paola Vita Finzi

Coordinatore Scientifico: Antonio Ballarin Denti

Programma editoriale ideato e curato da: Salvatore Giannella

Coordinamento editoriale: Rosa Maria Panattoni

Revisione: Diana Borio

Progettazione e fotocomposizione: Studio Tabloid, Milano

Stampa: Arti Grafiche by Juri Iodice, Sannazzaro (PV)

© 1998 Copyright Fondazione Lombardia per l'Ambiente

Proprietà letteraria riservata

Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta o utilizzata sotto nessuna forma, senza permesso scritto, tranne che per brevi passaggi in sede di recensione e comunque citando la fonte.

Indice

Premessa e finalità	pag. 9
---------------------	--------

Capitolo 1

Metodologia di studio	11
1.1 Criteri adottati: aspetti e considerazioni generali	12
1.2 Modalità di espletamento del lavoro	13

Capitolo 2

Inquadramento territoriale	15
Premessa	16
2.1 Aspetti geologici e litologico-strutturali	16
2.1.1 Zone collinari	16
2.1.2 Zone di pianura	17

Capitolo 3

Aspetti geomorfologici e idrografici	21
Premessa	22
3.1 Zone di pianura	22
3.2 Zone collinari	24

Capitolo 4

Caratteristiche idrogeologiche delle attività affioranti in superficie	27
Premessa	28
4.1. Le unità idrogeologiche della pianura	28
4.1.1 Depositi alluvionali recenti e attuali a permeabilità superficiale primaria medio alta	28
4.1.2 Depositi alluvionali del ripiano principale della pianura a sud del Po a permeabilità superficiale primaria generalmente medio-bassa	28
4.1.3 Depositi alluvionali prewürmiani a permeabilità primaria media, sia pure variabile da zona a zona	29
4.2. Le unità idrogeologiche della collina	29
4.2.1 Depositi marini prequaternari a permeabilità nulla o molto bassa per fessurazione e/o porosità	29
4.2.2 Depositi marini prequaternari a giacitura caotica e a bassa permeabilità primaria	30

4.2.3 Depositi marini prequaternari a permeabilità primaria media possibile permeabilità secondaria, per fessurazione	30
4.2.4 Depositi flisciodi relativamente permeabili per fessurazione	30
4.3 Fenomeni di mineralizzazione delle acque	31

Capitolo 5

Assetto litostratigrafico e struttura idrogeologica delle zone di pianura

Premessa	34
5.1 Substrato degli acquiferi contenuti nella coltre alluvionale	34
5.2 Caratteristiche degli acquiferi contenuti nella coltre alluvionale	35
5.2.1 Settore di monte	36
5.2.2 Settore di valle	36

Capitolo 6

Condizioni di vulnerabilità del primo acquifero

Premessa	40
6.1 Grado di protezione del primo acquifero in funzione della presenza di coperture a bassa permeabilità	41
6.2 Grado di protezione del primo acquifero in funzione delle condizioni di soggiacenza	42
6.2.1 Gli influssi degli attingimenti idrici	43
6.2.2 Risorgive ed emergenze naturali della falda	43
6.2.3 Falde sospese	43
6.2.4 Variazioni temporali della soggiacenza	43
<i>Influenza dei fattori climatici sui livelli di falda</i>	44
<i>Influenza del regime idrometrico del fiume Po sui livelli di falda</i>	45

Capitolo 7

Zonazione del territorio in funzione della sua vulnerabilità all'inquinamento

Premessa	52
7.1 Classe 1: aree a grado di idoneità bassissimo o nullo	53
7.2 Classe 2: aree a grado di idoneità basso	53
7.3 Classe 3: aree a grado di idoneità medio	53
7.4 Classe 4: aree a grado di idoneità elevato	54
7.5 Classe 5: aree a grado di idoneità molto elevato	54
7.6 Valutazioni sul metodo adottato e suo raffronto con il metodo DRASTIC	54

Lavori citati	59
----------------------	-----------

Altri lavori consultati	60
--------------------------------	-----------

Presentazione

Questo volume si inserisce nella nuova collana di pubblicazioni della Fondazione Lombardia per l'Ambiente, denominata "Ricerche & Risultati", Valorizzazione dei progetti di ricerca 1994/97.

In particolare, questa costituisce la quarta pubblicazione nell'ambito delle azioni di valorizzazione dei risultati del Progetto di ricerca "Gestione del territorio e smaltimento dei rifiuti tossici e nocivi", del quale era Coordinatore Scientifico uno degli autori, il prof. Giuseppe Marchetti dell'Università degli Studi di Pavia.

Le tre pubblicazioni precedenti hanno per oggetto, rispettivamente, i "Criteri per la valutazione della qualità dei suoli", la "Individuazione, caratterizzazione e campionamento di ammassi abusivi di rifiuti pericolosi" e i "Criteri per la realizzazione di impianti di stoccaggio definitivo di rifiuti pericolosi".

In questa pubblicazione sono presentati i risultati delle ricerche condotte dagli autori, nell'ambito del Progetto, per la definizione di nuovi criteri di individuazione di siti ambientalmente idonei per la realizzazione di impianti di stoccaggio provvisorio o definitivo di rifiuti pericolosi. Il territorio nel quale sono state specificamente condotte le indagini è quello dell'Oltrepò Pavese e del relativo margine collinare. In realtà, essendo trascorso più di un anno dalla fine delle attività di

ricerca, gli autori hanno aggiornato i risultati precedenti e hanno ampliato il campo di attenzione a tipologie di impianti pericolosi diversi da quelli di stoccaggio definitivo.

Il volume offre un quadro generale delle situazioni che caratterizzano il territorio oggetto dello studio. Dopo una discussione delle metodologie di studio, il territorio è descritto nei suoi aspetti geologici e litologico-strutturali, geomorfologici e idrografici.

Sono quindi riportate le caratteristiche idrogeologiche delle unità affioranti in superficie e l'assetto litostratigrafico e la struttura idrogeologica delle zone di pianura. Date le finalità dello studio, l'analisi delle caratteristiche idrogeologiche delle zone di pianura è stata rivolta, in particolare, alla valutazione del rischio di inquinamento delle acque sotterranee. L'insieme degli studi ha consentito l'elaborazione di una cartografia di sintesi, che permette l'effettuazione di una prima valutazione di compatibilità ambientale di ipotesi di realizzazione di impianti o insediamenti.

Il volume fornisce quindi, alle Amministrazioni e agli Enti cui sono demandati gli atti autorizzati e l'esercizio del controllo, uno strumento qualificato dal punto di vista scientifico e aggiornato dal punto di vista tecnico, utilizzabile come base di partenza per le decisioni da assumere ai fini della tutela del territorio.

Premessa e finalità

Tra i temi oggi affrontati nel campo della tutela ambientale rientra con prioritario interesse quello relativo ai pericoli di inquinamento delle acque, ivi comprese, in particolare, quelle sotterranee. Non a caso, è ormai generalizzato il tentativo di affrontare, da parte delle pubbliche amministrazioni, i problemi relativi alla "vulnerabilità degli "acquiferi". Nei confronti degli insediamenti di riconosciuto rischio ambientale è peraltro necessario valutare, accanto a questo aspetto, anche ulteriori rischi legati ad altri parametri geologici (dissesti idrogeologici, inondabilità reale o potenziale ecc.).

I contenuti di questa pubblicazione sono appunto legati all'insieme di questi aspetti, che costituiscono peraltro gli indispensabili elementi di base nel campo della valutazione di compatibilità ambientale.

L'indagine, di cui nello scritto, è stata condotta in occasione dello studio di carattere generale ("Gestione del territorio e smaltimento dei rifiuti tossici e nocivi") effettuato nell'ambito di un'apposita Convenzione stipulata nel gennaio 1994 tra l'Università degli Studi di Pavia (Dipartimento di Scienze della Terra) e la Fondazione Lombardia per l'Ambiente di Milano.

Tra le finalità dello studio generale, alla cui esecuzione hanno partecipato dieci dipartimenti

dell'Università di Pavia, uno del Politecnico di Milano, uno dell'Università di Milano e l'Istituto per l'Ambiente di Milano, rientrava anche quella della "Individuazione, bonifica e/o messa in sicurezza e recupero territoriale delle discariche e degli ammassi abusivi, o comunque non regolamentati, di sostanze tossiche e nocive".

La parte oggetto di questo lavoro è stata tratta, in particolare, dai capitoli dedicati alla definizione dei "Nuovi criteri di individuazione di siti ambientalmente idonei alla realizzazione di impianti di stoccaggio provvisorio o definitivo di rifiuti tossici e nocivi".

Per le ragioni prima illustrate, nello scritto si è comunque giudicato opportuno allargare il campo d'attenzione, oltre che alle discariche, anche agli impianti comunque pericolosi dal punto di vista ambientale, fornendo un quadro generale delle situazioni che in tal senso caratterizzano il territorio preso in esame (Oltrepò Pavese e relativo margine collinare), al fine di proporre un utile e sostanziale supporto alle Amministrazioni e agli Enti, cui sono demandate le decisioni in merito ai controlli e alle eventuali autorizzazioni da rilasciare relativamente a questi tipi di insediamenti e, più in generale, alle iniziative da assumere nel campo della tutela ambientale del territorio.

Capitolo 1

Metodologia di studio

1.1 Criteri adottati: aspetti e considerazioni generali

Primario obiettivo dello studio è stato quello di sperimentare l'applicazione delle componenti geologiche di maggior significato ai fini delle valutazioni di compatibilità ambientale di un determinato territorio, assumendo come area campione la pianura dell'Oltrepò Pavese, comprensiva dell'adiacente zona collinare, quest'ultima estesa verso sud fino alla congiungente Godiasco-Borgo Priolo-Pometo.

Tra dette componenti, particolare attenzione è stata rivolta a quelle litologica, strutturale, morfologica, idrologica e idrogeologica.

Il grado di vulnerabilità ambientale dell'ambito esaminato è stato posto infatti soprattutto in relazione al pericolo d'inquinamento delle acque superficiali e di quelle sotterranee, unitamente alle situazioni connesse ai cosiddetti dissesti idrogeologici, che si traducono, in pratica, nel rischio idraulico (rischio di inondazione), nell'instabilità reale o potenziale dei versanti (fenomeni franosi) e, almeno in parte, nei fenomeni di erosione lineare o diffusa (aree collinari).

In merito ai criteri di ordine litologico, il primo obiettivo è stato quello di individuare le aree caratterizzate da una litologia superficiale a basso grado di permeabilità e con spessore tale da garantire, già di per sé, una favorevole tutela delle eventuali acque presenti nel sottosuolo.

Sotto questo profilo, condizioni litologiche localmente favorevoli sono state riscontrate sia nel settore di pianura che in quello collinare.

Nelle zone di pianura è stato infatti possibile evidenziare la presenza di coltri di copertura superficiali, costituite da sedimenti argillo-limosi che, per la loro ridotta permeabilità, assicurano, soprattutto laddove il loro spessore è relativamente elevato, un buon grado di protezione nei confronti dei pericoli di infiltrazione di inquinanti.

La litozona pelitica superficiale che si sviluppa a sud del fiume Po, pressoché continua su tutto il ripiano alluvionale costituente il "livello fondamentale della pianura", presenta peraltro spes-

sori assai variabili, che consentono di individuare aree a diverso grado di protezione.

Anche nelle zone collinari sono frequentemente presenti formazioni a dominante argillosa o marnoso-argillosa, con caratteristiche di permeabilità, sia primaria che secondaria, estremamente ridotte e con spessori che, in alcune zone, possono raggiungere le centinaia di metri, questa condizione già di per sé può escludere la presenza nel sottosuolo di falde idriche significative.

Nel caso della realizzazione di locali stoccaggi temporanei e/o discariche controllate di rifiuti, la presenza di materiali argillosi garantisce altresì la reperibilità in loco di materiale idoneo, per qualità e quantità, alla quotidiana copertura dei rifiuti, quando richiesta, e, soprattutto, alla sigillatura finale dell'area; questi stessi materiali, in relazione alle loro caratteristiche mineralogiche, possono anche consentire processi di adsorbimento dei contaminanti presenti nei liquami originati dai rifiuti stessi (percolati).

Nell'ambito collinare, l'analisi delle condizioni litologiche è stata accompagnata da un esame dell'assetto strutturale degli ammassi rocciosi, con particolare riferimento alla presenza di **faglie** (fratture con reciproco spostamento delle parti), soprattutto, di quelle denunciante testimonianze di movimenti relativamente recenti.

È noto infatti che queste ultime possono esercitare un ruolo attivo sulle condizioni di stabilità delle aree di loro pertinenza oltre che generare, a cavallo delle linee di loro affioramento, fratturazioni più o meno intense, in grado di incrementare sostanzialmente le condizioni di permeabilità dei terreni da esse interessate.

L'importanza degli aspetti morfologici può assumere valore fondamentale sia nelle aree di pianura che in quelle collinari, in quanto da essi può dipendere la predisposizione naturale di un sito all'accoglimento di un eventuale impianto ambientalmente pericoloso (possibilità di drenaggio e regimazione delle acque, grado di impatto visivo nei confronti del paesaggio circostante, modalità di inserimento e di recupero ambientale ecc.).

La morfologia locale può condizionare, in

particolare, anche la possibilità di isolamento naturale dalle interferenze, reali o potenziali, con le acque superficiali e, in parte, con quelle sotterranee.

Sempre a questo proposito, sono state attentamente valutate le aree a media e/o elevata acclività che possono essere soggette a fenomeni di dissesto (intensi processi erosivi, versanti suscettibili o già interessati nel passato da movimenti gravitativi ecc.).

Nel settore di pianura, gli aspetti morfologici presi in considerazione sono stati soprattutto riferiti alla presenza di elementi fisiografici in grado di influenzare le condizioni di drenaggio delle acque meteoriche (per esempio aree depresse, caratterizzate da deflusso difficoltoso; aree debolmente convesse coincidenti con zone idrograficamente centrifughe ecc.).

Nei riguardi del fattore idrologico sono state individuate le possibili interferenze tra i siti studiati e le acque superficiali, in relazione ai rischi connessi con i processi di dinamica fluviale attivi o potenziali (zone interessate da fenomeni erosivi o deposizionali, aree inondabili).

Il pericolo di esondazioni a seguito di piene straordinarie è stato preso in considerazione per quel che attiene sia alla possibilità di straripamenti dei corsi d'acqua non arginati, sia all'eventualità di rottura delle difese idrauliche esistenti (arginature) e/o di sormonta delle stesse.

Dal punto di vista idrogeologico, si è fatto riferimento alle condizioni di protezione naturale o intrinseca dei siti nei confronti di fenomeni di inquinamento delle acque sotterranee (cfr. anche fattore litologico). Sotto questo profilo sono stati pertanto presi in considerazione gli aspetti che rivestono un ruolo preponderante nella definizione della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento, con particolare riguardo ai seguenti:

- posizione della superficie piezometrica rispetto a quella topografica (**soggiacenza**), nelle condizioni di massimo innalzamento della falda;
- presenza o meno, alla sommità dell'acquifero, di coltri di copertura a dominante limoso-argillosa in grado di costituire una barriera fisica alla diffusione degli inquinanti.

Sono stati, in pratica, esaminati i fattori che definiscono l'entità del franco di protezione esistente tra il piano sul quale potrebbero insistere gli impianti e la superficie della falda idrica a esso direttamente sottostante anche in relazione alle possibili escursioni stagionali e/o eccezionali della falda stessa.

1.2 Modalità di espletamento del lavoro

La ricerca si è articolata nelle seguenti fasi operative:

- acquisizione degli elementi geologici di superficie segnalati in bibliografia e loro revisione con controlli areali e puntuali;
- distinzione delle unità idrogeologiche presenti con specifico riferimento al loro complessivo grado di permeabilità;
- analisi geomorfologica desunta sia da fotointerpretazione che da specifici rilevamenti di campagna;
- esame del reticolato idrografico principale e secondario e dei fenomeni a esso connessi (deviazioni e/o digressioni, esondazioni, sovralluvionamenti ecc.), visti anche e soprattutto in relazione al rischio di esondazioni;
- acquisizione di un elevato numero di dati litostratigrafici e piezometrici con elaborazione degli stessi articolata secondo i seguenti punti:
 - ricostruzione di sezioni litostratigrafiche finalizzate alla definizione della struttura idrogeologica dell'area (distribuzione degli acquiferi presenti nel sottosuolo alluvionale, con particolare riferimento alla prima falda arealmente continua; rapporti tra acque superficiali e acque sotterranee; modalità di ricarica degli acquiferi; andamento del substrato del sistema acquifero ecc.);
 - elaborazione di carte a curve isopache relative alla copertura impermeabile o semipermeabile del primo acquifero;
 - elaborazione di carte a curve isolinee relative alla soggiacenza della prima falda sulla base dei valori di massimo innalzamento piezometrico verificatisi negli ultimi 15 anni circa.

L'analisi comparata di tutti gli elementi raccolti ha permesso di formulare un quadro coerente circa le condizioni sussistenti nel territorio esaminato consentendo, in definitiva, di valutare il grado di idoneità naturale del territorio ad accogliere insediamenti a rischio ambientale.

I risultati della ricerca svolta sono espressi graficamente nelle seguenti carte tematiche (allegate fuori testo):

Tav. 1 - Carta delle unità idrogeologiche con indicazioni litologico-strutturali (scala 1:100.000)

Tav. 2 - Carta degli elementi geomorfologici (scala 1:100.000)

Tav. 3 - Carta della copertura del primo acquifero (scala 1:100.000)

Tav. 4 - Carta delle soggiacenze della prima falda (scala 1:100.000)

Tav. 5 - Sezioni idrogeologiche e litostratigrafiche (scale: l = 1:100.000, h = 1: 4.000)

Tav. 6 - Carta di sintesi (scala 1:100.000)

È stata inoltre predisposta un'ulteriore carta (Carta della vulnerabilità idrogeologica) elaborata secondo il metodo DRASTIC e inserita direttamente nel testo (*Figura 9*).

Capitolo 2

Inquadramento territoriale

Premessa

L'area di studio corrisponde, come anticipato, alla pianura dell'Oltrepò Pavese e all'adiacente margine collinare.

Geograficamente, i limiti della zona esaminata sono definiti: a nord dal corso del fiume Po, a est e a ovest dalle rispettive delimitazioni del territorio provinciale, a sud dalla congiungente Godiasco-Borgo Priolo-Pometo.

Questo territorio presenta un'estensione di circa 700 Km², con quote minime di 55 m s.l.m. in prossimità dell'alveo del fiume Po e massime di 550 m s.l.m., in corrispondenza delle colline altimetricamente più elevate.

La porzione di pianura risulta fortemente antropizzata, in particolare nella fascia pedecollinare dove si collocano i maggiori centri abitati (Voghera, Casteggio, Broni, Stradella).

La scelta dell'ambito di studio è stata condizionata anche dal fatto che esso è già stato oggetto di collocazione di diversi impianti di smaltimento di rifiuti solidi urbani e di rifiuti speciali

e che è tuttora individuato per la creazione di altri impianti del genere.

Va a ciò aggiunto che questo territorio può considerarsi un caso esemplificativo delle situazioni che caratterizzano la pianura che si sviluppa al margine dell'Appennino nord-occidentale; lo stesso vale anche per le adiacenti zone collinari (pedemonte), nelle cui vicinanze sono collocati, come già precisato, numerosi e importanti centri abitati, nonché nevralgiche vie di comunicazione. Vale la pena sottolineare che la pianura dell'Oltrepò Pavese presenta frequentemente litologie superficiali argillo-limose, interessate sia in passato che attualmente da un'intensa attività estrattiva (per produzione di laterizi). Alcune delle numerosissime fosse di cava esistenti (oltre 700) sono state utilizzate in passato sia per la realizzazione di discariche controllate (cfr. impianti di Casatisma, Verretto, Cervesina), che per lo stoccaggio abusivo di rifiuti di varia natura (cfr. siti contaminati nelle località di Redavalle, Bressana Bottarone, Lungavilla, Pizzale ecc.).

2.1 Aspetti geologici e litologico-strutturali

Le caratteristiche litologiche e strutturali dell'area esaminata sono schematicamente illustrate nella Tavola 1; in questo elaborato, oltre agli elementi tettonici significativi, sono individuate le principali unità idrogeologiche, definite sulla base delle caratteristiche di permeabilità connesse alla natura delle formazioni geologiche affioranti.

2.1.1 Zone collinari

Il settore collinare, corrispondente all'estrema propaggine settentrionale del margine appenninico pavese-piacentino, presenta caratteristiche geologiche molto differenziate, sia per la varietà litologica, che per la complessità delle situazioni strutturali.

Esso risulta impostato nella successione miopliocenica denominata nella letteratura geologica "Serie del margine" (Marne di Monte Lummello, Arenarie di Serravalle, Marne di Sant'Agata Fossili, Formazione gessoso-solfifera, Conglomerati di Cassano Spinola, Argille di Lugagnano e Sabbie di Asti); su tale serie è tettonicamente sovrascorsa la Formazione di Val Lurette dell'Eocene medio-Paleocene.

La successione in questione coincide con il margine nord-occidentale dell'arco delle pieghe emiliane che, circa a partire dalla zona su cui insiste l'abitato di Volpedo, si sviluppa, sepolto sotto i depositi alluvionali, verso il centro della pianura padana fino ai rilievi del Colle di San Colombano, per ruotare successivamente, dapprima verso est sud-est e poi verso sud-est.

La disposizione della "Serie del margine" appare differenziata nei settori a est e a ovest del

tracciato del torrente Rile Verzate. A occidente di quest'ultimo predomina, nella serie miopliocenica, una struttura pressoché monoclinale immergente verso la pianura. Le successioni marine, lungo l'allineamento Casteggio-Broni, si abbassano bruscamente al di sotto delle alluvioni quaternarie.

Il settore orientale dell'area esaminata, viceversa, si caratterizza per la presenza dell'alto strutturale individuato dall'allineamento "Sperone di Stradella" - Colle di San Colombano, che costituisce una marcata protuberanza dell'arco strutturale appenninico affiorante nelle due località citate. Questa struttura risulta variamente interessata nella zona collinare da sistemi di faglie, disposte circa nord-sud (faglia di Torricella Verzate, del torrente Scuropasso, del torrente Versa ecc. - Pellegrini e Vercesi, 1996).

Nella zona di pianura, le strutture presenti, per lo più sepolte al di sotto di un esiguo materasso alluvionale, portano le successioni marine ad affiorare localmente lungo le scarpate di erosione recente che delimitano, in destra idrografica, la zona golenale del fiume Po nel tratto compreso tra San Cipriano e Arena Po. Nella zona di Portalbera, in particolare, sono evidenti alla mesoscala strutture plicative impostate nelle successioni marnoso-calcaree e calcarenitiche cariate, con livelli gessoarenitici e, talora, con plaghe di zolfo, di età miocenica superiore.

La disposizione strutturale delle successioni mio-plioceniche nella zona dello "Sperone di Stradella" si caratterizza per la presenza di una serie di strutture assimilabili a pieghe (Scagni e Vercesi, 1987), con assi orientati all'incirca EW, che interessano in particolare le Marne di Sant'Agata Fossili e le Arenarie di M. Arzolo. Tali strutture sono definibili esclusivamente sulla base dell'assetto giaciturale.

L'intero ambito pedeappenninico studiato è inoltre interessato da dislocazioni fragili variamente orientate, già descritte da Scagni e Vercesi (1987) e da Pellegrini e Vercesi (1996) e in parte cartografate nei fogli della Carta Geologica d'Italia (F. 59 Pavia e F. 71 Voghera). Si tratta di strutture difficilmente riconoscibili sul terreno sia per la presenza di estese coperture sia in conseguenza della natura litologica dei terreni

presenti (pseudocoerenti o semicoerenti), che tende a mascherare le evidenze morfologiche delle dislocazioni. La presenza di deformazioni fragili è tuttavia deducibile dalla disposizione delle successioni presenti, i cui termini presentano sovente brusche giustapposizioni. Evidenze di questo genere interessano di frequente i principali solchi vallivi, presumibilmente impostati in corrispondenza delle zone più tettonizzate (valli selettive).

Al margine settentrionale della zona collinare, nel tratto compreso tra l'abitato di Santa Giuletta e il torrente Scuropasso, è presente un lineamento caratterizzato da una netta evidenza geomorfologica, marcata da "faccette triangolari" ("faglia marginale", Boni *et al.*, 1981); in corrispondenza di tale dislocazione, i termini della successione del margine, rappresentati in prevalenza dalle Marne di Sant'Agata Fossili di età tortoniana, risultano giustapposti ai depositi alluvionali würmiani e pre-würmiani (Fluviale recente e "Alluvioni" oloceniche indistinte).

I fenomeni neotettonici della zona trovano solo in parte riscontro nell'attività sismica locale, caratterizzata da eventi di intensità e frequenza complessivamente limitate.

La distribuzione degli epicentri dei terremoti registrati in epoca storica, pur non evidenziando netti allineamenti preferenziali, mostra localmente zone di maggiore addensamento (Pellegrini e Vercesi, 1996). Significativa a tal proposito è la zona di Casteggio, dove sono state riconosciute e descritte evidenze neotettoniche (Boni *et al.*, 1981).

2.1.2 Zone di pianura

La zona esaminata corrisponde alla fascia di pianura situata in destra orografica del fiume Po, a sud della confluenza con il fiume Ticino. Essa risulta costituita da una successione di depositi alluvionali quaternari, direttamente poggiante su un substrato formato da sedimenti marini.

Nella maggior parte dell'area occupata dai depositi alluvionali, è presente un sistema di ripiani terrazzati, corrispondenti a unità morfologiche distinguibili, oltre che in funzione dell'età, anche sulla base di criteri altimetrici e pedostratigrafici.

Le unità più elevate sono costituite da depositi prewürmiani, a ossatura ghiaioso-sabbiosa, intensamente alterati al tetto da un processo pedogenetico riconducibile ai suoli antichi-vetusuoli rubefatti - del pedeappennino emiliano. I suoli in questione sono localmente ricoperti da ridotte coltri di loess pedogenizzate, di colore giallo-arancio.

La distribuzione dei depositi alluvionali nel loro complesso è condizionata dalla presenza, nel sottosuolo, di un alto strutturale, posto tra le valli dei torrenti Scuropasso e Versa, connesso al già citato "Sperone di Stradella": è questa la struttura che, come già accennato, rappresenta un elemento di separazione tra il settore occidentale e quello orientale dell'ambito indagato.

A est della zona di fondovalle del torrente Scuropasso, i depositi prewürmiani affiorano con estensioni via via crescenti, dando origine a due unità morfologiche con altimetria ben differenziata, delimitate da scarpate che raggiungono i 20 m di altezza (cfr. Tavola 2); sull'unità più elevata si colloca l'abitato di Bosnasco, su quella più bassa l'area urbana di Stradella. Queste unità sono state cartografate congiuntamente in Tavola 1.

I depositi prewürmiani scompaiono nella zona compresa tra Broni e Santa Giulietta dove, come anticipato, la citata "faglia marginale" pone direttamente in contatto le successioni marine del margine appenninico con i depositi alluvionali del "livello fondamentale della pianura" (würmiani e olocenici). Essi tornano poi ad affiorare estesamente a ovest di Santa Giulietta, fino al limite occidentale dell'area esaminata. In quest'ultimo settore, sono nuovamente riconoscibili le due unità morfologiche citate, che tuttavia risultano delimitate da scarpate di terrazzo evidenti solo localmente, a causa degli intensi processi erosivi e sedimentari (cfr. Tavola 2).

Il ripiano principale della pianura risulta costituito da depositi la cui genesi è connessa in massima parte all'imponente sedimentazione operata dai corsi d'acqua, in concomitanza dell'ultima espansione glaciale (Würm - tardo Pleistocene). Una certa attività deposizionale, caratterizzata per lo più da sedimentazione fine, ha interessato ta-

le unità anche in epoche successive (postwürmiane), originando una coltre di copertura più o meno potente (Boni, 1967).

I depositi della superficie principale della pianura sono delimitati da blande e discontinue forme terrazzate, che li separano da quelli delle unità topograficamente più basse (depositi postglaciali). Le scarpate di erosione fluviale, ben evidenti solo nella zona a est di San Cipriano Po, sono comunque di altezza generalmente ridotta (il salto topografico raggiunge dislivelli massimi di 2-3 m); nelle zone in cui esse vengono a mancare, la distinzione delle due unità su base morfologica risulta difficile; non essendo possibile una separazione delle stesse neppure su basi pedostratigrafiche, in questi casi è stato assunto come limite il margine esterno delle tracce dei paleoalvei del fiume Po (cfr. capitolo successivo).

Nell'assetto strutturale del sottosuolo dell'area di pianura, evidenziato dalle sezioni di Pieri e Groppi (1981), oltre che nella cartografia geologica ufficiale (F. 59 Pavia e relative note illustrative), rivestono notevole importanza le strutture tettoniche sepolte.

Di particolare rilevanza risulta la zona di Casteggio, ove sono state evidenziate (Arca e Beretta, 1985) curve di ugual sollevamento (isocinetiche positive) con valori di 0,5 mm/anno. In questo settore sono presenti (cfr. Tavola 1) due faglie inverse sepolte, una passante poco a nord di Casteggio ("Faglia vogherese" della Carta Geologica d'Italia) e l'altra situata più a sud, con andamento subparallelo al margine appenninico ("Faglia inversa di Retorbido"). Entrambe immergono verso la collina e ribassano le zolle settentrionali. Nel settore compreso fra tali dislocazioni è stata riconosciuta una struttura anticlinale ("Anticlinale di Casteggio").

A est e a ovest dell'area citata, questa disposizione strutturale perde progressivamente evidenza e le successioni, pur dislocate, tendono ad assumere una giacitura di tipo monoclinale immergente, rispettivamente, verso nord-est e nord-ovest (Pellegrini e Vercesi, 1996).

Notevole influenza sull'andamento del substrato marino che sopporta le successioni alluvionali, è comunque esercitata dalla fa-

glia inversa più settentrionale, presumibilmente coincidente con il margine tettonico dell'arco emiliano, la cui terminazione occidentale si colloca in prossimità del fondovalle del torrente Staffora. Tale dislocazione cau-

sa una brusca inflessione del substrato dei depositi quaternari, cui corrisponde un forte ispessimento degli stessi, come già segnalato sulla base di dati stratigrafici e geofisici da Braga e Cerro, 1988.

Capitolo 3

**Aspetti
geomorfologici
e idrografici**

Premessa

L'analisi idrogeomorfologica è stata effettuata sulla base di un dettagliato esame fotointerpretativo dell'area, integrato dall'analisi della cartografia esistente e da rilevamenti di campagna.

Nella Tavola 2 sono visualizzati i principali aspetti geomorfologici e idrografici dell'ambito esaminato, con particolare riguardo a quelli che maggiormente influenzano la propensione al dissesto del territorio.

3.1 Zone di pianura

Nell'ambito di pianura sono state analizzate tutte le forme connesse ai processi di dinamica fluviale, evidenziando soprattutto gli aspetti idrografici che condizionano il rischio di inondazione. L'elemento idrografico principale è rappresentato dal fiume Po, il cui andamento risulta leggermente meandreggiate nella zona a occidente della confluenza del fiume Ticino, con direzione di scorrimento SW-NE, e con andamento meno sinuoso verso SSE, a est della stessa.

La tendenza del tracciato ad assumere un percorso sinuoso-rettilineo nella zona orientale è presumibilmente riconducibile a interventi antropici: durante il secolo XIV nel tratto di alveo tra Portalbera e Parpanese, vennero infatti realizzati, a opera dei Visconti (Dutto et al., 1989), alcuni tagli artificiali che hanno conferito al corso del fiume una elevata stabilità. L'andamento artificiale si è mantenuto nel tempo, evidenziando con buona probabilità anche una tendenza al sollevamento di questo settore di pianura in epoca recente. Nel tratto a monte della confluenza con il fiume Ticino, invece, la tendenza all'erosione laterale del Po ha reso necessario il reiterato ricorso a interventi di protezione fino a epoche recenti (Pellegrini e Vercesi, 1996).

In questa zona, le numerose tracce di paleomeandri del fiume, di cui sono stati riportati in Tavola 2 le più evidenti, testimoniano una marcata tendenza alla divagazione in età olocenica.

Le zone interessate dai paleoalvei del Po corrispondono in genere ad aree depresse, che possono presentare difficoltose condizioni di drenaggio delle acque meteoriche.

Secondo Dutto et al. (1989), l'intensità dei processi erosivi lungo le sponde del Po sembra

presentare una buona correlabilità con il numero di giorni di piena del fiume nei tratti meandriformi e con la velocità di decrescita delle altezze di piena nei tratti di alveo subrettilinei. In questi tratti, caratterizzati da una minor intensità degli sforzi di taglio dovuti alla corrente, viene presumibilmente ad assumere un ruolo rilevante la pressione interstiziale esercitata dalla falda sui terreni alluvionali che costituiscono le sponde.

Dallo studio degli effetti dell'attività erosiva si evidenzia una tendenza alla diminuzione di intensità del processo nel periodo recente, in concomitanza con la sensibile riduzione del numero di giorni di piena.

Sempre in Tavola 2 sono state riportate le principali opere di difesa presenti lungo il corso del Po nel territorio esaminato; si tratta di arginature e di opere di tipo radente che interessano le sponde dell'attuale alveo attivo sia nel tratto a monte che in quello a valle della confluenza con il fiume Ticino; difese idrauliche di minore entità sono presenti anche nella zona golenale del fiume.

Nei riguardi dell'idrografia minore, l'analisi dell'andamento planimetrico dei corsi d'acqua evidenzia direzioni di scorrimento delle acque differenziate tra i settori a est e a ovest dello "Sperone di Stradella", che funge da spartiacque; nel primo, il senso di deflusso predominante risulta verso nord-est, nel secondo verso nord ovest (Pellegrini e Vercesi, 1996); questa tendenza, evidente nel settore pedecollinare, è in parte mascherata, nelle zone di pianura, da numerose deviazioni verso nord, spesso dovute a interventi antropici.

I processi sedimentari operati dai principali corpi idrici presenti nella zona di pianura a ovest dello sperone di Stradella hanno inoltre originato evidenti fasce fluviali pensili, areal-

mente più o meno estese (cfr. ricostruzione delle curve di livello con equidistanza di 5 metri riportata in Tavola 2), che hanno richiesto interventi di regimazione idraulica (arginature).

L'attività deposizionale dei corsi d'acqua compresi fra il torrente Staffora e il torrente Scuropasso è quantificabile anche sulla base della profondità a cui sono stati ritrovati reperti archeologici. Tropeano e Olive (1993) segnalano, specificamente per questa zona, un tasso di sedimentazione pari a 1,7 mm/anno.

Le forme positive connesse alla sedimentazione recente tendono a scomparire nelle zone a est di Stradella, dove i corsi d'acqua (torrente Versa e rii secondari) tendono invece ad assolversi entro il materasso alluvionale.

L'intera zona esaminata si caratterizza anche per la presenza di una fitta rete di canali di scolo, il cui sviluppo è da ricollegare alla scarsa permeabilità dei terreni affioranti e, conseguentemente, alla necessità di agevolare lo smaltimento delle acque meteoriche, altrimenti facilmente ristagnanti.

I tratti terminali dei corsi d'acqua minori si impostano sovente sui paleomeandri del fiume Po, marcandone il tracciato.

L'andamento del reticolo idrografico evidenzia anche numerosi gomiti di deviazione fluviali probabilmente riconducibili ad azioni neotettoniche; in Tavola 2 sono state riportate le principali tracce di paleoalvei dei torrenti appenninici (Staffora, Coppa, Scuropasso), sottolineate da evidenze morfologiche quali, soprattutto, allineamenti di vecchi dossi fluviali (antichi alvei pensili).

I processi erosivi che interessano i principali torrenti della zona hanno reso necessaria la realizzazione di limitate opere di difesa di sponda (torrente Staffora nel tratto tra Voghera e Oriolo, torrente Coppa nel tratto tra Borgo Priolo e Casteggio) e di alcune difese trasversali (torrente Staffora a valle del ponte della Ferrovia Torino-Piacenza, torrente Scuropasso nella zona di sbocco in pianura).

Per la difesa dal rischio di inondazioni, in sponda destra del Po è presente un'arginatura continua (argine maestro), che si sviluppa nel tratto compreso tra Cornale e le zone poco a ovest di Tornello. Tale arginatura ha consenti-

Anno evento	1	2	3
1801	6,31 (12 nov.)	-	-
1807	(?)	-	-
1812	(?)	-	-
1839	6,6 (18 ott.)	-	-
1846	7 (20 ott.)	-	-
1857	7,84 (22 ott.)	-	-
1868	7,02 (5 ott.)	-	-
1872	5,91 (23 mag.)	-	-
1872	7,01 (22 ott.)	15 (+)	7700 (PV, PC)
1879	6,81 (30 mag.)	-	-
1907	7,56 (27 ott.)	-	-
1917	7,56 (31 mag.)	-	-
1926	7,88 (17 mag.)	6 (++)	5500 (PV, PC)
1951	7,85 (12 nov.)	-	-
1957	5,9 (16 giu.)	-	-

Tabella 1 - Rotte arginali e aree inondate per piena del fiume Po tra il 1801 e il 1957 nelle aree della provincia di Pavia, in destra idrografica, a partire dalla confluenza con il Ticino (da Govi e Turitto, 1993, modificata). Colonna 1: altezze idrometriche al colmo (m sullo zero) registrate all'idrometro del ponte della Becca; colonna 2: numero di rotte alle arginature di Po; rotte e/o tracimazioni in alcuni (+) o diversi (++) punti lungo il tratto rigurgitato di affluenti e/o colatori; colonna 3: aree (in Ha) complessivamente allagate con indicazione dei territori provinciali interessati; (?) dato sconosciuto.

to il contenimento anche dei più recenti episodi di piena (novembre 1994), dimostrando un buon grado di efficienza. Il rischio di esondazione nella zona esterna all'arginatura è pertanto connesso soprattutto a eventuali rotture dell'argine stesso, per fenomeni di crollo o di sifonamento, che possono verificarsi quando la corrente idrica, espandendosi su tutta la zona golenale, giunge a gravare sugli argini maestri, mantenendosi in tale situazione per più giorni. Meno probabile appare viceversa la possibilità di sormonto dell'arginatura.

Come evidenziato dalla tabella di seguito riportata (tratta da Govi e Turitto, 1993), il numero di rotte arginali che hanno interessato il territorio della provincia di Pavia in sponda destra del Po in occasione dei principali eventi di piena degli ultimi due secoli è relativamente ridotto. Significativa è l'assenza di esondazioni anche in occasione della grande piena del 1951.

Al buon grado di protezione della zona arginata si contrappone un elevato rischio di inondazione nel tratto orientale dell'area esaminata, in cui vengono a mancare le difese idrauliche.

La zona interessata da tale pericolo giunge a lambire gli abitati di San Cipriano, Portalbera, San Zenone e Arena Po, come evidenziato dagli allagamenti prodotti dalla piena del novembre 1994.

Da notare che il rischio idraulico attuale risulta sensibilmente influenzato dalla recente tendenza evolutiva dei processi di dinamica fluviale. È da rilevare a tal proposito che, in gran parte del suo percorso, l'alveo del fiume Po ha manifestato, a partire dagli anni Cinquanta, una forte tendenza all'abbassamento del fondo (quantificabile soprattutto attraverso le misure dei livelli idrometrici di magra), con valori che hanno raggiunto i 3 metri circa a Becca. Tale fenomeno, unanimemente ricondotto agli effetti dell'attività estrattiva lungo l'alveo del fiume e dei suoi affluenti, si è tradotto anche in una netta tendenza alla diminuzione del trasporto solido in sospensione e, presumibilmente, di fondo (Cati, 1981).

Analogamente, si è verificata nel periodo recente una tendenza più o meno accentuata alla diminuzione della fascia di pertinenza fluviale (canale di deflusso, isole e banchi sabbioso-ghiaiosi). Nei riguardi dei fenomeni di piena tuttavia, già a partire dal 1900 (prima che si innescassero i processi di inalveamento), si è verificata una tendenza alla rarefazione degli eventi e alla diminuzione della durata delle piene principali, cui si contrappone un relativo aumento delle altezze di piena (Govi e Turitto, 1993). La crescita delle altezze idrometriche massime è presumibilmente da riconnettere all'incremento delle portate liquide dovuto al progressivo sviluppo delle arginature lungo il Po e i suoi affluenti.

Per i principali corsi d'acqua di provenienza appenninica, che solcano il territorio studiato il rischio idraulico risulta generalmente contenuto; come anticipato, i tratti pensili degli alvei torrentizi risultano infatti in larga misura interessati da arginature relativamente continue (si vedano, in *Tavola 2*, le già ricordate opere che interessano longitudinalmente il torrente Curone, il torrente

Staffora, il torrente Luria, il torrente Coppa, il torrente Scuropasso).

Per il torrente Curone, la protezione artificiale viene a mancare nella sola zona di Casei Gerola, dove si sono registrati fenomeni di inondazione anche in anni recenti.

Il torrente Staffora, che presenta arginature discontinue nel tratto tra Voghera e Cervesina ha prodotto limitate esondazioni nella zona di Oriolo; allo stato attuale, il rischio di tali fenomeni risulta tuttavia relativamente ridotto a seguito degli interventi di regimazione (allargamento della sezione d'alveo) di recente realizzazione.

In alcune zone del territorio esaminato sussiste, infine, la possibilità di limitati allagamenti in occasione delle piene del fiume Po, causati dai fenomeni di rigurgito che possono interessare i corsi minori e la rete di canali di scolo.

Questi eventi, che riguardano in particolare le zone topograficamente più depresse a ridosso dell'area golenale del Po, si sono verificati in occasione della piena del novembre 1994 nel settore orientale dell'area esaminata (cfr. zone di Albaredo Arnaboldi e San Cipriano Po).

Nella zona a est dello "Sperone di Stradella", il rischio di esondazione da piene causate dagli affluenti del fiume Po risulta pressoché nullo, in quanto tali corsi d'acqua, come già esposto, risultano per lo più incassati entro la coltre alluvionale.

3.2 Zone collinari

Nell'ambito collinare l'analisi dei processi geomorfologici è stata rivolta soprattutto alla valutazione delle condizioni di stabilità dei pendii, anche e soprattutto tramite l'individuazione delle forme originate da movimenti gravitativi attivi o quiescenti.

Atal proposito, è stata svolta una apposita ricerca bibliografica riguardante gli studi pregressi in materia, sia editi che inediti con particolare riferimento allo studio "Piano per il riassetto dell'Oltrepò Pavese" redatto da Aquater e Snamprogetti nel 1982 per conto dell'Ufficio Speciale per l'Oltrepò della Regione Lombar-

dia e alle ricerche effettuate presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pavia, integrata mediante analisi fotointerpretativa e controlli di campagna.

Sulla base del lavoro condotto, sono state cartografate in Tavola 2 le principali aree soggette a movimenti franosi attivi o potenziali. Le aree delimitate corrispondono sia ai corpi di frana attivi, o comunque facilmente rimobilizzabili, sia alle zone franose relativamente stabilizzate allo stato attuale; ai fini dell'indagine, si tratta in ogni caso di ambiti in cui risulta senz'altro sconsigliabile svolgere attività che potrebbero essere coinvolte da una riattivazione dei processi gravitativi; ciò vale, in particolare, nel caso di aree destinate ad accogliere impianti ambientalmente pericolosi.

La presenza di zone instabili riduce sensibilmente l'estensione delle zone utilizzabili a tali fini, soprattutto nella porzione orientale dell'ambito indagato. I fenomeni di dissesto legati a movimenti franosi presentano infatti una maggior densità lungo i versanti impostati sulla Formazione di Val Luretta, diffusamente interessata da questi eventi sia profondi che superficiali, limitati alla coltre di copertura.

Fenomeni franosi, sia pure di minor intensità, si riscontrano anche nelle altre formazioni caratterizzate da una predominanza della componente pelitica, in genere in situazioni di impregnazione idrica.

Le formazioni a composizione arenaceo-conglomeratica o sabbiosa (Arenarie di Monte Arzolo, Conglomerati di Cassano Spinola, Sabbie di Asti) risultano solo a luoghi interessate da fenomeni di crollo, dovuti, lungo i versanti più acclivi, alle condizioni di fessurazione o allo scarso grado di cementazione delle litologie; detti fenomeni sono esasperati da eventuali sogrottamenti al piede,

per erosione naturale o per sbancamenti artificiali. L'analisi delle cause dell'attuale stato dei dissesti franosi nel territorio oggetto di indagine esula dagli scopi del lavoro; si fa tuttavia rilevare che si tratta di un fenomeno in evoluzione, legato a cause sia antropiche (progressivo abbandono di aree coltivate con conseguente peggioramento delle condizioni di deflusso delle acque meteoriche, riduzione delle zone a copertura boscosa, ecc.), che naturali (presenza di litologie argillose, con scadenti proprietà geomeccaniche, negativamente esasperate se impregnate d'acqua a seguito di abbondanti precipitazioni; pendenza dei versanti; grado di fratturazione delle rocce; eventi meteorici eccezionali; azione delle acque incanalate e di ruscellamento; eventi tellurici, anche se di intensità rilevabile a solo livello strumentale, ecc.).

Nelle zone esaminate, il dinamismo del fenomeno si è accentuato particolarmente nei tre anni compresi tra il 1976/1977 e il 1979/1980, in concomitanza cioè con stagioni particolarmente piovose.

Le condizioni di stabilità dei pendii costituiscono senza dubbio la principale limitazione esistente nelle aree di collina ai fini dello svolgimento di attività antropiche anche a livello generale.

Tra gli altri fenomeni, che potrebbero influenzare parzialmente le possibilità d'uso del territorio, si segnala anche la presenza di scarpate morfologiche prodotte dall'azione delle acque incanalate o da processi di degradazione meteorica sulle unità litologiche più predisposte a questi fenomeni; alcune di esse, non stabilizzate dalla vegetazione, presentano un certo grado di attività (si vedano in particolare quelle impostate nei Conglomerati di Cassano Spinola e sulle Arenarie di Monte Arzolo).

Capitolo 4

**Caratteristiche
idrologiche
delle unità
affioranti
in superficie**

Premessa

In considerazione delle finalità della ricerca, sono state analizzate le caratteristiche idrogeologiche sia della porzione superficiale della coltre alluvionale presente nella pianura sia delle formazioni geologiche affioranti nella zona collinare.

In relazione al comportamento ai fini della infiltrazione e della circolazione idrica sotterranea, i depositi alluvionali della pianura e le successioni litologiche del margine dell'Appennino sono stati complessivamente di-

stinti in 7 unità idrogeologiche, visualizzate in *Tavola 1*. L'individuazione di queste unità è stata effettuata soprattutto in riferimento alle loro caratteristiche di permeabilità e alla presenza o meno, al loro interno, di falde acquifere significative.

Per le formazioni collinari con caratteristiche litologiche più eterogenee (Arenarie di Ranzano, Formazione di Val Luretta ecc.) si è ritenuto opportuno distinguere i litosomi a comportamento diverso.

4.1 Le unità idrogeologiche della pianura

Nel territorio di pianura, i sedimenti alluvionali quaternari originati dall'attività deposizionale dei torrenti appenninici (conoidi coalescenti) e del fiume Po sono stati distinti, sulla base della composizione litologica delle porzioni più superficiali delle loro successioni verticali, in tre unità principali.

4.1.1 Depositi alluvionali recenti e attuali a permeabilità superficiale primaria medio alta

Si sviluppano a ridosso dell'asta fluviale del fiume Po, lungo una fascia continua che raggiunge estensione massima nella zona compresa tra Bastida Pancarana e Albaredo Arnaboldi, riducendosi progressivamente a est di quest'ultima località, fino a scomparire poco a est di Arena Po. Questa unità idrogeologica si identifica con la più recente coltre di deposizione del fiume Po, di età postwürmiana (geomorfologicamente corrisponde alla "Fascia di meandreggiamento recente" del fiume); ai depositi facenti capo a essa sono state associate anche le alluvioni recenti e attuali dei principali torrenti di provenienza appenninica. Questi depositi alluvionali, a causa della loro ridotta estensione areale, non sempre sono stati evidenziati in *Tavola 1*.

Litologicamente, l'unità risulta costituita da sabbie, limi sabbiosi e limi nella fascia di pertinenza del fiume Po e da ghiaie e sabbie

lungo gli alvei dei torrenti appenninici. Essa presenta un grado di permeabilità primaria generalmente medio-alto in relazione alla predominanza di litologie dotate di discreta porosità e ospita generalmente una falda acquifera di tipo freatico, la cui superficie si colloca a ridotte profondità dal piano campagna, risultando in diretta connessione con il livello idrometrico del Po.

4.1.2 Depositi alluvionali del ripiano principale della pianura a sud del Po a permeabilità superficiale primaria generalmente medio-bassa

Nell'unità costituita da questi depositi è modellata la superficie principale della pianura, che si insinua in parte nelle principali valli appenniniche. I depositi sono di età würmiana e in parte olocenica.

La sua estensione areale si riduce da ovest verso est, per il progressivo avvicinamento dell'asta fluviale del Po al margine appenninico.

Si tratta di alternanze di sabbie e/o ghiaie con argille o limi argillosi, a geometria lenticolare e modesto grado di alterazione. Alla sommità della successione, è presente una coltre di copertura argillo-limosa ("limi di stanca"), più o meno continua e potente, che rende generalmente ridotta la permeabilità superficiale.

In profondità, i depositi in questione danno origine a un sistema acquifero complesso, che si estende anche al di sotto dell'unità prece-

dentemente descritta. In relazione all'andamento spaziale dei corpi impermeabili che suddividono i livelli porosi all'interno della successione, tale sistema risulta a luoghi compartimentato in più falde acquifere sovrapposte, a luoghi indifferenziato.

La falda più superficiale presenta senso di deflusso diretto verso i quadranti settentrionali, dove si raccorda con l'acquifero contenuto nei depositi dell'unità precedente. È di tipo freatico nelle zone in cui la superficie piezometrica è fortemente depressa (per esempio il conoide del torrente Staffora) e l'acquifero risulta privo di significative coltri impermeabili a tetto; presenta invece condizioni di debole confinamento nelle zone nelle quali la soggiacenza è bassa ed è presente una potente coltre di copertura, a permeabilità molto limitata.

4.1.3 Depositi alluvionali *prewürmiani a permeabilità primaria media, sia pure variabile da zona a zona*

Sono stati inclusi in quest'unità, in modo indifferenziato, i depositi prewürmiani che, come esposto nel paragrafo 2.1.2, si possono dividere, in verità, in due distinte coltri alluvionali, corrispondenti a due ordini di ripiani terrazzati, ambedue nettamente sopraelevati rispetto alla superficie principale della pianura.

Litologicamente, l'unità è costituita da ghiaie e sabbie a matrice limosa, talora dominante; questi depositi presentano, verso la superficie, un elevato grado di alterazione (suoli rossastri fersiallitico - lisciviati) e, talora, una copertura data da una coltre loessica di natura limosa, con pedogenesi di colore giallo-arancio. Nella Carta Geologica d'Italia (F. 71 - Voghera) questi depositi corrispondono alle unità del Fluviale medio e del Fluviale antico.

Il grado di permeabilità superficiale (primi metri) risulta generalmente basso, visto il grado di alterazione dei depositi (con produzione di una matrice terroso-limosa all'interno della frazione grossolana) e la presenza, sulle superfici più pianeggianti, della coltre limosa di origine loessica (a basso grado di permeabilità). I terreni prewürmiani ospitano falde con un carattere eminentemente freatico, di limitata potenzialità e in connessione idraulica con le falde contenute nel materasso alluvionale costituente il ripiano principale della pianura, topograficamente ribassato.

4.2 Le unità idrogeologiche della collina

Nel settore collinare, sono state riconosciute quattro unità principali, in relazione soprattutto al grado di permeabilità sia primaria che secondaria.

4.2.1 Depositi marini prequaternari *a permeabilità nulla o molto bassa per fessurazione e/o porosità*

In quest'unità sono state riunite le formazioni marine a composizione prevalentemente pelitica. Si tratta per lo più di sedimenti terrigeni costituiti da argille, marne argillose, limi e da alternanze ritmiche di arenarie e marne, argille marnose o marne calcaree, cui sono stati associati anche depositi di natura evaporitica: marne più meno siltose e gessifere, con intercalate lenti di gesso, gessoruditi e calcari carciati. L'insieme di questi terreni costituisce l'unità più estesamente affiorante nel settore collinare esaminato.

I sedimenti descritti appartengono alle seguenti formazioni della letteratura geologica: Formazione di Val Luretta (nelle quali sono state escluse in mappa, le litofacies più calcaree, cartografate a parte), Arenarie di Ranzano (litofacies pelitiche e pelitico-arenacee), Complesso indifferenziato, Marne di Monte Piano, Marne di Monte Lumello, Marne di Sant'Agata Fossili, Formazione gessoso-solfifera e Argille di Lugagnano.

Da un punto di vista idrogeologico, si tratta di complessi litologici a permeabilità primaria scarsa o nulla. La permeabilità secondaria, per fessurazione, risulta al pari assai ridotta; può tuttavia subire locali incrementi nelle litozone più litificate (per esempio le marne calcaree minutamente scagliettate) e/o in presenza di fenomeni di tettonizzazione (intensa fratturazione dovuta a deformazioni fragili) o di carsificazione (depositi gessosi e calcari carciati della Formazione gessoso-solfifera).

Le capacità di immagazzinamento di acqua risultano inoltre accentuate in corrispondenza delle coltri di alterazione superficiale e dei corpi di frana, che sovente si impostano su tali litologie. Condizioni di questo genere, che rendono possibile almeno localmente una certa circolazione idrica, interessano in particolare la Formazione di Val Luretta, dove si riscontra un certo numero di piccole sorgenti, per lo più

concentrate nella zona di Rocca de' Giorgi-Golferenzo-Canevino.

I terreni raggruppati in questa unità idrogeologica rappresentano spesso il substrato impermeabile delle falde o delle reti acquifere contenute nelle masse rocciose sovrastanti, permeabili per fessurazione o porosità; in relazione alla loro geometria possono pertanto consentire la venuta a giorno delle acque che circolano entro tali masse.

4.2.2 Depositi marini

*prequaternari a giacitura caotica
e a bassa permeabilità primaria*

Comprendono materiali di natura prevalentemente argillosa, intensamente scompagnati da fenomeni di tettonizzazione o da processi gravitativi. Si tratta in particolare dei sedimenti terrigeni appartenenti alla formazione del Caotico, comprendente lembi riferibili a più unità litostratigrafiche, in masse disarticolate a causa dell'intensa tettonizzazione subita e inglobate per lo più in una matrice argillosa, anch'essa a giacitura caotica; in tale raggruppamento sono stati inoltre inclusi le coltri eluvio-colluviali a dominante argillo-limosa e gli accumuli di frana di maggiore estensione.

I materiali appartenenti alla formazione del Caotico si rinvencono in rapporti di natura tettonica con i terreni circostanti e, data la loro natura litologica, risultano in genere privi di permeabilità primaria. In relazione al loro stato giaciturale possono tuttavia presentare localmente una forte capacità di imbibizione, che genera notevolissimi problemi di stabilità. In conseguenza di ciò, possono essere sede di una certa circolazione idrica lungo piani superficiali di debolezza ed entro le coltri di più recente mobilizzazione.

Considerazioni analoghe valgono anche per i corpi di frana e per gli accumuli eluvio-colluviali a prevalente composizione limosa. Falde più significative possono essere contenute solo entro le coltri detritiche costituite da pezzame lapideo (per esempio le falde di detrito ai piedi delle scarpate di erosione impostate in litologie arenaceo-conglomeratiche); accumuli di questo genere sono tuttavia scarsamente rappresentati nel territorio esaminato.

Nel complesso, il grado di permeabilità di questa unità risulta di poco superiore a quello dell'unità precedente.

4.2.3 Depositi marini prequaternari a permeabilità primaria media e possibile permeabilità secondaria, per fessurazione

Appartengono a questa classe le formazioni sabbioso-ghiaioso-conglomeratiche del margine appenninico (Arenarie di Serravalle, Conglomerati di Cassano Spinola e Sabbie di Asti) e le litofacies conglomeratiche e arenaceo-sabbiose delle Arenarie di Ranzano.

Sono per lo più rappresentate da conglomerati variamente cementati e talora fratturati, con intercalazioni arenaceo-marnose, e da sabbie e arenarie generalmente poco cementate e, talora, calcarenitiche.

Presentano un certo grado di permeabilità primaria in corrispondenza degli orizzonti poco cementati e delle coltri superficiali prodotte dall'alterazione meteorica; quando il grado di cementazione tende ad aumentare, si possono instaurare circolazioni idriche per fessurazione. Nel caso delle litologie appartenenti alla formazione delle Arenarie di Ranzano, la permeabilità può subire riduzioni in quanto alle masse arenacee risultano talora intercalati livelli pelitici.

In relazione al grado di litificazione e alle condizioni di fratturazione, le litologie descritte possono ospitare modeste falde idriche, che tuttavia solo in pochi casi possono costituire risorse idriche sfruttabili, data la limitata estensione spaziale delle rocce coinvolte.

4.2.4 Depositi flisciodi relativamente permeabili per fessurazione

Sono costituiti da calcareniti, calcari marnosi e marne, con intercalazioni pelitiche appartenenti alle litozone più calcaree e/o calcarenitiche della Formazione di Val Luretta; queste litologie, pur mostrando più o meno fitte intercalazioni di livelli pelitici, si presentano notevolmente fratturate.

Le caratteristiche idrogeologiche di questa unità sono complessivamente simili a quelle dell'unità precedente, da cui essa è stata distinta in considerazione del fatto che la sua permeabilità risulta esclusivamente di tipo secondario, per fessurazione.

Dal quadro descritto emerge che le situazioni ottimali ai fini dell'individuazione di siti idonei ad accogliere impianti a elevato rischio di inquinamento delle acque sotterranee si riscontrano nelle zone in cui risultano predominanti i sedi-

menti pelitici con caratteristiche di permeabilità ridotte e spessori tali da escludere la presenza di falde idriche significative. Queste condizioni contraddistinguono in particolare le litologie dell'unità descritta al paragrafo 4.2.1, che si può considerare complessivamente idonea.

Anche nell'ambito di questa unità, le condizioni idrogeologiche locali devono essere tuttavia attentamente valutate; le caratteristiche di permeabilità possono infatti incrementarsi in corrispondenza delle coltri superficiali e in presenza di fenomeni di tettonizzazione che possono indurre condizioni di fratturazione più o meno intensa.

4.3 Fenomeni di mineralizzazione delle acque

Nel settore collinare un fattore idrogeologico fortemente limitante per lo svolgimento di attività a rischio di inquinamento è rappresentato dalla presenza di manifestazioni idriche mineralizzate. Queste ultime rappresentano una risorsa del territorio da tutelare adeguatamente per il notevole interesse che essa riveste sia da un punto di vista scientifico-naturalistico che economico. Tra le manifestazioni presenti si ricordano quelle a connotazione salso-bromo-iodica, captate mediante pozzi sia superficiali che profondi nelle aree di Salice Terme e Rivanazzano dai locali stabilimenti termali e quelle a caratterizzazione solfurea, oggetto di captazione a scopi termali mediante pozzi poco profondi nella zona di Godiasco (poco a sud di Salice) e direttamente emergenti da diverse piccole scaturigini lungo il margine collinare tra Rivanazzano e Broni (in Tavola 1 sono riportate le principali).

L'origine delle acque salso-bromo-iodiche sembra riferibile direttamente o indirettamente alla presenza di strutture tettoniche che hanno favorito fenomeni di migrazione di acque connate a elevatissima concentrazione salina (salamoie), consentendone l'accumulo in orizzonti che fungono da "serbatoio", siti a varie profondità. Durante la risalita, tali acque possono miscelarsi con quelle di infiltrazione meteorica, subendo diluizioni più o meno rilevanti. Come già anticipato, nella zona di Casteggio questo fenomeno interessa anche la falda superficiale contenuta nel materasso alluvionale.

La localizzazione delle acque di tipo sulfureo è invece verosimilmente legata a circuiti idrici superficiali che traggono diretta alimentazione dalle precipitazioni efficaci, con un legame più o meno diretto con le aree di affioramento della Formazione gessoso-solfifera.

A quest'ultima è infatti riconducibile la fonte mineralogica dei composti dello zolfo presenti in queste acque sia come solfati che sotto forma di idrogeno solforato.

La presenza di questi composti in forme ridotte è con ogni probabilità da attribuire a una lenta percolazione delle acque attraverso orizzonti litologici a bassa permeabilità, appartenenti alla stessa Formazione gessoso-solfifera e/o alle sottostanti Marne di Monte Lumello o Marne di Sant'Agata Fossili, nonché alle modificazioni indotte dalla sostanza organica ivi presente.

Entrambi i meccanismi che causano i fenomeni di mineralizzazione delle acque possono talora manifestarsi congiuntamente: il chimismo dei pozzi di Salice e Rivanazzano e Godiasco indica inequivocabilmente la presenza di fenomeni di mescolamento tra i due tipi di acque.

Capitolo 5

**Aspetto
litostratigrafico
e struttura
idrogeologico
delle zone
di pianura**

Premessa

L'analisi delle condizioni litostratigrafiche e idrogeologiche di questi territori è stata condotta sulla base di un'accurata raccolta di dati desunti da perforazioni (stratigrafie di pozzi idrici, sondaggi geognostici e trincee esplorative) e da logs effettuati lungo le scarpate delle numerose fosse di cava qui esistenti. Il materiale raccolto, comprendente un totale di circa 450 dati puntuali, è stato successivamente utilizzato per sviluppare la ricerca.

La correlazione dei dati stratigrafici disponibili, corredata dai dati geologici di superficie, ha consentito la ricostruzione delle sezioni idrogeologiche e litostratigrafiche riportate in *Tavola 5*. Le sezioni da 1-1' a 6-6' interessano l'area studiata in senso circa meridiano, a partire dal margine collinare fino all'asta fluviale del Po; la sezione A-A' attraversa l'area studiata longitudinalmen-

te a partire dalle zone poste poco a nord di Casei Gerola, fino ad Arena Po.

Le ricostruzioni effettuate mostrano l'andamento spaziale dei corpi sedimentari che costituiscono la coltre alluvionale. Nell'ambito della successione presente si è cercato, in particolare, di differenziare gli orizzonti corrispondenti ad acquiferi (depositi ghiaiosi o sabbiosi con scarsa matrice fine), da quelli che costituiscono setti impermeabili (argille compatte) o semipermeabili (argille limose o sabbiose, ghiaie a matrice argillosa).

La definizione dell'assetto litostratigrafico ha permesso di ricostruire nelle sue linee essenziali la struttura idrogeologica dell'area esaminata, consentendo in particolare una prima valutazione del grado di differenziazione degli acquiferi presenti e i possibili meccanismi di alimentazione delle falde idriche sotterranee.

5.1 Substrato degli acquiferi contenuti nella coltre alluvionale

Nelle sezioni di *Tavola 5* sono stati ricostruiti i rapporti tra la coltre alluvionale che ospita i principali corpi acquiferi e il suo substrato, corrispondente al top della sottostante successione marina.

La ricostruzione dell'andamento di questa superficie è risultato problematico, in parte per la scarsità di perforazioni sufficientemente profonde, in parte per la difficoltà nella distinzione tra le *facies* di ambiente marino e quelle di ambiente continentale.

Il passaggio tra le due serie, che generalmente viene fatto coincidere con la comparsa di argille azzurro-cineree, è oltretutto, in molti casi, di tipo transizionale e non consente una netta separazione tra i due tipi di depositi. Ciò giustifica anche il fatto che in talune situazioni l'attribuzione delle argille azzurre a depositi presumibilmente marini non risulta supportata da idonee analisi paleontologiche.

Da un punto di vista idrogeologico, il criterio sopra citato, utilizzato anche nel corso della presente ricerca, trova tuttavia maggiori giustificazioni in quanto la comparsa di sedimenti azzurro-cinerei corrisponde all'inizio di una potente successione sedimentaria che, per il suo carattere sostanzialmente impermeabile, ben individua il substrato degli acquiferi alluvionali.

Questa successione risulta costituita in prevalenza da argille o marne argillose, contenenti talora limitati orizzonti permeabili (sabbie prevalenti, cfr. sezioni 6-6'), sede di modeste falde acquifere (Peloso e Cotta Ramusino, 1989), in cui si riscontrano acque a elevata salinità, verosimilmente isolate dal sistema acquifero contenuto nella successione alluvionale.

L'andamento del substrato del materasso alluvionale (cfr. capitolo 1) è fortemente condizionato dalla situazione strutturale che interessa il sottosuolo dell'area indagata; le dislocazioni, sia duttili che fragili, connesse alle strutture del margine appenninico condizionano infatti lo spessore dei depositi alluvionali e, di

conseguenza, la presenza, la distribuzione e la potenzialità delle falde acquifere (Braga *et al.*, 1976; Cotta Ramusino, 1982; Braga e Cerro, 1988; Peloso e Cotta Ramusino, 1989).

Un ruolo fondamentale è esercitato soprattutto dalla presenza dell'alto strutturale individuato dall'allineamento "Sperone di Stradella" e Colle di San Colombano.

La zona interessata da questa struttura positiva si caratterizza per la presenza di un materasso alluvionale di potenza estremamente ridotta (spessori dell'ordine di poche decine di m), che scompare localmente per l'affioramento in superficie della successione marina (cfr. zone di San Cipriano e Portalbera - F. 59 Pavia; Brambilla, 1992; Pellegrini e Vercesi, 1996). Tale assetto si mantiene fino al limite orientale dell'ambito considerato (tratto terminale del torrente Bardonezza). Nel settore a occidente dell'alto strutturale, il tetto delle successioni marine invece si approfondisce progressivamente procedendo verso ovest e allontanandosi dal margine appenninico.

Anche in questa zona, è comunque rilevante il condizionamento determinato dalle strutture tettoniche sepolte (cfr. Carta Geologica Italiana F. 59 e F. 71) e, in particolare, dalla presenza di due faglie inverse che ribassano i blocchi settentrionali.

Il settore ribassato dalla faglia più settentrionale corrisponde alla zona caratterizzata dai massimi spessori della coltre alluvionale (fino a 300 m circa - Braga e Cerro, 1988).

L'assetto strutturale si riflette anche sul chimismo delle acque della falda principale, causando locali anomalie.

Nella zona orientale dell'ambito indagato, si riscontrano caratteristiche idrochimiche differenti tra il settore posto subito a ovest dell'alto strutturale di Stradella e le aree site più a est: nel primo si evidenzia infatti un maggior grado di salinità delle acque, con una percentuale di solfati decisamente superiore (Peloso e Cotta Ramusino, 1989). Questa situazione è riconducibile alla disposizione delle successioni evaporitiche messiniane, che verso est si riducono progressivamente, fino a scomparire.

Nella zona di Casteggio le strutture sepolte presenti (cfr. capitolo 1) portano il substrato della coltre alluvionale (presumibilmente costituito da depositi quaternari marini) a ridotte profondità dal piano campagna. Questa situazione interessa in particolare il settore più

prossimo alla locale struttura anticlinale e alla "Faglia inversa di Voghera" e rende ragione della presenza di acque salmastre, riscontrata in pozzi idrici anche di modesta profondità. Le anomalie idrochimiche derivano con ogni probabilità da intrusioni di acque salse profonde che alterano il normale chimismo delle acque di falda (di tipo bicarbonato-alcalino-terrose), con passaggio a facies clorurato-sodiche.

La risalita delle acque a elevata salinità dal substrato si realizza probabilmente lungo vie preferenziali puntiformi, corrispondenti a zone dotate di un sia pur modesto grado di permeabilità, per fenomeni di fessurazioni o aumento della frazione sabbiosa. Questa condizione giustifica l'irregolare distribuzione del fenomeno: pozzi siti a breve distanza evidenziano talora concentrazioni saline marcatamente differenti.

5.2 Caratteristiche degli acquiferi contenuti nella coltre alluvionale

Come indicato nelle sezioni idrogeologiche ricostruite, la successione alluvionale presente al di sopra del substrato marino è costituita da un'alternanza di sedimenti a dominante argillosa (argille, argille limoso-sabbiose), con caratteristiche di permeabilità assai scarse, e di orizzonti poroso-permeabili; la composizione di questi ultimi è prevalentemente ghiaiosa in corrispondenza dei conoidi pedeappenninici e sabbioso-ghiaiosa nelle restanti zone.

Gli orizzonti permeabili sono sede di una attiva circolazione idrica da cui traggono alimentazione i pozzi idrici presenti in zona; essi danno origine a un sistema acquifero, il cui tetto si colloca a profondità assai variabili dal piano campagna: i valori minimi si registrano in corrispondenza delle zone golenali del fiume Po, dove le assise sabbioso-ghiaiose costituiscono lo stesso alveo fluviale, e nelle zone apicali dei principali conoidi.

La distribuzione e gli spessori degli orizzonti che compongono il sistema acquifero cambiano al variare della potenza complessiva del materasso alluvionale.

Nelle sezioni 1-1', 2-2', 3-3' e 4-4', a partire dal margine collinare, si assiste a un rapido approfondimento del tetto della serie marina (e di transizione) e a un concomitante incremento degli spessori della successione alluvionale.

Nell'ambito di quest'ultima è possibile individuare un sistema acquifero complesso, caratterizzato dalla presenza di più orizzonti permeabili sovrapposti, separati da litozone a dominante argillosa (impermeabili o semipermeabili) o localmente interdigitati.

Le condizioni descritte tendono a scomparire procedendo verso est (sezioni 5-5' e 6-6' e sezione longitudinale A-A', a est di Casteggio), a seguito del progressivo avvicinamento del substrato al piano campagna (alto strutturale dello "Sperone di Stradella").

In queste zone la successione alluvionale ospita un unico orizzonte permeabile, correlabile con i primi corpi sabbioso-ghiaiosi presenti nelle zone più occidentali; questa connessione consente di individuare un acquifero superficiale che si può considerare pressoché continuo su tutta l'area studiata. Nel settore orientale la base di tale acquifero viene a coincidere direttamente con il tetto delle successioni marine (o transizionali); nelle restanti zone esso risulta delimitato verso il basso dalle prime intercalazioni argillose arealmente continue presenti entro la coltre alluvionale.

Dall'esame dettagliato delle sezioni si evidenziano forti variazioni delle condizioni idrogeologiche dell'area esaminata passando dal settore di monte a quello di valle.

5.2.1 Settore di monte

Questo settore, originato dalla coalescenza dei conoidi depositati dai corsi d'acqua appenninici, si caratterizza per la presenza di più orizzonti acquiferi, corrispondenti ad antichi paleoalvei dei principali torrenti; tali orizzonti evidenziano una distribuzione spaziale alquanto articolata.

In corrispondenza del conoide del torrente Staffora (cfr. tratto di monte della sezione 1-1') è presente, in particolare, una successione costituita da corpi ghiaiosi marcatamente lenticolari e di potenza ridotta, intercalati a depositi prevalentemente argillosi. Le frequenti interdigitazioni tra i depositi permeabili fanno supporre che il sistema acquifero presente in questo settore sia scarsamente differenziato.

Nella zona apicale del conoide, il regime della falda è per lo più di tipo freatico; la presenza di depositi a ossatura ghiaiosa in superficie o a ridotta profondità dal piano campagna crea le condizioni per un'attiva ricarica dell'acquifero a opera delle acque di provenienza meteorica.

All'alimentazione per infiltrazione efficace si associa quella derivante dagli apporti idrici del torrente Staffora. L'alveo a carattere torrentizio, presenta infatti una composizione granulometrica molto permeabile fino all'altezza di Voghera e risulta direttamente connesso con i primi livelli ghiaiosi della successione; questa situazione, unitamente alle condizioni idrodinamiche (livello idrometrico generalmente a quote più elevate di quelle piezometriche in conseguenza della locale pensilità dell'alveo), consente consistenti deflussi dal torrente verso la falda.

Analoghi fenomeni di ricarica dell'acquifero, di minore entità, si verificano anche nelle zone di fondovalle e di apice dei conoidi di altri torrenti appenninici (Coppa, Scuropasso, Versa in particolare), dove sono presenti depositi permeabili connessi a quelli del materasso alluvionale di pianura. Le dispersioni di subalveo forniscono presumibilmente la ricarica predominante dell'intero sistema acquifero presente nel territorio studiato.

5.2.2 Settore di valle

Passando dal settore di monte a quello di valle (zone prossime al fiume Po, cfr. sezioni 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5'), si assiste a un progressivo ispessimento dei corpi acquiferi e a un aumento della loro continuità areale, cui fa riscontro una diminuzione della granulometria dei materiali (da ghiaie a sabbie prevalenti). Queste variazioni, che interessano soprattutto le zone a ovest dell'alto strutturale di Stradella, testimoniano una sedimentazione derivante in prevalenza dall'attività del fiume Po.

In prossimità dell'alveo fluviale, il sistema acquifero evidenzia sovente condizioni di compartimentazione per la presenza di potenti orizzonti impermeabili che isolano i livelli permeabili.

Tra l'estremità occidentale della zona studiata e la confluenza del torrente Coppa nel fiume Po, questi orizzonti, relativamente continui in senso areale, danno origine a un sistema acquifero di tipo multistrato (sezioni 1-1', 2-2', 3-3'); queste condizioni tendono a scomparire nella zona compresa tra la confluenza del torrente Coppa e quella del torrente Scuropasso (cfr. sezione 4-4') dove, a seguito del progressivo assottigliamento del materasso alluvionale e delle chiusure a lente dei livelli impermeabili, l'acquifero, pur consistente, tende a divenire nuovamente indifferenziato.

In tutto il settore compreso tra le frange estreme dei conoidi appenninici e le zone golenali del Po la successione alluvionale risulta caratterizzata dalla presenza di una coltre superficiale di materiali argillo-limosi che riveste notevole importanza ai fini idrogeologici.

Questi depositi, a permeabilità scarsa o nulla, costituiscono un elemento di protezione dall'inquinamento per l'acquifero sottostante (cfr. paragrafo 4.1). La loro presenza riduce le possibilità di ricarica diretta della falda per gli apporti derivanti dall'infiltrazione efficace.

Nelle zone in cui la coltre di copertura presenta spessori superiori ai 2-3 m, sono assai limitati anche gli scambi idrici tra la falda e le acque superficiali incanalate; gli alvei dei corsi d'acqua risultano infatti impostati interamente su materiali a scarsa permeabilità, che impediscono deflussi idrici sotterranei sia in uscita che in entrata.

Le condizioni idrodinamiche della falda risentono della situazione piezometrica e della

potenza della coltre superficiale argillo-limosa: nelle zone in cui questa è ridotta o assente, la falda è di tipo libero; nei comparti in cui la coltre presenta spessori rilevanti, la falda assume un carattere confinato se limitata a tetto da depositi impermeabili, o semiconfinato in presenza di depositi di copertura semipermeabili.

In queste aree, la falda, limitata sia inferiormente che superiormente da livelli impermeabili (acquicludes) o semipermeabili (acquitards), risulta debolmente in pressione e può ricevere alimentazione solo lateralmente.

Le coperture argillo-limose tendono ad assottigliarsi nella fascia di meandreggiamento recente del fiume Po fino a scomparire quasi completamente nelle zone golenali. In questi settori le litologie superficiali, rappresentate da prevalenti sabbie più o meno limose, assicurano un buon drenaggio dei terreni e consentono un'attiva ricarica a opera delle acque meteoriche.

Capitolo 6

**Condizioni
di vulnerabilità
del primo
acquifero**

Premessa

In considerazione della finalità dell'indagine, l'analisi delle caratteristiche idrogeologiche della zona di pianura è stata rivolta, in particolare, alla valutazione del rischio di inquinamento delle acque sotterranee.

Come già esposto (cfr. paragrafo 5.2), entro la successione alluvionale di pianura è riconoscibile una prima litozona poroso-permeabile, che, pur collocandosi a quote variabili (il tetto, localmente subaffiorante, raggiunge profondità di oltre 30 m dal piano campagna), risulta pressoché continua su tutto l'areale considerato. Questa litozona ospita la falda più superficiale, che presenta un senso di deflusso diretto verso i quadranti settentrionali, risentendo nella zona di monte dell'azione di ricarica esercitata dall'infiltrazione efficace e dagli apporti idrici dal sistema idrografico e, in quella di valle, dell'effetto drenante operato dal fiume Po e da alcuni tratti dei suoi principali affluenti

di destra: torrente Versa in particolare e tratti terminali dei torrente Staffora e del Curone.

Per la sua vicinanza al piano campagna questo corpo acquifero costituisce il principale ricettore di eventuali inquinanti superficiali. Il suo grado di vulnerabilità intrinseca condiziona pertanto fortemente l'idoneità del territorio ad accogliere impianti che possono rilasciare contaminanti.

Il potenziale rischio di contaminazioni è stato valutato soprattutto in funzione della presenza o meno di coperture superficiali impermeabili in grado di costituire una barriera fisica alla percolazione verticale di inquinanti, nonché delle condizioni di soggiacenza della superficie piezometrica della falda. La soggiacenza definisce lo spessore della zona insatura che risulta direttamente proporzionale all'azione di attenuazione dell'inquinante da parte dei terreni (Civita, 1988).

6.1 Grado di protezione del primo acquifero in funzione della presenza di coperture a bassa permeabilità

Per la definizione delle caratteristiche della litologia superficiale sono state utilizzate le informazioni litostratigrafiche raccolte nel corso della ricerca. Il complesso dei dati disponibili (circa 450) ha consentito un accurato studio delle caratteristiche litologiche degli orizzonti che costituiscono la porzione sommitale della successione alluvionale.

L'analisi ha riguardato essenzialmente la coltre di copertura a dominante argillo-limoso diffusamente presente al tetto di tale successione; come già esposto, i sedimenti di tale coltre, derivanti dalla sedimentazione distale operata dai corsi d'acqua appenninici e dal fiume Po (limi di stanca), possono costituire un valido elemen-

to di protezione per l'acquifero più superficiale, data la loro scarsa permeabilità.

Le possibilità di attenuazione dei rischi di inquinamento risultano tuttavia assai variabili in relazione alla composizione granulometrica dei sedimenti (presenza di una frazione limoso-sabbiosa più o meno abbondante) e, come più volte sottolineato, al loro spessore. La variazione della potenza dei depositi di copertura consente, in particolare, di individuare aree a diverso grado di vulnerabilità.

Sulla base dei dati a disposizione, è stata pertanto elaborata una carta a curve isopache (cfr. Tavola 3), relativa alla litozona impermeabile o semipermeabile che sovrasta l'acquifero superficiale. La restituzione delle curve, con equidistanza di 2 m, è stata ottenuta al calcolatore mediante procedimenti automatici di stima del dato; sono state escluse, ai fini dell'elaborazione, le stratigrafie lacunose o poco attendibili e quelle indicanti la

presenza di locali falde sospese entro la coltre di copertura.

Dall'esame dell'elaborato si evince che la coltre limoso-argillosa presenta spessori superiori ai 6 m, tali da assicurare generalmente un buon grado di protezione alla falda, in una vasta fascia che dal tratto di margine collinare compreso tra Retorbido e Santa Giuletta raggiunge l'estremo nord-occidentale dell'area studiata; in tale ambito le potenze massime, superiori a 20 m, si raggiungono a ovest di Montebello e nelle aree su cui si collocano gli abitati di Casteggio e Broni.

Spessori superiori a 6 m si riscontrano anche in limitate aree a ovest e a nord di Silvano Pietra, nella zona a sud-ovest di Voghera, nelle zone pedecollinari su cui insistono gli abitati di Broni, Bosnasco, Cardazzo e nel settore immediatamente a nord dell'area urbana di Stradella.

Allontanandosi dalle zone descritte, la presenza di coltri di copertura si riduce progressivamente raggiungendo valori minimi nelle zone apicali del conoide del torrente Staffora, dove, come detto, si individua la principale area di alimentazione del sistema acquifero, e nelle zone rivierasche del fiume Po, con particolare riguardo al settore orientale dell'area esaminata.

In corrispondenza del conoide del torrente Staffora, i materiali argillosi di copertura presentano spessori minori di 4 m in un vasto settore che dal margine collinare raggiunge l'area urbana di Voghera, proseguendo a ovest fino a interessare il territorio di Casei Gerola. All'interno di tale ambito, la copertura risulta pressoché assente (spessori inferiori a 2 m) in corrispondenza del fondovalle del torrente Staffora (zona di Salice Terme), nel territorio a nord e a ovest di Rivanazzano, in alcuni settori dell'abitato di Voghera e nella zona immediatamente a est di Casei Gerola.

Nel restante settore pedecollinare, condizioni di scarsa protezione dell'acquifero caratterizzano anche il fondovalle del torrente Coppa (zona di Borgo Priolo) e, in parte, la zona interessata dall'abitato di Stradella.

Nella fascia prossima all'alveo del fiume Po, i depositi argillosi superficiali presentano spessori minori di 4 m in un vasto areale delimitato a sud dalla congiungente Bressana Bottarone-Barbianello-Portalbera-Ripaldina. Entro tale settore si riscontrano frequentemente aree con

valori minori di 2 m. L'assenza di coperture interessa ovviamente anche tutta la zona di alveo attivo del fiume Po che non è stata visualizzata in carta per motivi grafici.

Nel settore compreso tra Bastida Pancarana e Ghiaie, gli spessori risultano generalmente superiori ai 4 m con la sola eccezione della zona a nord-est di Corana.

Nel complesso, dall'esame della carta a curve isopache emerge che la maggior parte del territorio considerato è dotata di coperture superficiali a dominante argillosa con spessori significativi ai fini della protezione delle acque sotterranee dai rischi di contaminazioni superficiali.

Il grado di vulnerabilità all'inquinamento della falda (ci si riferisce all'acquifero più superficiale) può tuttavia subire locali incrementi dovuti da una parte a variazioni della composizione granulometrica dei sedimenti di copertura che possono assumere un carattere di semipermeabilità a seguito di aumento della componente limoso-sabbiosa (cfr. Tavola 3), dall'altra, alla presenza, entro la coltre, di piccole falde sospese rispetto all'acquifero principale (paragrafo 6.2 - Tavole 3 e 4). Queste ultime possono risultare assai sensibili all'inquinamento per la loro vicinanza al piano campagna; una loro eventuale contaminazione avrebbe riflessi negativi sullo stesso acquifero principale che, con ogni probabilità, riceve alimentazione da questi corpi idrici sotterranei.

La presenza di una componente sabbiosa apprezzabile nei depositi di copertura, piuttosto frequente anche nelle zone con spessori della coltre superiori ai 6 m, rappresenta un fattore di forte riduzione del grado di protezione dell'acquifero.

6.2. Grado di protezione del primo acquifero in funzione delle condizioni di soggiacenza

Nei riguardi delle condizioni piezometriche della prima falda è stato effettuato uno specifico studio che ha comportato la raccolta di un consistente numero di dati piezometrici pregressi, desunti da studi effettuati sul territorio della pianura oltrepadana in anni passati per finalità diverse (in particolare si è fatto riferimento a quanto riportato da Cotta Ramusino, 1982; Baroni et al, 1988; Peloso e Cotta Ramusi-

no, 1989; ulteriori informazioni sono state desunte dai numerosi studi idrogeologici compiuti sul territorio). Le informazioni raccolte si riferiscono a circa 550 pozzi e piezometri.

Le misure piezometriche, ovviamente relative ad anni e situazioni stagionali diverse, coprono (spesso con più valori nei singoli pozzi) un arco temporale corrispondente agli ultimi 15 anni, periodo che si può senz'altro ritenere significativo ai fini dell'indagine.

La distribuzione spaziale dei punti di misura, nonché l'elevato numero di dati piezometrici raccolti ha consentito di valutare con un sufficiente dettaglio le condizioni di soggiacenza nel territorio esaminato e la loro variabilità nel periodo recente.

I punti d'acqua censiti interessano per lo più l'acquifero più superficiale, arealmente continuo, o, talora, piccole falde sospese rispetto a quest'ultimo, contenute nei primi metri della successione. Sulla base dei dati raccolti è stata effettuata un'elaborazione riferita all'acquifero principale (escludendo pertanto tutte le misure piezometriche riferite a piccole falde sospese, sensibilmente superiori, come quota, rispetto a quelle della falda considerata) e relativa alle condizioni di minima soggiacenza desumibili dai dati disponibili (cfr. *Tavola 4*). L'andamento di tale parametro è visualizzato mediante curve isolinee con equidistanza pari a 2 m, restituite in automatico.

La ricostruzione è stata effettuata in modo unitario su tutta l'area, senza tener conto delle variazioni del regime della falda; come già esposto, quest'ultimo passa infatti da condizioni freatiche a condizioni semiconfinate o confinate (in quest'ultimo caso, la quota piezometrica non corrisponde all'inizio della zona satura, che è viceversa individuato dalla posizione della base della coltre impermeabile di copertura).

L'utilizzo dei valori minimi di soggiacenza ha consentito di evidenziare la situazione più sfavorevole nei riguardi della protezione dall'inquinamento delle acque sotterranee. Si noti che l'elaborazione non si riferisce ad una condizione piezometrica effettivamente verificata, ma piuttosto visualizza la posizione di massimo innalzamento locale della falda, documentata dalle misure raccolte.

L'andamento delle curve indica che la superficie piezometrica si colloca a profondità assai variabili (da meno di 1 m a oltre 30 m), mostrando situazioni differenziate in relazione al-

le condizioni idrogeologiche che caratterizzano i vari comparti del territorio esaminato.

Le zone caratterizzate da maggiori valori di soggiacenza (a massima protezione) si collocano in corrispondenza dei conoidi del torrente Staffora e del torrente Coppa. Nel primo dei due comparti si raggiungono le massime profondità della superficie piezometrica con valori che superano i 30 m.

Nel settore orientale dell'area indagata, valori di soggiacenza superiori ai 10 m si riscontrano esclusivamente nell'area pedecollinare a est di Stradella, ove sono presenti due ripiani costituiti da depositi pre-würmiani, sensibilmente rialzati rispetto alla superficie principale della pianura (cfr. capitolo 1).

6.2.1 *Gli influssi degli attingimenti idrici*

Nel settore apicale del conoide del torrente Coppa (zona tra Casteggio e Montebello), la soggiacenza, caratterizzata da valori generalmente superiori ai 20 m con punte di 25 circa, risente solo in parte dell'assetto idrogeologico locale (presenza di un'area a trasmissività più elevata dei settori circostanti), essendo in massima parte condizionata dagli abbassamenti della falda dovuti ai prelievi idrici.

Le misure dei livelli idrici nei pozzi acquedottistici e industriali che gravano su quest'area (zona "Fogliarina"), oggetto di monitoraggio periodico dal 1970, indicano un *trend* fortemente negativo della piezometria tra il 1989 e il 1993, con abbassamenti di entità pari a 6 m circa.

Sulla base dei dati disponibili, negli anni Settanta l'acquifero risultava in pressione o pressoché totalmente saturo; successivamente, con il progressivo accrescersi del divario tra alimentazione e prelievi, la falda ha acquisito almeno localmente un regime idrodinamico di tipo libero, con un andamento generale di tipo radiale convergente, determinato dall'estesa depressione piezometrica dovuta all'azione di emungimento. Negli anni successivi, l'andamento piezometrico locale, pur mantenendo la morfologia descritta, ha evidenziato un forte innalzamento, dovuto al sensibile incremento delle precipitazioni verificatosi a partire dal 1991.

Anche nella zona di Voghera, è presumibile che la depressione piezometrica indotta dagli emungimenti operati dai pozzi, sia superfi-

ciali che profondi, esistenti nel territorio urbano abbia indotto un incremento non trascurabile delle normali condizioni di soggiacenza del primo acquifero.

In questo caso il fenomeno risulta tuttavia difficilmente quantificabile, non essendo possibile differenziare i prelievi che interessano gli orizzonti acquiferi superficiali, con riflessi immediati sulla piezometria, da quelli operati sulle falde profonde, la cui incidenza si può risentire solo sul lungo periodo.

6.2.2 *Risorgive ed emergenze naturali della falda*

Allontanandosi dalle zone prima descritte, si evidenzia un progressivo avvicinamento della superficie piezometrica al piano campagna, fino a raggiungere valori minimi inferiori ai 2 m (cfr. Tavola 4) in corrispondenza dell'abitato di Castelletto Po, nelle zone immediatamente a sud-est di Silvano Pietra, a ovest di Santa Giuletta e a nord-est di Casatisma, nonché in una vasta area pressoché compresa tra gli abitati di Broni, Pinarolo Po, Verrua, Mezzanino e Stradella.

In quest'ultimo ambito (cfr. zone a est e a sud-ovest di Barbianello) e nell'area a sud-est di Silvano Pietra si riscontrano locali fenomeni di emergenza delle acque sotterranee del tipo dei "fontanili" (già segnalate da Cotta Ramusino, 1982). Nell'area di Silvano Pietra il fenomeno (di carattere stagionale) è verosimilmente determinato dall'ostacolo al deflusso delle acque sotterranee dovuto al progressivo ispessimento dei materiali argillo-limosi presenti nella litozona superficiale (cfr. Tavola 3).

Nella zona di Barbianello le manifestazioni sorgive, più numerose e costanti, sono probabilmente dovute a locali affioramenti della superficie piezometrica in corrispondenza di bassure topografiche; le emergenze idriche risentono sicuramente del locale assetto strutturale (vicinanza della falda al piano campagna dovuta all'innalzamento del substrato) e della presenza di depositi superficiali dotati di un certo grado di permeabilità.

6.2.3 *Falde sospese*

L'esame dei dati stratigrafici e piezometrici disponibili ha spesso evidenziato, all'interno dei depositi che si sviluppano a tetto dell'acquifero considerato, la presenza di piccole falde sospese (cfr. paragrafo 6.1), caratterizzate da con-

dizioni di soggiacenza nettamente inferiori rispetto a quelle della falda principale.

La correlazione dei dati puntuali relativi a questi acquiferi superficiali ha consentito di evidenziarne l'estensione areale (cfr. Tavola 4): sono da segnalare a tal riguardo le zone pedecollinari tra Rivanazzano e Montebello, l'area di Casteggio e limitati settori in prossimità degli abitati di Voghera (a nord-est e sud-est dell'area urbana), Stradella, Broni e Ripaldina. Una diffusa presenza di falde sospese caratterizza inoltre la zona che, dallo sbocco in pianura del torrente Coppa, si estende fino ai centri di Oriolo, Pizzale, Lungavilla e Verretto.

La presenza di falde sospese interessa in prevalenza le aree caratterizzate dai maggiori spessori della coltre di copertura.

Questa considerazione indica chiaramente che in tali aree, apparentemente poco vulnerabili, è indispensabile eseguire specifiche indagini idrogeologiche di dettaglio, finalizzate alla verifica delle caratteristiche litologiche della copertura (grado di permeabilità effettivo e presenza di intercalazioni porose che possono costituire limitati orizzonti acquiferi).

6.2.4 *Variazioni temporali della soggiacenza*

È altresì opportuno sottolineare che le condizioni di soggiacenza, a differenza di quelle litologiche, non possono essere considerate un elemento statico in quanto, come noto, subiscono oscillazioni sia stagionali che periodiche, le prime legate ai fenomeni di ricarica e drenaggio della falda (precipitazioni, pratiche irrigue, scambi idrici con i corsi d'acqua, emungimenti ecc.), le seconde all'andamento del bilancio idrogeologico (cicli climatici, variazioni nel regime dei prelievi ecc.).

A tali fluttuazioni (sia in senso positivo che negativo) corrispondono ovviamente analoghe variazioni delle condizioni di vulnerabilità, in funzione della maggiore o minore distanza della zona satura dal piano campagna.

Le situazioni sussistenti nel territorio studiato, pur mantenendo nelle linee generali l'andamento illustrato in Tavola 4, possono pertanto subire consistenti modifiche di cui occorre tener conto per una valutazione del rischio di inquinamento nel lungo periodo.

A tal riguardo, sono state analizzate le serie storiche delle rilevazioni piezometriche effet-

tuate presso le stazioni di misura che sono state in attività nel territorio della pianura oltrepadana. Nella tabella di seguito riportata sono riassunti i dati caratteristici delle stazioni piezometriche prese in esame.

I dati relativi alle stazioni di Bressana, Mezzanino e Portalbera si riferiscono alla falda considerata per le elaborazioni riportate nelle Tavv. 3 e 4, mentre quelli della stazione di Stradella riguardano presumibilmente un orizzonte acquifero più superficiale (Peloso e Cotta Ramusino, 1989). Il confronto tra i valori minimi e massimi assoluti relativi ai periodi oggetto di osservazione evidenzia escursioni piezometriche variabili da 3,7 m a 5,3 m circa, con differenze più marcate nel settore orientale dell'area in studio (stazioni di Stradella e Portalbera).

Influenza dei fattori climatici sui livelli di falda

L'andamento dei livelli piezometrici risente marcatamente del regime termopluviometrico; da questo dipendono infatti gli apporti idrici per infiltrazione efficace e quelli derivanti da scambi con i corsi d'acqua superficiali.

Allo scopo di evidenziare gli influssi esercitati sui livelli di falda dai fattori meteorici, nei grafici 1-4 è stato posto a confronto l'andamento dei valori medi mensili della piezometria nelle stazioni sopra citate e quello delle precipitazioni registrate dall'osservatorio di Voghera (posto a quota 93 m s.l.m.).

I grafici evidenziano che l'effetto di ricari-

ca derivante dagli apporti meteorici si fa risentire sulla falda con un leggero sfasamento nel tempo; i massimi innalzamenti si verificano in genere nel periodo di fine inverno-inizio primavera, in conseguenza degli abbondanti apporti autunnali; la piezometria decresce poi linearmente, fino a raggiungere valori minimi nel periodo autunnale, a seguito della ridotta alimentazione estiva (le precipitazioni in questo periodo, per lo più destinate a reintegrare il deficit idrico del suolo, influenzano poco le riserve idriche sotterranee).

Il comportamento della piezometria rispetto alle precipitazioni è almeno in parte da riconnettere alla diffusione nel territorio di litologie superficiali poco permeabili che rendono difficoltosa la ricarica della falda per infiltrazione efficace.

In tutta la zona esaminata, i dati disponibili indicano che, nel periodo 1951-1990, i massimi innalzamenti piezometrici sono quelli osservati tra l'autunno 1976 e la primavera 1978; questa considerazione trova conferma anche nei valori rilevati in generale nell'ambito dell'intera pianura padana.

L'andamento piezometrico sul lungo periodo (cfr. serie storica di Bressana) evidenzia inoltre un netto trend negativo delle altezze di falda tra il 1978 e il 1987, solo in parte attenuato dal parziale recupero verificatosi nel 1985.

Queste oscillazioni trovano riscontro nell'andamento generale della pluviometria (si veda a tal proposito il grafico 9, in cui sono posti a

STAZIONE	Bressana Bottarone	Mezzanino	Stradella (Cascina Santa Croce)	Portalbera Cascina Durina
Ente gestore	Servizio Idr. Po	Servizio Idr. Po	Servizio Idr. Po	C. A. O.P.
longitudine (ovest M. Mario)	3°19'	3°15'	3°09'	3°07'50"
latitudine nord	45°05'	45°08'	45°05'	45°05'30"
periodo osservazioni	1914-1990	1914-1973	1914-1970	1946-1986
quota terreno (m s.l.m.)	65,7	59,5	75,75	60,84
quota piezometrica minima registrata (m s.l.m.) e relativa data	60,15 2/10/1960	55,77 28/08/1952	66,6 15/07/1928	58,84 06/1960
valore massimo di soggiacenza (m)	5,55	3,73	9,15	2
quota piezometrica massima registrata (m s.l.m.) e relativa data	64,16 09/03/1915	59,48 2/12/1926	71,87 28/03/1936	54,31 03/1975
valore minimo di soggiacenza (m)	1,54	0,02	3,88	6,53
massima escursione (m)	4,01	3,71	5,27	4,53

Tabella 2 - Dati relativi alle stazioni piezometriche di riferimento.

confronto le altezze piezometriche medie alla stazione di Bressana e i valori totali annui di precipitazione). Gli apporti meteorici annui hanno infatti subito un forte incremento tra il 1975 e il 1977 (con un massimo nel 1977 di 1100 mm circa) e, successivamente, una progressiva diminuzione fino al 1983. Negli anni successivi, è da segnalare il minimo storico degli ultimi 45 anni verificatosi nel 1989 (441 mm) e il forte incremento degli apporti tra il 1992 al 1996; i valori delle precipitazioni totali annue in tale periodo, sempre superiori agli 800 mm, hanno causato un consistente recupero dei livelli di falda. Nella zona di Portalbera (Cascina Durina) la tendenza all'abbassamento inizia nel 1964, in conseguenza degli emungimenti operati dai pozzi del Consorzio per l'acqua potabile dell'Oltrepò, presenti in zona (Peloso e Cotta Ramusino, 1989); essa torna successivamente a manifestarsi dopo il momentaneo recupero degli anni 1977-1978.

Influenza del regime idrometrico del fiume Po sui livelli di falda

Nelle stazioni più prossime all'alveo del fiume Po (Bressana, Mezzanino e Portalbera), le oscillazioni piezometriche sono inoltre condizionate, sia direttamente che indirettamente, dalle variazioni del livello idrometrico del fiume che, come già esposto, rappresenta, in regime normale, il principale elemento drenante della falda. I grafici 5, 6, 7 e 8 mostrano le relazioni esistenti tra le fluttuazioni piezometriche nelle stazioni considerate e le variazioni idrometriche medie mensili del fiume Po, registrate dall'idrometro del ponte della Becca.

Il confronto tra piezometria e idrometria mostra una buona correlabilità tra le due grandezze; questo aspetto, ben evidenziato dalle stazioni di Bressana, Mezzanino e Portalbera e, in

minor misura, da quella di Stradella, è da ricondurre agli effetti prodotti dalle modificazioni del livello di base della falda. Le variazioni del livello del fiume Po influenzano anche il sistema idrografico secondario, con effetti sull'entità dell'azione di ricarica della falda da parte dei corsi d'acqua.

L'andamento del livello piezometrico ha sicuramente risentito del *trend* negativo evidenziato dalle fluttuazioni idrometriche a partire dagli inizi degli anni Sessanta (cfr. grafico 5), in conseguenza dei fenomeni di inalveamento del fiume Po (capitolo 2).

Nel periodo tra il 1977 e il 1990, il forte accentuarsi dell'abbassamento idrometrico ha certamente contribuito a incrementare la depressione piezometrica dovuta alla diminuita ricarica per apporti meteorici.

Nel complesso, gli effetti del regime fluviale si risentono sulla piezometria con intensità decrescente allontanandosi dalle sponde fluviali e risultano più marcati quando le variazioni relative del livello idrometrico si mantengono per periodi di tempo prolungati.

Nelle zone più prossime all'alveo del Po, in situazioni di piena, si possono avere temporanei effetti di ricarica della falda da parte del fiume; tale possibilità scompare già a ridotte distanze dall'alveo fluviale, come evidenziato dal grafico 6, alla stazione di Mezzanino, relativamente prossima alla zona di ubicazione dell'idrometro della Becca, le quote idrometriche non hanno mai superato quelle piezometriche.

È ipotizzabile che gli innalzamenti idrometrici in fase di piena producano comunque variazioni positive nella piezometria, dovute soprattutto al momentaneo rallentamento delle velocità di deflusso delle acque sotterranee (Peloso e Cotta Ramusino, 1989).

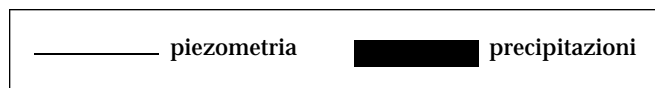
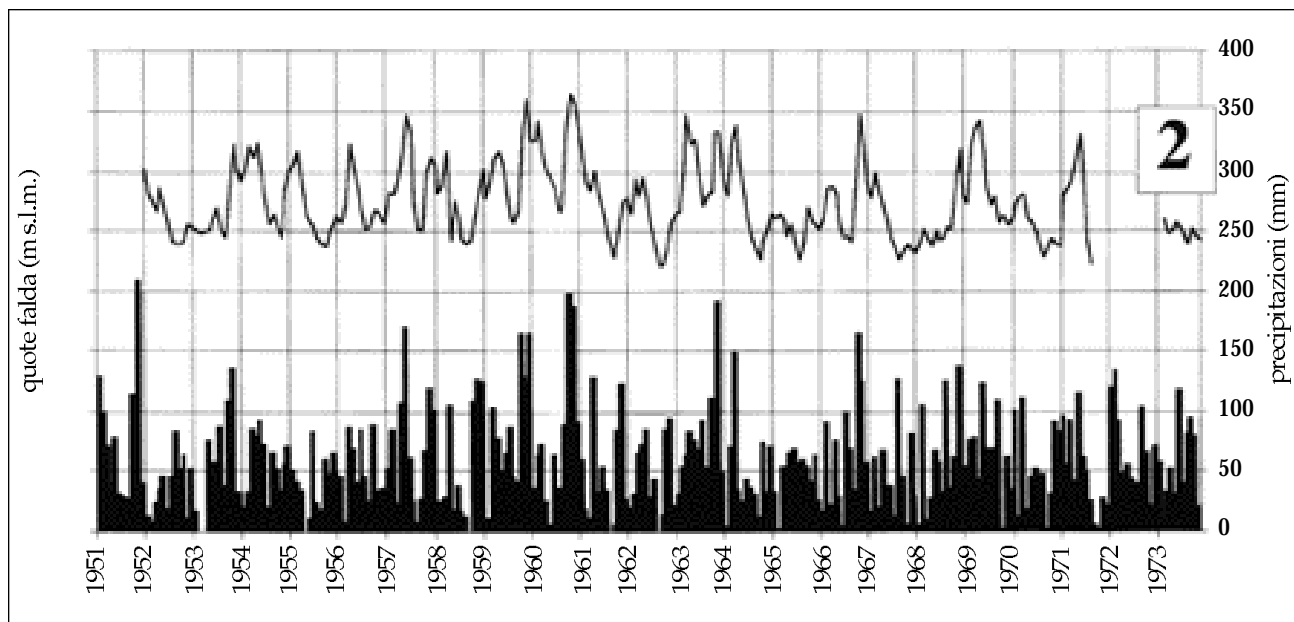
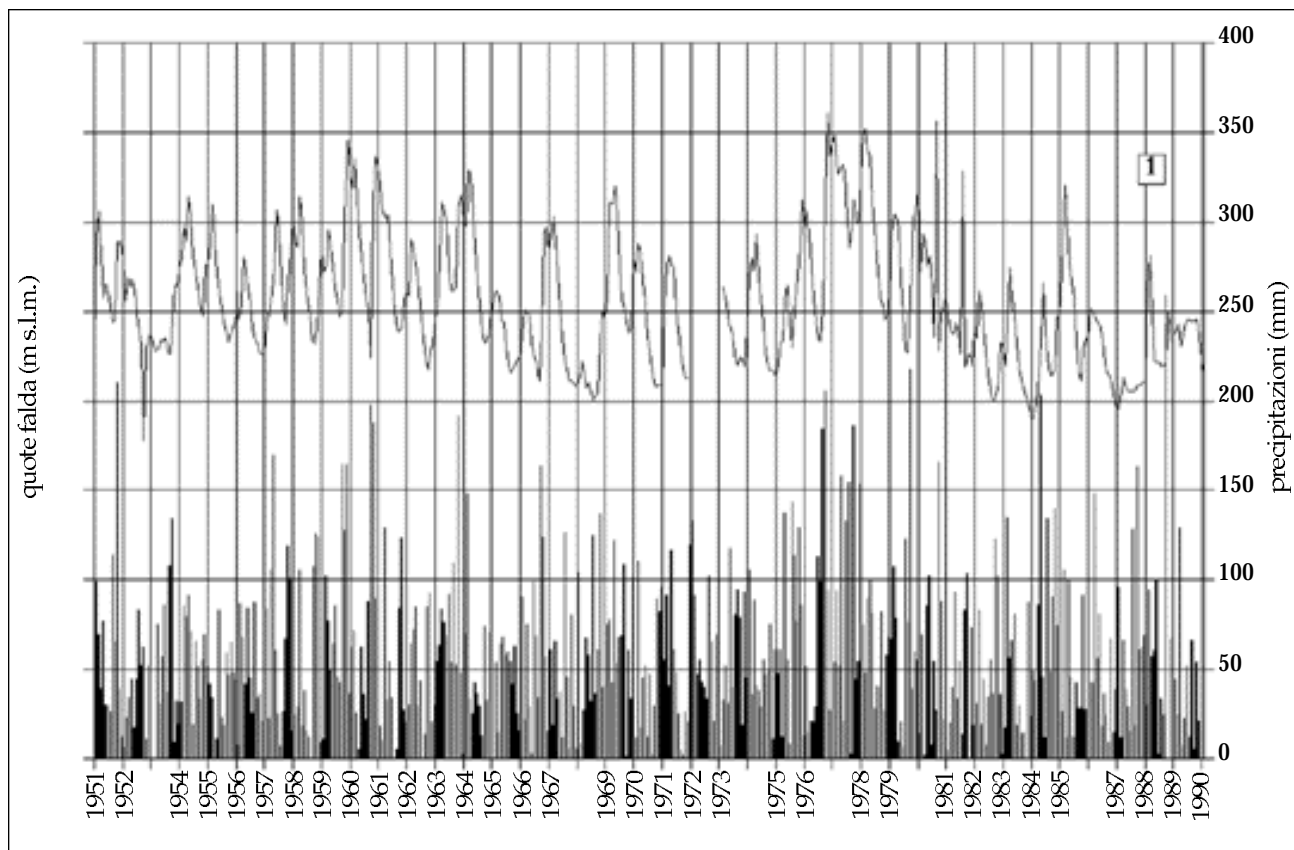


Figura 1 e 2 - Grafici delle altezze piezometriche a Bressana (1) e Mezzanino (2) in rapporto alle precipitazioni a Voghera.

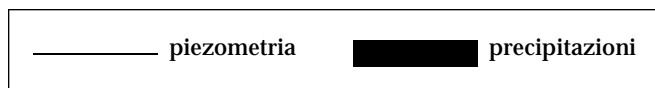
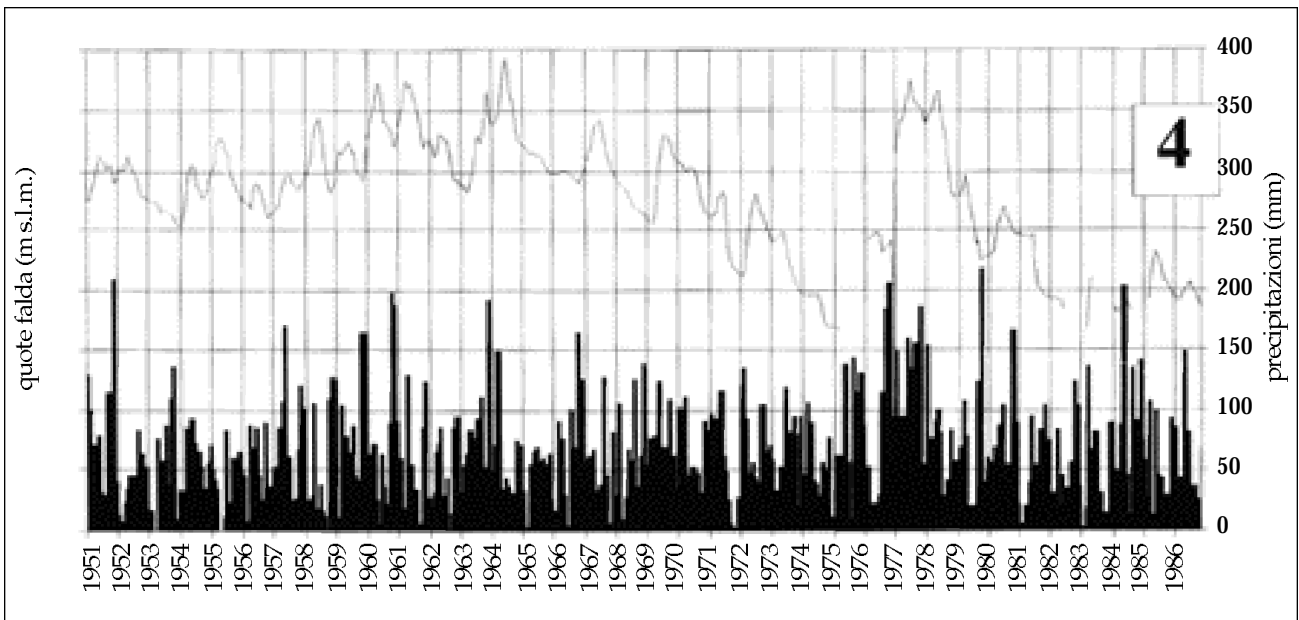
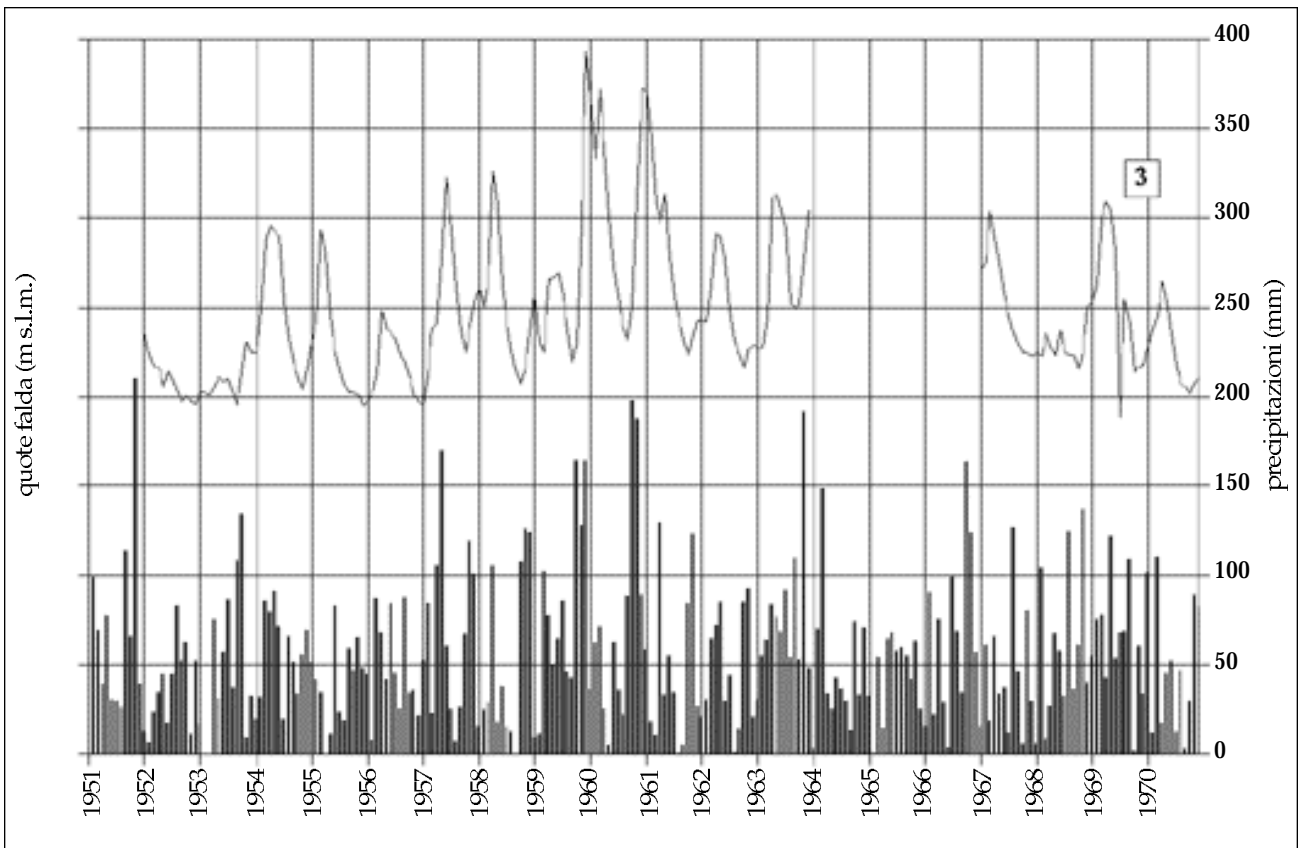
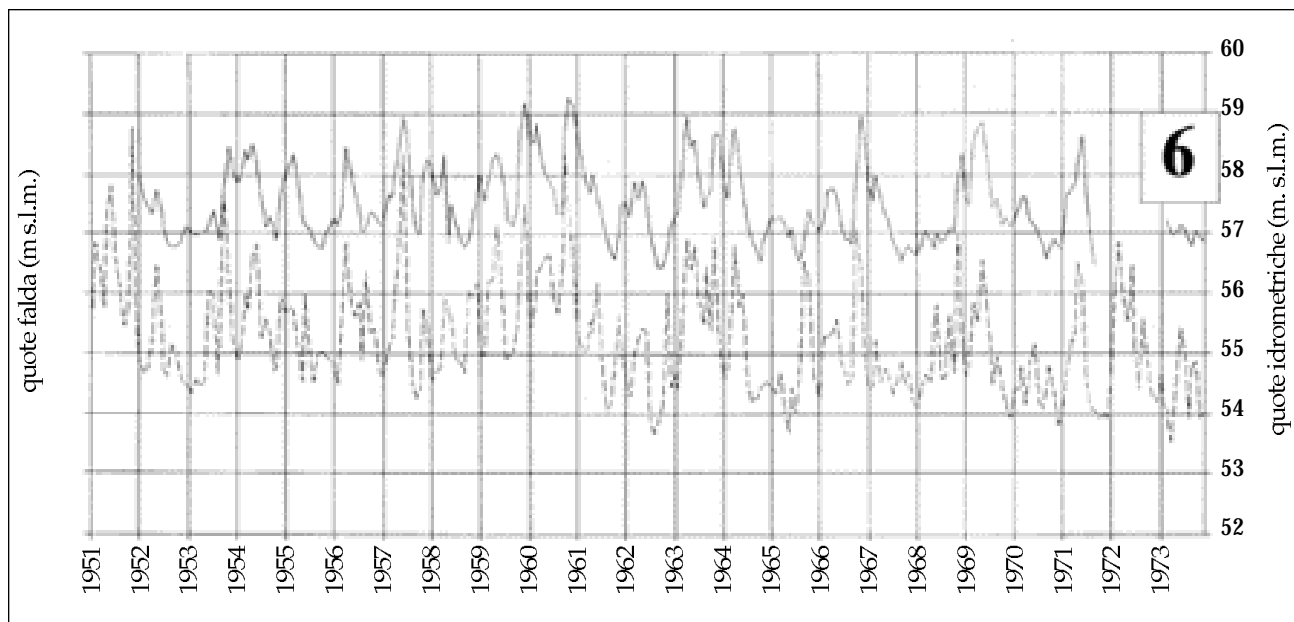
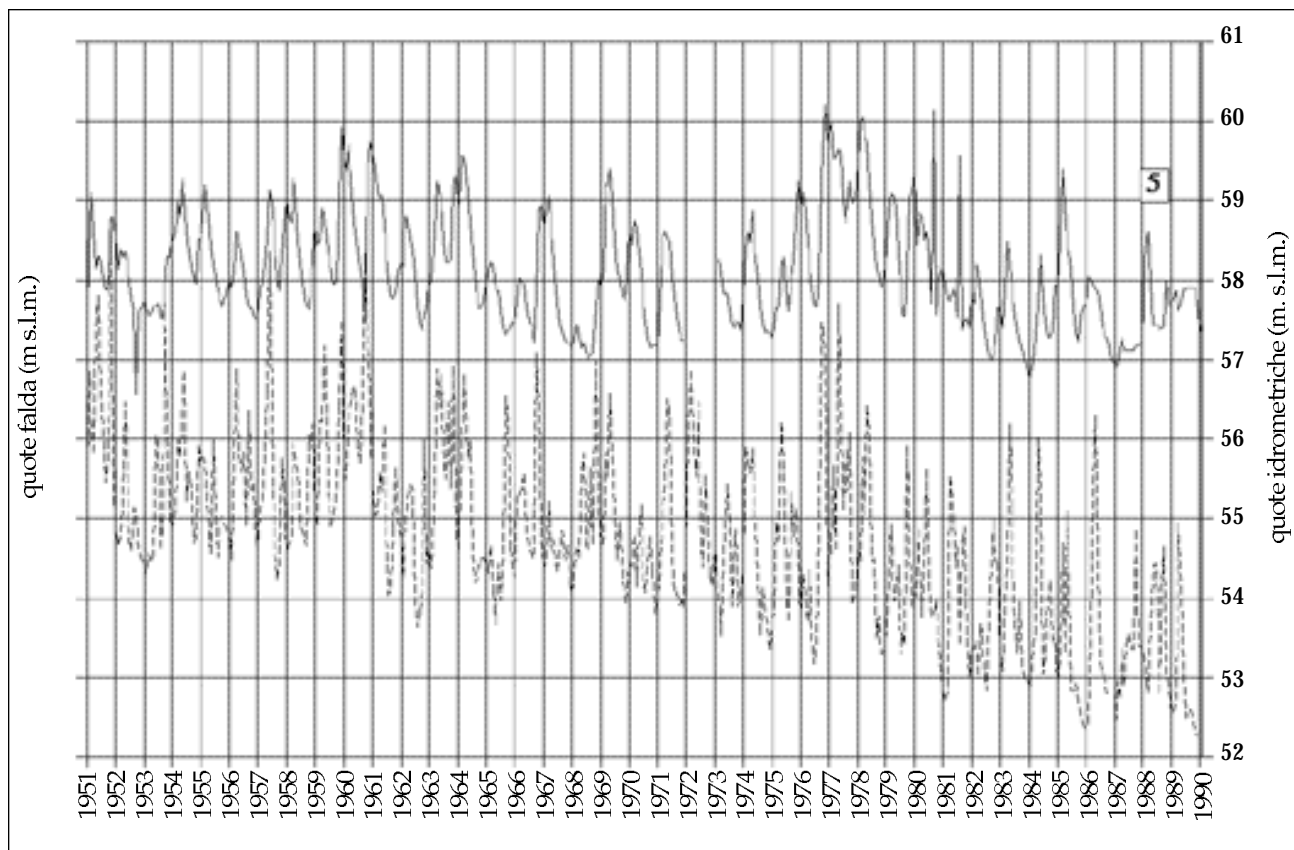
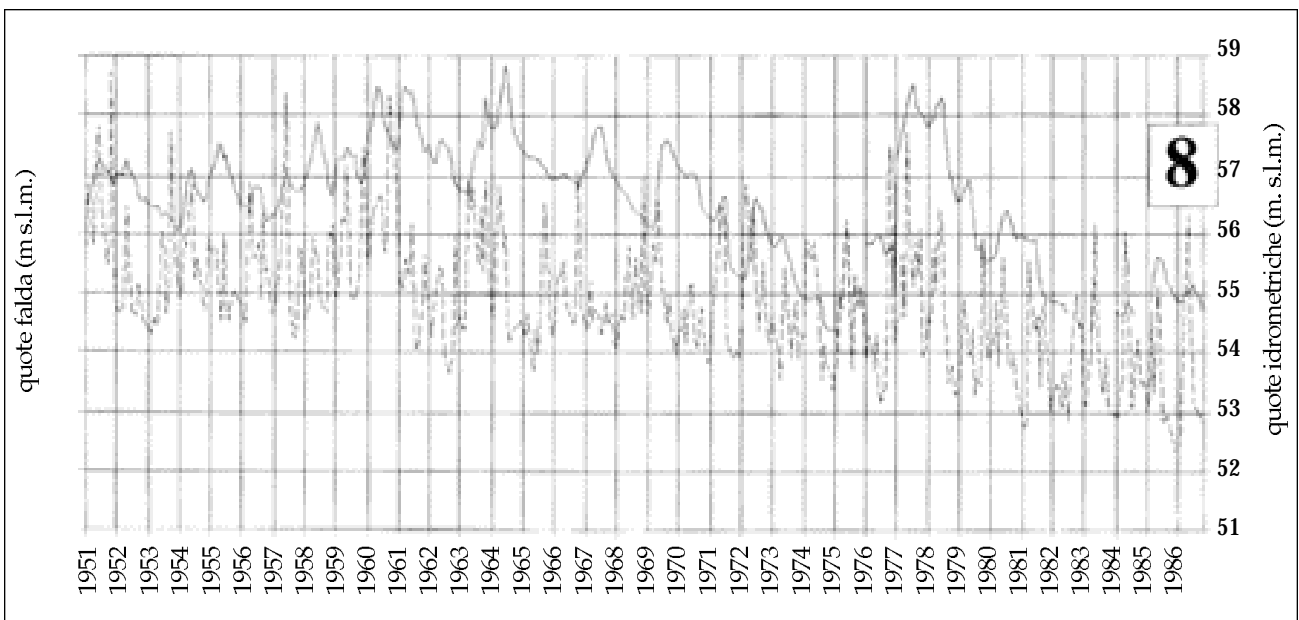
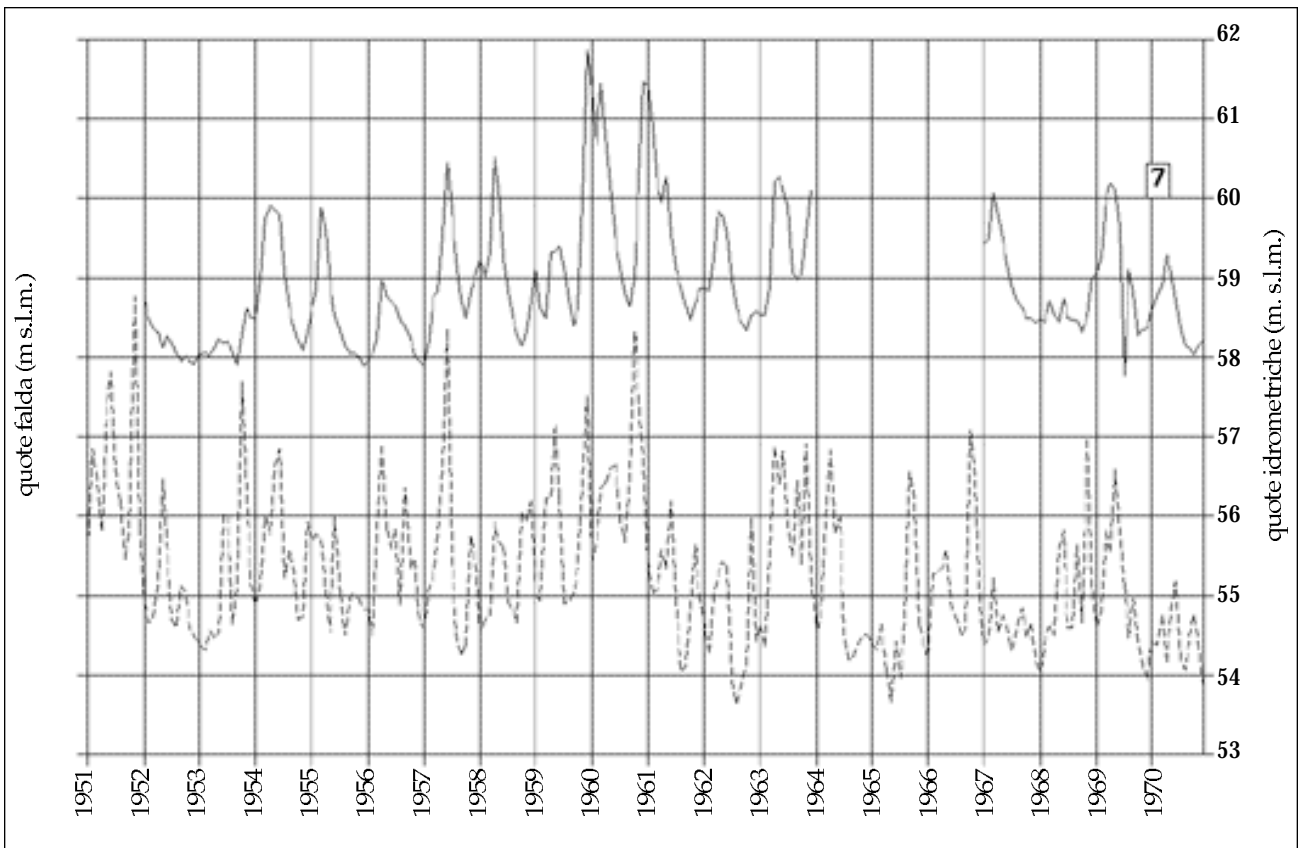


Figura 3 e 4 - Grafici delle medie mensili delle altezze piezometriche a Stradella (3) e Portalbera - Cascina Durina (4) in rapporto alle precipitazioni a Voghera.



———— piezometria altezze idrometriche

Figura 5 e 6 - Grafici delle medie mensili delle altezze piezometriche a Bressana (5) e Mezzanino (6) in rapporto alle quote idrometriche al ponte Becca.



———— piezometria altezze idrometriche

Figura 7 e 8 - Grafici

Capitolo 7

**Zonazione
del territorio
in funzione
della sua
vulnerabilità
all'inquinamento**

Premessa

L'insieme delle indagini esperite hanno consentito la messa a punto di un elaborato cartografico finale, di sintesi (Tavola 6), che fornisce, per le varie parti del territorio esaminato, una prima, seppur sostanziale, valutazione di compatibilità ambientale nei confronti di ipotesi di realizzazione di impianti o insediamenti pericolosi.

Esso fornisce, inoltre, un quadro di non indifferente valenza anche nei confronti di ogni altro intervento antropico di una certa consistenza, comportante modificazioni dell'attuale assetto fisico del territorio (cfr. per esempio attività estrattive, sbrancamenti in genere).

L'elaborato in parola deriva dalla sommatoria dell'incidenza dovuta ai singoli fattori di ordine geologico, idrogeologico, geomorfologico e idrografico.

A tal fine, ci si è valse, necessariamente, dei dati forniti dalle indagini che hanno portato alla messa a punto delle Tavole 1, 2, 3 e 4, all'interno delle quali il territorio già era stato valutato in funzione dei rischi connessi a ciascuno di detti fattori. In funzione dei fini specifici di questo lavoro, non sono state prese in considerazione le altre componenti che concorrono comunque a una più generale valutazione di impatto ambientale, quali per esempio l'attuale uso e le destinazioni d'uso del territorio, i vincoli esistenti di ordine urbanistico-territoriale, naturalistico ecc.

La combinazione delle varie classi di rischio prima definite ha permesso di giungere alla formulazione di un giudizio complessivo di compatibilità delle diverse zone del territorio, soprattutto nei confronti di attività a elevato impatto ambientale (suolo, acque superficiali e acque sotterranee).

Nelle zone collinari si è assunto, come riferimento di base, la suddivisione in unità idrogeologiche descritte al capitolo 4.2.

Esse sono state valutate anche sulla base di fattori di ordine geomorfologico (per esempio la presenza di aree interessate da movimenti gravitativi attivi o quiescenti), idrogeologico (zone interessate da una certa circolazione idrica sotterranea, anche se limitata alla coltre superficiale, documentata anche dalla presenza di sorgenti) e strutturale (presenza di dislocazioni fragili, in grado di indurre condizioni di fessurazione nelle successioni litologiche e, conseguentemente, un locale aumento delle infiltrazioni sotterranee accanto a una maggior predisposizione al dissesto).

Per le zone di pianura sono stati considerati prioritariamente gli elementi che concorrono a definire la vulnerabilità nei confronti delle acque sotterranee (entità della soggiacenza del primo acquifero e spessore delle coperture a bassa permeabilità).

È stata quindi effettuata una valutazione del grado di protezione complessiva della falda sulla base della somma dei loro valori nelle diverse aree. La zonazione del territorio così ottenuta è stata successivamente vista tenendo conto anche dei fattori di ordine idrografico (presenza di aree inondabili, erosione in atto o potenziale ecc.), geomorfologico (aree depresse a deflusso difficoltoso delle acque meteoriche, dossi fluviali idrograficamente centrifughi ecc.), idrogeologico (presenza di falde sospese rispetto all'acquifero superficiale, aree di potenziale ricarica del sistema acquifero).

In definitiva, nella tavola in parola è graficamente evidenziata la distribuzione areale delle classi di idoneità di seguito descritte.

7.1 Classe 1: aree a grado di idoneità bassissimo o nullo

Nelle aree di pianura rientrano in questa classe le zone inondabili dal fiume Po e quelle con grado di protezione della prima falda scarso o nullo, espresso da una somma dei valori di soggiacenza e degli spessori della copertura impermeabile complessivamente inferiore a 4 m; sono inoltre incluse in questa categoria aree a minore vulnerabilità, ma corrispondenti a depressioni topografiche e a fasce fluviali pensili.

I territori appartenenti a questa classe corrispondono alle aree golenali del fiume Po, alla maggior parte delle zone in cui sono riconoscibili paleomeandri dello stesso fiume e ad alcuni tratti delle fasce fluviali del torrente Curone (zona di Casei Gerola), del torrente Staffora (nei pressi di Oriolo), nonché i tratti terminali dei dossi fluviali del torrente Luria, del torrente Coppa, del Rile San Zeno, del Rile Verzate e del torrente Scuropasso. Sono state inoltre incluse diverse aree, con falda superficiale poco protetta, ricadenti nel territorio compreso tra San Cipriano Po, Mezzanino e la confluenza tra il fiume Po e il torrente Coppa.

Nel settore collinare rientrano in questa categoria tutte le zone interessate da movimenti attivi o quiescenti e le aree di affioramento di litologie a permeabilità da media a elevata (unità idrogeologiche 3 e 4 descritte al paragrafo 6.2).

Le zone interessate da problemi di stabilità sono largamente affioranti nel settore orientale dell'ambito considerato e, più sporadicamente, in quello occidentale.

Gli ambiti di affioramento di litologie relativamente permeabili, arealmente poco diffusi, si segnalano in particolare nella zona a nord ovest di Montalto Pavese e in quelle di Chiusani, Nazzano, Mondondone, Torricella Verzate, Caneto Pavese, Montecalvo Versiggia, Golferenzo.

7.2 Classe 2: aree a grado di idoneità basso

Nel settore di pianura rientrano in questa classe le zone con grado di protezione della prima falda medio-basso (somma dei valori di soggiacenza e degli spessori della copertura impermeabile compresa tra 4 e 12 m); sono inoltre inclusi in questa categoria i comparti caratterizzati da un grado di protezione della falda

medio, ma interessati da depressioni morfologiche, da fasce fluviali pensili o da piccole falde sospese. Nel settore pedecollinare è stata attribuita a questa classe la zona di primaria ricarica della falda da parte del torrente Staffora (apice del conoide torrentizio).

Le aree con grado di idoneità basso interessano diffusamente il settore orientale dell'ambito indagato (cfr. per esempio le zone sulle quali ricadono gli abitati di Portalbera, Albaredo Arnaboldi, Barbianello, Pinarolo Po, Bressana Bottarone), riducendosi sensibilmente verso ovest (cfr. territori di Pizzale, Porana, zone limitrofe a Casei Gerola e Silvano Pietra e tratti di monte dei dossi fluviali richiamati in precedenza), sia per il progressivo aumento della presenza di coperture impermeabili, che per gli incrementi dei valori di soggiacenza della falda.

Nel settore collinare corrispondono a questa classe le aree di affioramento di litologie a bassa permeabilità primaria (unità 1 e 2 descritte al paragrafo 4.2), ma interessate da una circolazione idrica locale dovuta all'assetto tettonico (unità 2) e/o alla presenza di coltri superficiali (unità 1); questa circolazione è in genere testimoniata dalla presenza di piccole sorgenti.

Si tratta per lo più di territori di estensione limitata, talora coincidenti con elementi tettonici.

7.3 Classe 3: aree a grado di idoneità medio

Rientrano in questa classe le zone di pianura con medio grado di protezione della prima falda (definito da una sommatoria dei valori di soggiacenza e degli spessori della copertura impermeabile compresa tra 12 e 20 m) e le zone con grado di protezione elevato, ma interessate da fasce fluviali pensili o dalla presenza di piccole falde sospese. Sono state inoltre incluse in questa categoria le alluvioni di fondovalle dei principali torrenti appenninici, spesso coincidenti con aree di ricarica della falda e le zone intermedie del conoide del torrente Staffora (da considerare, anche in questo caso, quali aree di alimentazione della falda, sia pure secondarie rispetto al settore apicale, già ricompreso nella classe precedente).

I comparti appartenenti a questa classe presentano una maggior estensione nel settore nord-occidentale dell'ambito considerato e nelle zone pedecollinari.

Nelle **aree collinari** appartengono a questa categoria le zone di affioramento di litologie a bassa permeabilità primaria (unità 1 descritta al paragrafo 4.2), interessate da fenomeni di tettonizzazione, nonché i sedimenti a dominante argillosa e ad assetto caotico derivanti da scompaginazione tettonica o movimenti gravitativi (formazione del “Caotico”, coltri detritiche e colluviali, corpi di frana). Questi terreni si segnalano in particolare lungo i versanti del torrente Ghiaia di Montalto e lungo ristrette fasce coincidenti con discontinuità tettoniche recenti.

7.4 Classe 4: aree a grado di idoneità elevato

In questa classe e nella successiva sono evidenziati i settori che presentano caratteristiche naturali complessivamente compatibili con un'eventuale attività a rischio di inquinamento, fatte salve le indispensabili verifiche geologiche, idrogeologiche e geotecniche di dettaglio.

Nel settore di pianura rientrano in questa categoria le zone che presentano un elevato grado di protezione della prima falda, definito da una somma dei valori di soggiacenza e degli spessori della copertura impermeabile compresa tra 20 e 28 m e da assenza di falde sospese; sono state inoltre incluse in questa classe le zone in cui detta somma supera i 28 m, ma interessate da fasce fluviali pensili.

Le aree in parola sono presenti nella zona di Voghera, (abitato e sue vicinanze), dove il basso grado di vulnerabilità è determinato essenzialmente dall'elevata profondità a cui si colloca la superficie piezometrica, e nelle zone di Casteggio, Robecco, Verretto, Lungavilla, dove sono presenti anche estese e potenti coperture argillo-limose. Nel settore orientale dell'ambito indagato si segnalano esclusivamente nella zona di Broni, per le locali condizioni litologiche.

Nell'**ambito collinare** un grado di idoneità elevato caratterizza le aree di affioramento delle litologie a bassa permeabilità sia primaria che secondaria (unità 1 descritta al paragrafo 6.2), non interessate da dislocazioni tettoniche o movimenti franosi e contraddistin-

te dalla pressoché totale assenza di falde idriche sotterranee. Le zone appartenenti a questa classe, sono largamente rappresentate per la diffusa presenza di litologie a dominante argillosa o marno-argillosa.

7.5 Classe 5: aree a grado di idoneità molto elevato

Si tratta di una classe individuata in carta nelle sole zone di pianura, e, in particolare, laddove si verifica il più elevato, in assoluto, grado di protezione dell'acquifero superficiale (sommatoria dei valori di soggiacenza e degli spessori della copertura impermeabile superiore a 28 m).

Le aree appartenenti a questa classe si collocano in una fascia compresa all'incirca tra il settore nord dell'abitato di Voghera e la zona di Casteggio e, nel territorio a sud di Voghera, fino agli abitati di Codevilla e di Retorbido.

Il primo di tali ambiti presenta le caratteristiche complessivamente più favorevoli, per la presenza dei più elevati valori sia delle coperture sia delle soggiacenze.

Nel secondo settore il grado di idoneità deriva essenzialmente dalle caratteristiche idrogeologiche locali (elevati valori di soggiacenza), in quanto le coperture presenti assumono spessori significativi solo in un limitato settore, posto al margine occidentale del settore stesso.

Nel **settore collinare** un grado di idoneità estremamente elevato caratterizza le zone in cui i depositi a permeabilità scarsa o nulla, privi di altre limitazioni, presentano spessori superiori ai 30/40 m. Queste zone non sono state tuttavia evidenziate in tavola, non essendo in possesso di specifici dati stratigrafici: Questi ultimi, a causa delle cattive condizioni di esposizione delle litologie, possono essere desunti solo da apposite perforazioni geognostiche profonde.

7.6 Valutazioni sul metodo adottato e suo raffronto con il metodo DRASTIC¹

Dalla trattazione precedente si evince che, per le zone di pianura, la determinazione del rischio

¹ Alla stesura di questo paragrafo e alle elaborazioni DRASTIC ha fornito un sostanzioso contributo Lazzarini A., collaboratore della Fondazione Lombardia per l'Ambiente.

di inquinamento dipende in larga misura dalle condizioni di vulnerabilità idrogeologica. Nei riguardi di quest'ultima, le valutazioni effettuate nel presente studio, basate essenzialmente sui parametri della soggiacenza e dello spessore delle coperture impermeabili, sono state verificate sulla base di altre metodologie di valutazione che utilizzano sistemi parametrici.

Al tale scopo, è stata elaborata una "Carta della vulnerabilità idrogeologica" (Figura 9), secondo il metodo DRASTIC (Aller *et al.*, 1985), che trova ampia possibilità di applicazione in una situazione come quella studiata. Questo metodo utilizza una classificazione che tiene conto dei seguenti sette parametri:

D = profondità della falda
 R = ricarica netta della falda
 A = mezzo acquifero saturo
 S = tipo di suolo
 T = inclinazione della superficie topografica
 I = mezzo acquifero aerato
 C = conducibilità idraulica

A ogni parametro viene applicato un peso che assume valori diversi per le aree non interessate (Drastic-a) o interessate da attività agricola (Drastic-b). Nel calcolo effettuato per l'elaborazione della carta sono stati adottati i pesi per le aree agricole, che risultano così suddivisi:

D = 5
 R = 4
 A = 3
 S = 5
 T = 3
 I = 4
 C = 2

Nel metodo utilizzato, ogni parametro è definito da un diagramma da cui è possibile ricavare il valore relativo al caso considerato. Il grado di vulnerabilità (indice Drastic) è espresso dalla sommatoria dei prodotti dei valori assunti dai singoli parametri, ciascuno moltiplicato per il rispettivo peso.

Sulla base dei calcoli effettuati sono state individuate le seguenti classi di vulnerabilità:

ID 80-120 Vulnerabilità bassa
 ID 120-160 Vulnerabilità moderata

ID 160-200 Vulnerabilità elevata
 ID 200-230 Vulnerabilità molto elevata

Il metodo DRASTIC è stato applicato alla prima falda. Le caratteristiche litologiche del mezzo acquifero e della zona insatura sono state desunte dalle stratigrafie disponibili; i valori di profondità della falda (o soggiacenza) sono espressi dalla Tavola 4, precedentemente descritta; la conducibilità idraulica è stata valutata sulla base delle caratteristiche granulometriche dell'acquifero e/o di valori di portata specifica dei pozzi esistenti; la ricarica è stata stimata in relazione alle condizioni di permeabilità superficiale, da cui dipende l'infiltrazione di acque meteoriche, e a fattori locali, quali l'alimentazione operata dai corsi d'acqua.

I restanti parametri sono stati valutati sulla base dei dati bibliografici disponibili.

È ovvio che, in corrispondenza dei numerosi laghi di cava, la vulnerabilità è da considerarsi massima; tuttavia, in funzione delle dimensioni relativamente limitate delle fosse di cava, la loro presenza non è stata considerata nello sviluppo del calcolo dell'indice Drastic.

La situazione messa in luce dalla carta evidenzia che la vulnerabilità, in linea generale, tende a incrementarsi nel settore orientale dell'area considerata, raggiungendo valori massimi in prossimità di Mezzanino e Verrua Po.

Nel settore occidentale (pianura vogherese) valori di vulnerabilità elevati si riscontrano nella zona di Rivanazzano (apice del conoide del torrente Staffora); locali incrementi dell'indice Drastic si segnalano anche in limitati settori nella zona di Voghera, a sud di Silvano Pietra e in prossimità dello sbocco del torrente Staffora. Tra le aree a minore vulnerabilità è da segnalare la zona Casteggio -Montebello.

Il confronto tra la distribuzione dei valori dell'indice Drastic e la zonazione della Tavola 6, precedentemente commentata, evidenzia alcuni aspetti significativi.

La maggior parte delle aree definite a vulnerabilità elevata o molto elevata con il metodo Drastic ricadono entro zone appartenenti alle classi 1 e 2 della Tavola 6 (grado di idoneità alla realizzazione di impianti pericolosi bassissimo o basso). In quest'ultima vengono tuttavia indicate maggiori estensioni delle aree a rischio di inquinamento, in quanto l'elaborazione tiene conto anche di fattori diversi da quello idro-

geologico (per esempio gli aspetti idrografici hanno portato a considerare al alto rischio l'intera zona golenale del Po).

Le valutazioni desunte dal metodo Drastic non sembrano pertanto in contrasto con la me-

todologia utilizzata nell'elaborazione della *Tavola 6*, i cui contenuti, in funzione delle specifiche tematiche trattate nel presente studio, presentano senz'altro maggiori e più dirette possibilità di applicazione.

Lavori citati

- Aa.Vv.** 1988. Proposta di una normativa per l'istituzione delle fasce di rispetto delle opere di captazione delle acque sotterranee. In: Francani V. e Civita M. (eds.), *GeoGraph*, Milano, 277 pp.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. e Petty, R.J.** 1985. Drastic: A Standardized System For Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeological Setting. EPA/600/2-85/018. National Water Well Association, Worthington.
- Aquater e Snamprogetti** 1982. Piano per il riassetto territoriale dell'Oltrepò Pavese - Documento di sintesi degli elaborati di studio relativi alla parte fisica e antropica. Regione Lombardia, Ufficio Speciale per l'Oltrepò Pavese.
- Arca, S. e Beretta, G. P.** 1985. Prima sintesi geodetico-geologica sui movimenti verticali del suolo nell'Italia settentrionale (1897-1957). *Boll. Geodesia e Scienze affini, IGM, anno XLIV*, 2, 125-156.
- Baroni, D., Cotta Ramusino, S. e Peloso, G.F.** 1988. La falda freatica nella pianura oltrepadana pavese e in quella alessandrina - considerazioni sulla vulnerabilità potenziale. *Atti Tic. Sc. Terra*, 31, 351-376.
- Boni, A.** 1967. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia. F. 59 Pavia, 68 pp., Roma.
- Boni, A., Boni, P., Peloso, G. F. e Gervasoni, S.** 1981. Dati sulla neotettonica del Foglio Pavia (59) e di parte dei Fogli Voghera (71) e Alessandria (70). C.N.R. Prog. Fin. Geod., sottoprog. Neotettonica, pubbl. n. 356, 1199-1244, Napoli.
- Braga, G. e Cerro, A.** 1988. Le strutture sepolte della pianura pavese e le relative influenze sulle risorse idriche sotterranee. *Atti Tic. Sc. Terra*, 31, 421-433.
- Braga, G., Bellinzona, G., Bernardelli, L., Casnedi, R., Castoldi, E., Cerro, A., Cotta, Ramusino S., Gianotti, R., Marchetti, G. e Peloso, G. F.,** 1976. Indagine preliminare sulle falde acquifere profonde della porzione di Pianura Padana compresa nelle provincie di Brescia, Cremona, Milano, Piacenza, Pavia e Alessandria. *Quaderno IRSA*, 28 L, (2), 45-76.
- Brambilla, G.** 1992. Prime considerazioni cronologico-ambientali sulle filliti del Miocene superiore di Portalbera (Pavia - Italia settentrionale). *Atti del Convegno di Casteggio PV*, 109-113, Casteggio.
- Carta Geologica D'Italia Scala 1:100.000 - F. 59 Pavia, II edizione, 1965, Roma.
- Carta Geologica D'Italia Scala 1:100.000 - F. 71 Voghera, II edizione, 1969, Roma.
- Cati, L.** 1981. Idrografia e idrologia del Po. *Pubbl. n. 19 Uff. Idrografico*, Roma.
- Cotta Ramusino, S.** 1982. Caratteri idrogeologici della prima falda acquifera nella zona di pianura dell'Oltrepò Pavese. *Atti Ist. Geol. Univ. Pavia*, 30, 171-181, Pavia.
- Dutto, F., Nardin, E., Cnr-Irpi** 1989. Intensità di processi erosivi lungo le sponde del fiume Po in territorio pavese. *Suolosottosuolo. Congr. Intern. di Geoingegneria*, Torino.
- Govi, M. e Turritto, O.** 1993. Processi di dinamica fluviale lungo l'asta del Po. *Acqua e Aria*, Giugno 1993, 575-588.
- Pellegrini, L. e Vercesi, P.L.** 1996. Considerazioni morfotettoniche sulla zona a sud del PO tra Casteggio (PV) e Castel San Giovanni (PC). *Atti Tic. Sc. Terra*, 38,85-118.
- Peloso, G.F. e Cotta Ramusino, S.** 1989. Idrogeologia della pianura bronese stradellina (Oltrepò Pavese) - caratteristiche dei corpi idrici sotterranei e considerazioni sul loro sfruttamento. *Atti Tic. Sc. Terra*, 32, 125-162.
- Pieri, M. e Groppi, G.** 1981. Subface geological structure of the Po Plain, Italy. C.N.R., *Pubbl. n. 414, Prog. Fin. Geod.*
- Scagni, G. e Vercesi P.L.** 1987. Il Messiniano tra la valle Versa e la Valle Staffora (Appennino pavese - vogherese). Considerazioni paleogeografiche. *Atti Tic. Sc. Terra*, 31, 1-20.
- Tropeano, D. e Olive, P.** 1993. Eventi geomorfologici nelle Alpi italiane e nella pianura occidentale del Po: inquadramento cronologico in base a radiodazioni ¹⁴C. *Il Quaternario* 6, 2, 189-204.

Altri lavori consultati

- Agip** 1973. Acque dolci sotterranee. Inventario dei dati raccolti dall'Agip durante la ricerca di idrocarburi in Italia. 914 pp., Grafica Palombi, Roma.
- Ambrosetti, P., Bosi, C., Carraro, F., Ciaranfi, N., Panizza, M., Papani, G., Vezzani, L. e Zanferrari, A.** 1987. Neotectonic map of Italy. *Quaderni della ricerca scientifica* 4, n. 114, 6 tav.
- Aquater - Enel** 1978. Interpretazione dei dati geofisici delle strutture plioceniche e quaternarie della Pianura Padana e Veneta. *GEOS./AAO153*, San Lorenzo in Campo.
- Bartolini, C., Bernini, M., Carloni, G. C., Costantini, A., Federici, P. R., Gasperi, G., Lazzarotto, A., Marchetti, G., Mazzanti, R., Papani, G., Pranzini, G., Rau, A., Sandrelli, F., Vercesi, P.L., Castaldini, D. e Francavilla, F.** 1983. Carta neotettonica dell'Appennino Settentrionale. Note illustrative. *Boll. Soc. Geol. It.*, 101, 523-549.
- Bellinzona, G., Boni, A., Braga, G. e Marchetti, G.,** 1971. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia. F. 71 Voghera, 121 pp., Roma.
- Boni, A.** 1980. Struttura geologica e sismicità del "territori" pavese. *Seminari Università di Pavia*, In: *Eventi Naturali e Antropici*, 153-277, Pavia.
- Boni, A.** 1985. Struttura geologica e sismicità in Lombardia. *Atti Ist. Geol. Univ. Pavia*, 30, 2.
- Bonora Mazzoli, G.** 1982. Le persistenze della centuriazione nell'ager Placentinus. *L'Universo*, anno LXII, n. 3, 367-420, I.G.M. Firenze.
- C.N.R.** 1985. Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980. P.F.G., 239 pp.
- C.N.R.** 1991. - Structural Model of Italy. Scale 1:1.000.000. Selca, Firenze.

- Cassano, E., Anelli, L. e Fichera, R.** 1990. Geophysical data along the northern Italian sector of the European Geotraverse. *Tectonophysics*, 176, 167-182.
- Cassano, E., Anelli, L., Fichera, R. e Cappelli, V.** 1986. Pianura Padana, interpretazione integrata di dati geofisici e geologici. AGIP, LXXIII Congresso Soc. Geol. It., 1-27.
- Castellarin, A., Eva, C., Giglia, G., e Vai, G.B.** 1985. Analisi strutturale del Fronte Appenninico Padano. *Giornale di Geologia*, s. 3°, 47/1-2, 47 - 75.
- Cremaschi, M.** 1987. Paleosols and vetusols in the central Po plain (Northern Italy) a study in Quaternary. *Geology and Soil Development*. Unicopli Ed., 306 pp., Milano.
- Gandolfi, R.** 1949. La faglia della Staffora. Sue caratteristiche in rapporto al sistema di fratture nel Vogherese. *Rend. Acc. Naz. Lincei*, s. VIII, 5, f. 1-2, 67.
- Gobetti e Perotti, C. R.** 1990. Genesi e caratteristiche dell'arco strutturale di Pavia. *Atti Tic. Sc. Terra*, 33, 143-156.
- IRSAC.N.R.** 1981. Indagine sulle falde acquifere profonde della Pianura Padana. *Quad. IRSA*, 51 (2) 70 pp. Roma.
- Lamberti, A.** 1987. Considerazioni sull'abbassamento dell'alveo del Po in relazione alla navigazione. *Navigazione Interna*, 1, 13-22.
- Lamberti, A.** 1993. Le modificazioni recenti verificatesi nell'asta principale del Po e problemi connessi. *Acqua e Aria*, giugno 1993, 589-592.
- Laureti, L. e Pellegrini, L.** 1993. Broni e Stradella, nell'Oltrepò Pavese. In Proposta di legenda geomorfologica a indirizzo applicativo. *Geogr. Fis. e Din. Quat.*, Vol. 16/2, 141-143.
- Lucchetti, L., Albertelli, L., Mazzei, R., Thieme, R., Bongiorno, D. e Dondi, L.** 1963. Contributo alle conoscenze geologiche del Pedepennino Padano. *Boll. Soc. Geol. It.*, 81, 4, 1-245.
- Marchetti, G., Mosna, S. e Vercesi, P.L.** 1978 b. Nuovi affioramenti di terreni paleogenici al margine dell'Appennino pavese (a est di Stradella) e loro possibile significato. *Atti Ist. Geol. Univ. Pavia*, 28, 87 - 95.
- Marchetti, G., Perotti, C., Vercesi, P.L. e Baroni, C.** 1981. Note illustrative degli elaborati cartografici presentati il 31/5/1980 (F. 60 Piacenza e 61 - Cremona p.p.) e il 31/3/1979 (F. 71 Voghera, F. 72 Fiorenzuola d'Arda, F. 83 Rapallo e F. 84 Pontemoli p.p.). C.N.R. Prog. Fin. Geod., sottoprogramma Neotettonica, pubbl. n. 356, 915-964, Napoli.
- Valle, G.** 1984. Appendice I alle note illustrative del Piano Provinciale cave di Pavia - schede descrittive dei ritrovamenti archeologici. Piano Cave della provincia di Pavia, 1 Tav., 178 pp.
- Vercesi, P.L. e Scagni, G.** 1985. Osservazioni sui depositi conglomeratici dello sperone collinare di Stradella. *Rend. Soc. Geol. It.*, 7, 23-27.

La **Fondazione Lombardia per l'Ambiente** è stata istituita dalla Regione Lombardia nel 1986 come ente di carattere morale e scientifico per valorizzare l'esperienza e le competenze tecniche acquisite in seguito al noto incidente di Seveso del 1976.

La Fondazione ha come compito statutario lo svolgimento di attività di studi e ricerche volte a tutelare l'ambiente e la salute dell'uomo con particolare attenzione agli aspetti relativi all'impatto ambientale di sostanze inquinanti.

A tal fine collabora, nei propri programmi di ricerca e formazione, con le università lombarde – rappresentate nel consiglio di amministrazione – il CNR, il Centro Comune di Ricerca di Ispra e gli organismi tecnici dei principali enti di ricerca nazionali e regionali.

La **Fondazione Lombardia per l'Ambiente** ha promosso e finanziato negli anni 1994/96 il Progetto coordinato di ricerca: "Gestione del territorio e smaltimento dei rifiuti tossici e nocivi".

Obiettivi del Progetto erano: metodiche di individuazione e di censimento, tramite sistematici piani di indagine esemplificativi svolti nella provincia di Pavia, delle aree contaminate a seguito di smaltimento abusivo di rifiuti potenzialmente pericolosi; la loro caratterizzazione, soprattutto ai fini della valutazione del rischio ambientale; la conseguente determinazione delle priorità di intervento; la definizione delle modalità di bonifica o di messa in sicurezza e di recupero finale. Oltre a questi temi erano state studiate nuove tecnologie di trattamento e di smaltimento di rifiuti potenzialmente pericolosi e i relativi aspetti giuridico-economici.

I risultati prodotti dal Progetto sono stati numerosi e ricchi di informazioni, dati e proposte utili per le amministrazioni locali e gli operatori del settore.

Il trasferimento e la valorizzazione del Progetto si sono tradotti nella predisposizione di tre volumi:

- Criteri per la valutazione della qualità dei suoli;
- Individuazione, caratterizzazione e campionamento di ammassi abusivi di rifiuti pericolosi;
- Criteri per la realizzazione di impianti di stoccaggio di rifiuti residuali.

Il presente volume, redatto a cura di alcuni ricercatori di una delle 12 Unità Operative che hanno partecipato al progetto (U.O. n. 5), si aggiunge ai tre precedenti.

In esso, utilizzando parte dei già ricordati numerosissimi dati ed elaborazioni contenuti nel Progetto, viene fornito il quadro delle diverse situazioni di rischio che caratterizzano il territorio dell'Oltrepò Pavese e del relativo margine collinare, non solo in relazione alla realizzazione di impianti di smaltimento di rifiuti, ma anche di insediamenti in genere, potenzialmente inquinanti.

Il tema è stato specificatamente trattato in funzione dei pericoli di contaminazione delle acque sotterranee e superficiali, dell'inondabilità e, per il settore collinare, anche dei fenomeni franosi.