

## Lineamenti di idrogeologia

### Generalità

L'Autorità di bacino del fiume Arno, nella prospettiva della redazione del bilancio idrico, ha ritenuto necessario procedere all'individuazione delle strutture acquifere del bacino stesso, basando tale attività sugli studi, indagini e rilievi esistenti, opportunamente interpretati ed omogeneizzati.

L'individuazione degli acquiferi è basata sulla distinzione e sulla disposizione dei principali massicci sedimentari e massicci rocciosi che li compongono o delimitano.

Le unità litologiche affioranti del bacino sulla base dello strato informativo 'geologia' derivato dalla Carta Geologica d'Italia 1:100.000, sono state classificate per permeabilità relativa e suddivise in riferimento all'intero territorio come segue:

rocce a permeabilità bassa	20,2%
rocce a permeabilità media	49,8%
rocce a permeabilità medio-alta	20,2%
rocce a permeabilità alta	9,8%

Tabella 8 – Ripartizione del territorio in classi di permeabilità

Rapportando tale classificazione ai singoli sottobacini, si può constatare la buona percentuale di litotipi giudicati a permeabilità alta o medio-alta nel Valdarno medio dove infatti, sono presenti importanti acquiferi.

Bacino	Alta	Medio-alta	Media	Bassa
Casentino	6,5	4,5	74,8	14,2
Chiana	3,3	27,1	46,6	22,8
Sieve	10,0	2,4	71,3	16,3
Valdarno inferiore	9,8	26,0	42,1	22,2
Valdarno medio	16,7	27,2	35,5	20,6
Valdarno Superiore	12,3	8,5	61,6	17,6

Tabella 9 - Distribuzione percentuale delle classi di permeabilità relativa per sottobacini

La permeabilità condiziona l'immagazzinamento di acqua nel sottosuolo: essa può essere per porosità primaria o secondaria dovuta alla fatturazione dell'ammasso roccioso.

Sempre dallo strato geologia è stata ricavata una seconda classificazione della permeabilità nella quale le classi di permeabilità sono state suddivise anche per tipologia, tramite degli accorpamenti ottenuti attraverso una tabella di relazione che tiene conto delle caratteristiche di permeabilità delle varie formazioni.

I dati provengono dalla digitalizzazione dei fogli in scala 1:100.000 realizzati dal Servizio Geologico Nazionale. Sono state acquisite come aree le formazioni

geologiche codificate sia utilizzando la codifica presente sui fogli originali, sia utilizzando una codifica mirata all'omogeneizzazione delle varie sigle formazionali in modo da ottenere un'unica legenda per tutto il bacino. Sono stati inoltre acquisiti come elementi lineari le faglie ed i sovrascorrimenti. A seguito di questa operazione è stato effettuato un accorpamento secondo classi di permeabilità.

<b>CLASS E</b>	<b>PERMEABILITÀ</b>	<b>AREA (Kmq)</b>	<b>%</b>
Formazioni geologiche permeabili per porosità primaria			
A	Classe A – Formazioni con permeabilità da praticamente nulla a bassissima	647.51	7.1
B	Classe B – Formazioni con permeabilità medio-bassa	219.48	2.4
C	Classe C – Formazioni con permeabilità medio	1540.27	16.9
D	Classe D – Formazioni con permeabilità medio-alta	2389.83	26.2
E	Classe E – Formazioni con permeabilità alta	145.96	1.6
Formazioni geologiche permeabili per fratture e, dove presente, per carsismo			
I	Classe I – Formazioni con permeabilità da praticamente nulla a bassissima	618.85	6.8
II	Classe II – Formazioni con permeabilità medio-bassa	2115.99	23.2
III	Classe III – Formazioni con permeabilità medio	167.13	1.8
IV	Classe IV – Formazioni con permeabilità medio-alta	1176.53	12.9
V	Classe V – Formazioni con permeabilità alta	88.02	1.0

*Tabella 10 - Distribuzione percentuale delle classi di permeabilità suddivise per tipologia*

Sulla base della suddivisione in formazioni geologiche permeabili per porosità primaria e per fatturazione, è stata quindi redatta la carta della permeabilità del bacino del fiume Arno. Come si evince dalla tabella sopra riportata le classi più rappresentate sono quelle a permeabilità media.

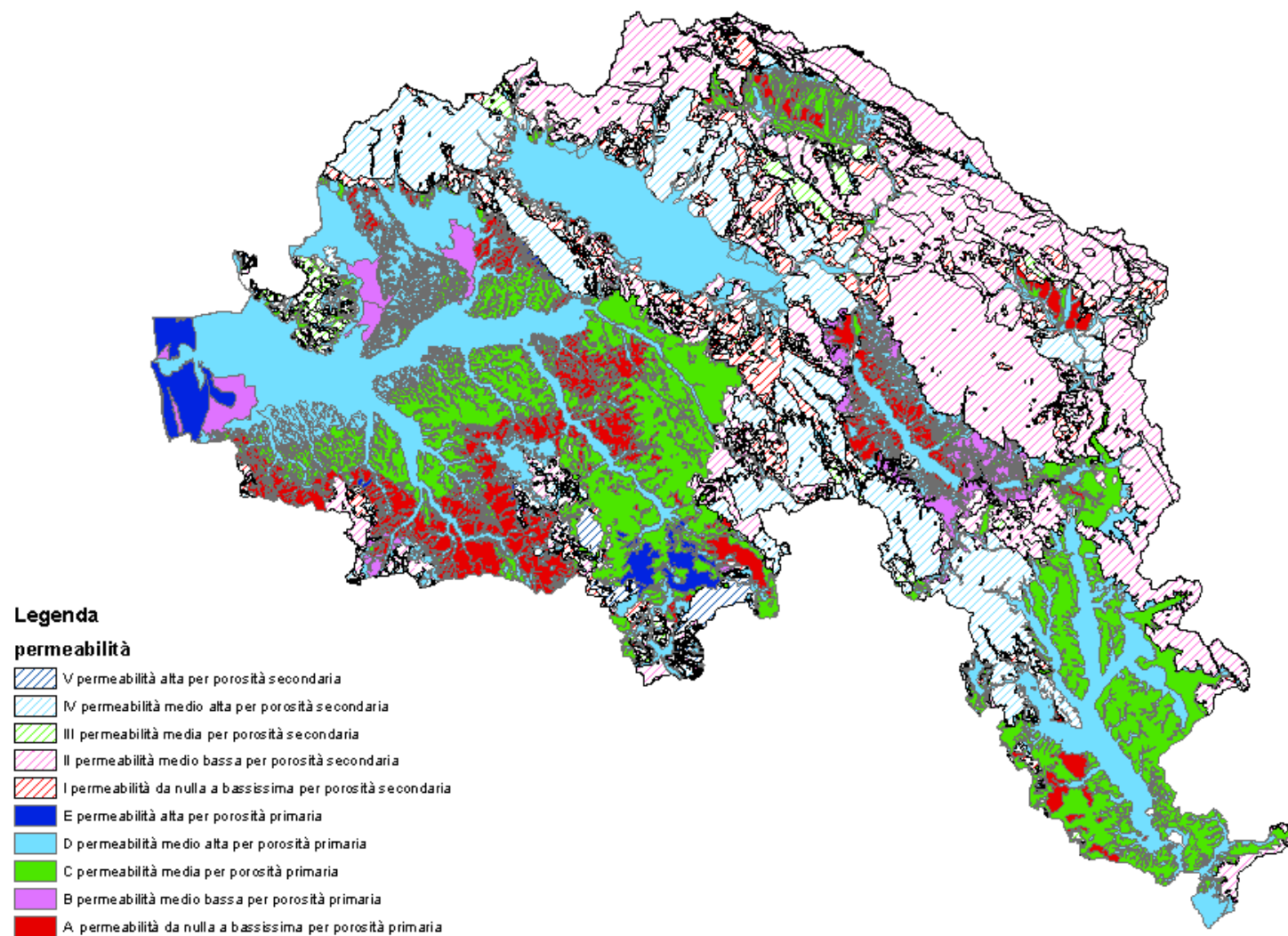


Figura 33 - Carta della permeabilità del bacino dell'Arno

L'infiltrazione efficace, cioè l'acqua che si infila nel sottosuolo e va ad alimentare le falde, dipende sia dalla permeabilità che dall'assetto della formazione geologica (pendenza). Altro fattore che influenza tale parametro è l'uso del suolo.

Nel bacino dell'Arno il litotipo dominante è quello delle rocce arenacee, che affiorano estesamente sulle dorsali che lo delimitano, caratterizzate da permeabilità relativa media e ricoprenti quasi il 50% del bacino, con conseguente l'infiltrazione efficace non elevata. Solo nelle formazioni in cui prevalgono le rocce carbonatiche carsificate l'infiltrazione efficace raggiunge valori elevati: queste formazioni però sono poco diffuse nel bacino dell'Arno (ad esempio la formazione del 'Calcare Cavernoso'). Nei sedimenti pliocenici l'infiltrazione efficace è da considerarsi trascurabile salvo nei litotipi a carattere prevalentemente sabbioso.

I terreni più permeabili sono quelli delle pianure alluvionali anche se, in molte aree, le ghiaie e le sabbie acquifere sono coperte da alcuni metri di limo argilloso di bassa permeabilità.

La bassa portata della grande maggioranza delle sorgenti è una conferma della scarsa permeabilità media delle rocce del bacino. Tra le sorgenti censite solo una, *Vene degli Onci*, nel Calcare cavernoso senese, ha una portata considerevole dell'ordine di 1000 l/s, contro valori medi di pochi litri al secondo. Tale condizione si riflette anche sul reticolo superficiale, caratterizzato in periodo di assenza di piogge da valori bassissimi di portata.

### ***I complessi idrogeologici***

Nonostante la prevalenza di rocce a bassa permeabilità nel bacino dell'Arno, le acque sotterranee costituiscono la risorsa più importante e più utilizzata. Infatti, oltre a fornire la maggior parte dell'acqua per usi agricoli ed industriali, i pozzi, ed in parte assai minore le sorgenti, rappresentano la risorsa principale per la maggior parte degli acquedotti civili; tra le principali città, solo Firenze ed Arezzo utilizzano in prevalenza acqua di superficie.

Il bacino è caratterizzato da una grande varietà di rocce e quindi suddiviso in unità idrogeologiche con caratteristiche di permeabilità assai diverse. Generalmente gli affioramenti di rocce permeabili sono poco estesi, il che comporta che gli acquiferi risultano frammentati e separati da rocce poco permeabili, che contengono risorse idriche singolarmente non elevate (salvo alcune eccezioni) ma complessivamente consistenti.

Dal punto di vista idrogeologico le formazioni del bacino possono essere raggruppate in complessi idrogeologici, che in funzione delle formazioni geologiche affioranti presentano simile assetto idrogeologico, produttività, vulnerabilità e facies idrogeochimica.

I complessi del bacino dell'Arno sono risultati i seguenti:

DQ – depressioni quaternarie: si tratta principalmente dei bacini villafranchiani del Casentino, Valdichiana, Valdarno superiore, Mugello, formatesi durante la fase distensiva post orogenica. Generalmente si tratta di potenti alternanze di sedimenti a permeabilità da media ad alta e porosità di tipo interstiziale. Le falde sono generalmente monostrato e non confinate nella parte alta delle pianure, multistrato e confinate nei settori vallivi.

AV - alluvioni vallive: si tratta di sedimenti alluvionali recenti dell'Olocene, affioranti diffusamente nelle pianure alluvionali del fiume Arno e dei suoi affluenti. La permeabilità, in genere medio – alta, risulta variabile in dipendenza della litologia dei

sedimenti; l'alimentazione avviene in modo diffuso in superficie e per infiltrazione dai fiumi che li attraversano, in particolare nelle zone di chiusura delle pianure alluvionali. La vulnerabilità degli acquiferi è generalmente elevata.

CA – calcari: questo complesso è costituito prevalentemente dalla Formazione di Monte Morello (Alberese), affiorante sui rilievi circostanti la pianura di Firenze Prato Pistoia, fra i quali riveste particolare importanza dal punto di vista idrogeologico il massiccio dei Monti della Calvana, sede di fenomeni di carsismo, sui Monti del Chianti e in Casentino; appartengono a questo complesso anche la formazione del Calcare Cavernoso e i Travertini recenti affioranti nell'area della Montagnola Senese. La permeabilità è di tipo secondario per fratturazione o dissoluzione dovuta a carsismo. L'alimentazione avviene prevalentemente in modo diffuso sull'intera superficie di affioramento; nelle zone con carsismo sviluppato l'alimentazione può avvenire anche in modo concentrato tramite inghiottitoi.

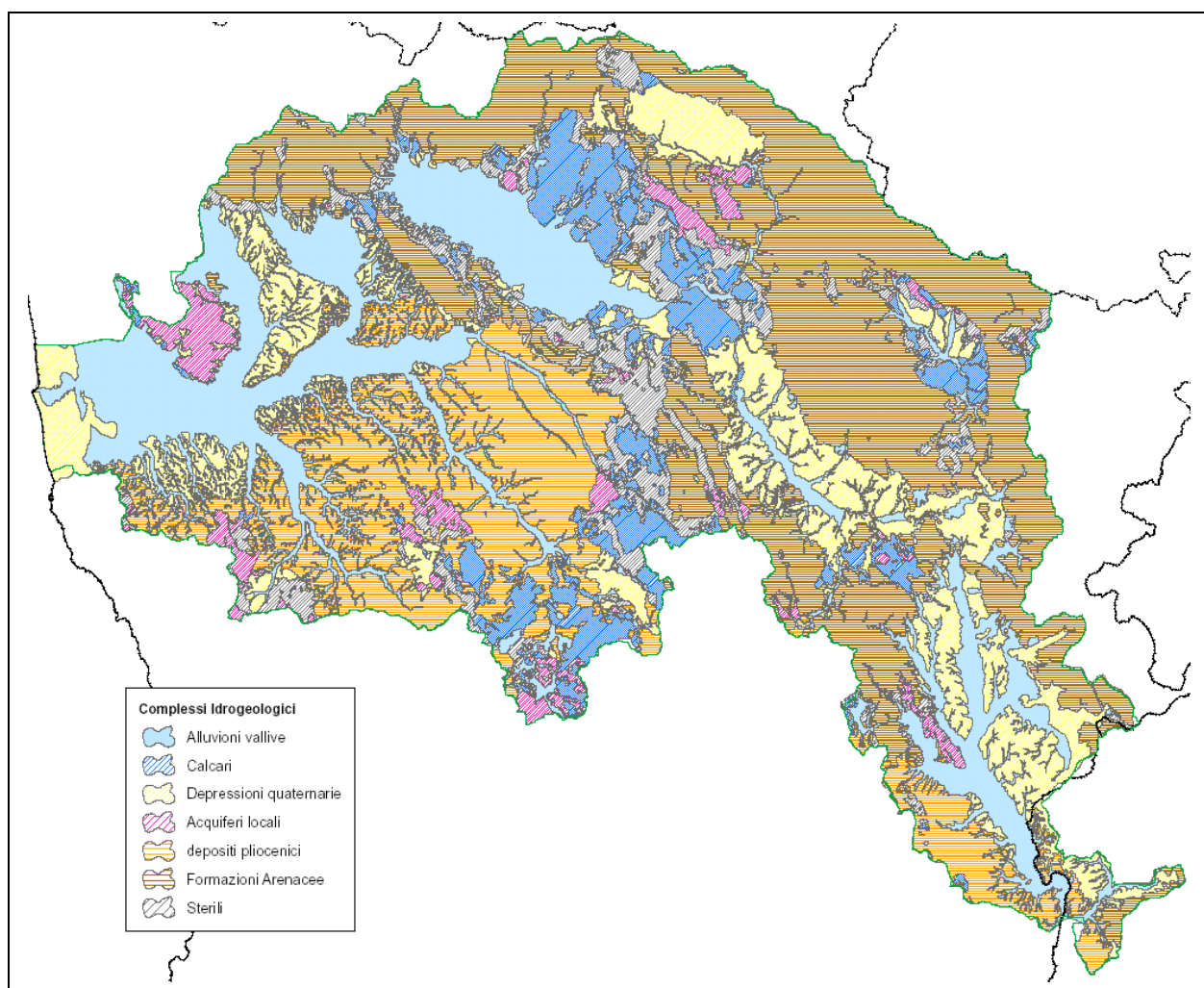


Figura 34 – I complessi idrogeologici del Bacino dell'Arno

LOC acquiferi locali: Sono raggruppati litotipi differenti che ospitano acquiferi di produttività variabile, generalmente sfruttati a livello locale. La permeabilità è generalmente modesta per porosità e/o fratturazione in funzione del litotipo. Poiché la maggior parte del territorio appartiene a questo tipo di complesso idrogeologico, lo

stesso è stato ulteriormente suddiviso, in funzione della rilevanza ai fini dello sfruttamento della risorsa idrica, nei seguenti sub complessi:

- formazioni marine plioceniche sedi di falde confinate multistrato che raggiungono anche notevoli profondità; la permeabilità è generalmente medio bassa, ad eccezione dei termini più sabbiosi;
- formazioni prevalentemente arenacee appartenenti ai flysh terziari del dominio tosco romagnolo, sedi di acquiferi fratturati che localmente vengono sfruttati anche ad uso idropotabile;
- formazioni metamorfiche del Monte Pisano e formazioni arenacee appartenenti al dominio ligure, sede di acquiferi fratturati di importanza locale.

STE zone sterili: sono formazioni a cui appartengono depositi flyschiodi marnoso-argillosi dell'Appennino, con permeabilità da scarsa a nulla.

### ***Gli acquiferi del bacino del fiume Arno***

Dal punto di vista della circolazione idrica nel sottosuolo si possono distinguere due grandi gruppi di acquiferi, quelli permeabili per porosità e quelli permeabili per fratturazione.

Gli acquiferi delle pianure alluvionali appartenenti al complesso delle Alluvioni vallive e in parte al complesso delle depressioni quaternarie, sono quelli più produttivi e più sfruttati.

#### ***Acquiferi per porosità***

A questa categoria appartengono i sedimenti granulari non consolidati che vanno dalle sabbie alle ghiaie e ai ciottolami. Hanno una elevata porosità primaria (formatasi insieme al sedimento, come spazio intergranulare) e quindi possono immagazzinare buone percentuali d'acqua, sino al 40% del volume; la loro permeabilità aumenta con le dimensioni dei granuli. Si tratta di sedimenti marini o continentali (fluvio-lacustri e fluviali), formati dal Miocene all'Attuale.

Gli acquiferi di questa categoria possono essere divisi in due gruppi, in base alla loro importanza.

Gli acquiferi più importanti sono i depositi alluvionali recenti, distribuiti dall'Arno e dai suoi affluenti nel periodo geologico più recente (Pleistocene Superiore - Olocene). Sono costituiti da ghiaie e sabbie, la cui permeabilità varia in funzione della percentuale di limo e argilla. Questi acquiferi sono presenti, anche con spessori di varie decine di metri, nelle pianure dei bacini intermontani ed in quelle costiere, ma se ne trovano anche in corrispondenza delle valli minori, sia pure in strisce sottili e di spessore limitato.

I sedimenti alluvionali sono in genere ben alimentati, sia dall'infiltrazione delle acque di pioggia sia dagli alvei fluviali; in qualche caso usufruiscono anche della ricarica laterale e profonda delle rocce incassanti. Ciò rappresenta un elemento importante, in quanto la buona alimentazione consente di compensare l'acqua estratta dai pozzi (sempre che i pompaggi non superino la ricarica media annuale).

Si deve osservare che, in generale, le ghiaie e le sabbie affiorano solo nei conoidi fluviali, ovvero nelle zone in cui i corsi d'acqua sboccano nelle pianure e/o nella parte alta delle loro valli; nella maggior parte delle pianure gli acquiferi sono coperti da qualche metro di limo argilloso o sabbioso, che corrisponde al materiale sedimentato a

seguito degli eventi alluvionali. Pertanto la litologia affiorante, di solito a bassa permeabilità, non deve essere considerata rappresentativa dell'intero spessore delle alluvioni.

Nelle pianure alluvionali si trovano le falde idriche più importanti e quindi più sfruttate. Ciò dipende da vari fattori: oltre la buona permeabilità dei sedimenti alluvionali, sono fattori importanti la produttività delle falde idriche e la loro facile captazione, con pozzi generalmente poco profondi ed ubicati nelle zone stesse di utilizzazione.

Alla stessa categoria di rocce permeabili per porosità appartengono i sedimenti marini del Pliocene (sabbie e conglomerati), e quelli fluviolacustri dei bacini intermontani. Questi depositi hanno generalmente una permeabilità minore, rispetto a quella dei sedimenti alluvionali, in quanto contengono generalmente una consistente frazione fine (limo ed argilla). Inoltre questi sedimenti presentano spesso una continuità spaziale minore, che impedisce la formazione di falde estese e consistenti e, in alcuni casi, in particolare per i depositi marini del Pliocene, l'acqua non è di buona qualità per la presenza di cloruri e solfati.

Questi acquiferi minori sono sfruttati localmente per i diversi usi tra cui anche quello potabile.

#### *Acquiferi per fratture*

In questa categoria sono ricompresi gli acquiferi in rocce consolidate, solitamente di età anteriore al Miocene, nelle quali l'acqua circola in corrispondenza di una rete di discontinuità formatesi successivamente al consolidamento della roccia: in genere si tratta di fratture, originate da movimenti tettonici o da processi di alterazione; nel caso delle rocce carbonatiche può risultare importante la rete di canali carsici, che si forma in seguito alla corrosione della roccia stessa da parte delle acque circolanti.

Le formazioni geologiche permeabili per fratturazione possono essere riunite in tre gruppi in base alla diversa permeabilità media e all'importanza delle falde che contengono.

Gli acquiferi migliori sono le formazioni carbonatiche mesozoiche: si tratta di rocce calcaree o dolomitiche, senza interstrati argillosi o marnosi, nelle quali la carsificazione ha prodotto talvolta una rete di canali di grandi dimensioni (anche grotte esplorabili), in cui l'acqua si muove con velocità dello stesso ordine di grandezza di quella della rete idrica superficiale.

Queste formazioni sono poco estese nel bacino dell'Arno. In Val d'Elsa è il Calcere Cavernoso che ha una elevata permeabilità e che contiene notevoli quantità di acqua; tuttavia l'elevata durezza e il tenore in solfati la rendono inadatta all'uso potabile, salvo processi di addolcimento o miscelamento con acqua meno dura, quale quella delle sorgenti del Monte Amiata, come viene fatto, ad esempio, per l'acquedotto di Siena. Il Calcere Cavernoso del Monte Maggio e del Poggio del Comune, nell'alta valle dell'Elsa, è la roccia serbatoio dell'acqua che emerge alla sorgente Vene degli Osci (portata media di  $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ ); anche se la sorgente è ubicata in corrispondenza delle sabbie del Pliocene, il suo chimismo a solfato di calcio e magnesio indica che l'acqua risale, attraverso una faglia, dal substrato di Calcere Cavernoso.

Acquiferi per fratture di minore importanza sono alcune formazioni arenacee della Successione Toscana, in particolare il Macigno di età Oligocene-Miocene: alcuni pozzi perforati nel Pratomagno, sul versante del Valdarno Superiore, e nel Monte Albano, fra Carmignano e Serravalle Pistoiese, hanno fornito portate fino a 15 litri al secondo.

Durante lo scavo delle gallerie per la linea ferroviaria ad alta velocità Bologna – Firenze, sono state intercettate delle fratture aperte a direzione appenninica (NW-SE) nella Formazione Marnoso-arenacea della dorsale del Giogo, con flussi idrici fino a 100 l/s, in seguito diminuiti per l'abbassamento del livello piezometrico. Quindi, anche questa formazione, ritenuta a bassa permeabilità, può diventare un acquifero interessante se ci sono le condizioni strutturali favorevoli.

Di minore importanza, rispetto agli acquiferi carbonatici mesozoici, sono quelli delle formazioni calcareo-marnose delle Unità Liguri, quali la Formazione di Monte Morello che affiora abbastanza estesamente nei dintorni di Firenze: nelle zone con poche marne ed argilliti, ed in corrispondenza delle faglie e fratture, i pozzi possono dare portate di qualche litro al secondo.

Gli acquiferi nei mezzi fessurati sono meno utilizzati di quelli alluvionali per motivi essenzialmente legati alla difficoltà di realizzazione delle opere di captazione e alla produttività non elevata.

In conclusione, le falde idriche delle pianure alluvionali rappresentano la risorsa idrica di sottosuolo di gran lunga più importante nel bacino dell'Arno; ma è anche quella più sfruttata e più esposta all'inquinamento, sia per la elevata vulnerabilità intrinseca (le falde sono in genere a piccola profondità, scarsamente protette dal terreno sovrastante), che per la presenza diffusa di fonti di inquinamento potenziale.

### ***Caratterizzazione degli acquiferi significativi delle pianure alluvionali***

Ai fini della redazione del Bilancio Idrico è risultato necessario caratterizzare geometricamente gli acquiferi più importanti del bacino. In tale contesto è da inserirsi lo studio relativo alla caratterizzazione degli acquiferi significativi delle pianure alluvionali del bacino dell'Arno, realizzato nel corso del 2005 dalla Segreteria dell'Autorità di bacino.

Tale attività costituisce quindi elemento essenziale per la redazione del bilancio idrogeologico degli acquiferi, così come indicato, tra l'altro nelle *“Linee guida per la predisposizione del bilancio idrico di bacino, comprensive dei criteri per il censimento delle utilizzazioni in atto e per la definizione del minimo deflusso vitale, di cui all' art. 22, comma 4 del dlgs 11 maggio 1999, n. 152”* emanate dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio con decreto del 28 luglio 2004, nonché integrazione ed aggiornamento del quadro conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque, approvato con delibera di GRT n. 6 del 25 gennaio 2005.

L'individuazione dei corpi idrici sotterranei ha preso peraltro avvio dai dati conoscitivi del Piano di Tutela, in base al quale sono considerati significativi i corpi idrici di interesse regionale e/o con caratteristiche ambientali di rilevante importanza contenuti nelle seguenti tipologie di formazioni geologiche:

- depositi alluvionali, lacustri e marini Quaternari (che formano le pianure intermontane e costiere);
- formazioni carbonatiche (Calcari Mesozoici ed Eocenici);
- Vulcaniti Quaternarie.

La perimetrazione dei corpi idrici è stata redatto sulla base della cartografia geologica in scala 1:100.000, integrata con vario materiale bibliografico raccolto.

L'indagine di dettaglio si è limitata ai corpi idrici significativi degli acquiferi delle pianure alluvionali, che peraltro rappresentano la quasi totalità della risorsa idrica sotterranea del bacino.

Per una lettura più snella del dato conoscitivo, relativamente a ciascun acquifero è stata realizzata una scheda informativa generale contenente i dati e le informazioni disponibili, con particolare riferimento alle stratigrafie ed alle caratteristiche idrostrutturali del corpo idrico.

### *Metodi di indagine sugli acquiferi*

L'analisi e la modellazione degli acquiferi è una tematica che ha avuto uno sviluppo notevole negli ultimi anni, anche sulla spinta della necessità di avere una conoscenza quanto più accurata possibile delle falde, della loro sfruttabilità, del loro "grado di salute", nonché come strumento conoscitivo e gestionale. Per tale analisi è basilare la conoscenza dettagliata della conformazione geologica e della disposizione spaziale degli acquiferi, sia in senso orizzontale che verticale, in modo ad esempio da poter localizzare le zone di particolare vulnerabilità e quantificare la diffusione di un eventuale inquinante a partire da un focolaio di contaminazione tramite sondaggi mirati nelle zone a maggior rischio.

Nell'affrontare uno studio delle acque sotterranee occorre innanzitutto individuare le unità idrogeologiche presenti per identificare e delimitare i singoli acquiferi in esse contenuti con il riconoscimento del tipo di falda (libera o confinata).

Una volta identificato l'acquifero, occorre stabilire le formazioni del tetto e quelle del substrato della falda, in modo da poterne stimare l'estensione e lo spessore, estrapolando con criteri geologici i dati puntuali forniti dalle litostratigrafie di pozzi e sondaggi e dalle indagini geofisiche. La ricostruzione della morfologia del substrato ha anche un valore pratico in quanto permette di individuare le aree più favorevoli alla perforazione di pozzi e di programmarne la profondità.

Una volta definito il *contenitore*, tramite misure dei livelli piezometrici nei pozzi, è possibile ricostruire la superficie freatica o piezometrica e quindi determinare l'ubicazione delle zone di ricarica o di drenaggio. Ciò consente un'analisi del deflusso delle acque sotterranee e dell'interazione tra falda e reticolo fluviale. Infine le prove di portata in pozzo permettono la caratterizzazione idrodinamica dell'acquifero (trasmissività e permeabilità) e l'effettiva valutazione dell'entità delle risorse sfruttabili.

Ai fini della ricostruzione geometrica dei livelli acquiferi, rivestono un'importanza sostanziale le indagini di sottosuolo, finalizzate al rilievo delle litostratigrafie. Tali indagini si basano essenzialmente sulla geologia tradizionale, ma utilizzano anche metodi e strumenti della tecnologia moderna, quali le diverse tecniche di prospezione geofisica, le perforazioni, la geochimica e la successiva analisi numerica per il trattamento dei dati e l'elaborazione di modelli matematici.

Le principali tipologie di indagine si dividono in *dirette* e *indirette*.

Le indagini *dirette* danno informazioni più affidabili sulle caratteristiche idrogeologiche delle rocce nel sottosuolo e sulla presenza e qualità dell'acqua contenuta. Si possono effettuare *sondaggi meccanici* che prelevano direttamente campioni di terreno alle diverse profondità, oppure sondaggi geofisici in cui si introduce nel pozzo una sonda che rileva la variazione di alcuni parametri misurabili (elettrici, magnetici).

I campioni di terreno si prelevano di solito al momento della perforazione per un nuovo pozzo di sfruttamento; il tipo di campione e il tipo di indagine di laboratorio dipendono dal metodo di scavo usato. Da campioni indisturbati si possono ottenere informazioni sulla litologia, sulla permeabilità e sulla porosità, mentre campioni disturbati consentono di ottenere informazioni solo di tipo litologico.

Il tipo di indagine diretta più significativa, almeno per il numero e la disponibilità dei dati, deriva dalla perforazione di pozzi; i dati utilizzati per il presente lavoro sono in buona misura relativi alle relazioni redatte a corredo delle richieste di perforazione di pozzi da cui si desumono, oltre alla stratigrafia del sottosuolo e ai livelli acquiferi captati, anche le caratteristiche idrogeologiche del corpo idrico sotterraneo, attraverso l'esecuzione di prove di portata.

Altro tipo di indagine diretto per la ricostruzione del sottosuolo è il *carotaggio geognostico*, attraverso il quale si desume la stratigrafia. Dall'esame di campioni indisturbati delle carote estratte si possono ottenere parametri idrogeologici quali la permeabilità, peraltro ottenibile anche con prove in situ.

In campo ambientale l'adozione di tecniche di indagine indiretta, quali le *prospezioni geofisiche*, si è fortemente diffusa nell'ambito degli studi di contaminazione del sottosuolo e delle acque sotterranee in quanto permette di ottimizzare i tempi e le risorse impiegate grazie a un'immediata caratterizzazione del sito inquinato. Con un'indagine di questo tipo si riesce spesso a individuare e localizzare eventuali focolai di contaminazione (reali o probabili), ad avere un quadro delle situazioni critiche e delle loro priorità di analisi, dove sarà poi decisiva un'indagine diretta.

Le esplorazioni geofisiche maggiormente applicate nel campo dell'idrogeologia sono i *metodi elettrici e elettromagnetici* che si basano sulla misura di differenti grandezze quali:

- la resistività o conducibilità elettrica;
- la permeabilità magnetica;
- la permeabilità elettrica o costante dielettrica;
- le cariche elettriche degli elementi e dei composti, il loro peso atomico e molecolare.

Tra questi i metodi più utilizzati sono quelli elettrici, sia perché richiedono un'attrezzatura relativamente poco costosa, sia perché sono di impiego abbastanza semplice. Sono metodi non invasivi finalizzati a fornire sezioni verticali del sottosuolo, dalle quali poter individuare la presenza di falde acquifere o di evidenti anomalie rispetto al contesto geolitologico circostante, spesso correlate ad aree inquinate, cavità o corpi anomali (fusti metallici, fusti plastici, scorie inquinanti, ecc).

In generale le rocce compatte e prive di porosità hanno un'alta resistività, essendo i minerali dei buoni isolanti, mentre la resistività dei mezzi porosi è molto variabile. Essa infatti dipende in modo sostanziale dalla quantità di acqua presente nei pori e dalla concentrazione dei solidi disciolti in essa, per cui risulta difficile attribuire un valore univoco di resistività a una data litologia senza avere indicazioni più specifiche anche su altri parametri.

Attraverso l'esecuzione di sondaggi elettrici verticali (SEV) si ottiene per ogni verticale di indagine una elettrostratigrafia dalla interpretazione della quale si ottiene la stratigrafia del sottosuolo. Con questo metodo si riesce a distinguere abbastanza fedelmente i livelli più grossolani (ghiaie e sabbie) dai livelli argillosi o limosi e dal substrato roccioso.

#### *Dati utilizzati*

Per la ricostruzione geometrica dei livelli acquiferi presenti nel sottosuolo è indispensabile avere la litostratigrafia delle aree di studio.

A tal fine è stata condotta una consistente attività di ricerca, finalizzata alla raccolta e archiviazione delle stratigrafie disponibili.

In particolare sono stati utilizzati gli archivi delle concessioni idriche dell'Autorità di bacino, la banca dati stratigrafica dell'Arpat, gli archivi Visark delle Province, gli archivi e informazioni degli ATO nonché il materiale reso disponibile da Università e studi professionali.

Di seguito sono elencate le principali fonti delle stratigrafie utilizzate per aggiornare e completare il database.

Autorità di bacino del fiume Arno – Archivio concessioni ex dlgs 152/99

Autorità di bacino del fiume Arno – Quaderno n. 10 (2001) – Bilancio idrogeologico nel Bacino dell'Arno. Felici ed., Pisa.

Archivio visark – Archivio delle concessioni della Provincia di Firenze

Archivio visark – Archivio delle concessioni della Provincia di Arezzo

Banca dati stratigrafica della Toscana - ARPAT – Agenzia Regionale Protezione Ambientale – Sistema Informativo Regionale Ambientale della Toscana

Banca dati ATO 3 – rapporto sui pozzi ad uso acquedottistico anno 2003 Rapporto interno

Baldacci F., Bellini L. & Raggi G. (1994) – Le risorse idriche sotterranee della Pianura Pisana. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., serie A, Vol. CI.

Banchelli A (2004) – Studio degli acquiferi della Val di Chiana. Relazione per l'Autorità di bacino del fiume Arno.

Comune di Firenze - Comune di Firenze - Servizio Geologia - Banca Dati Geologico Tecnici e Stratigrafici

Capecchi F., Guazzone G. & Pranzini G. (1976a) - Ricerche geologiche e idrogeologiche nel sottosuolo della pianura di Firenze. Boll. Soc. Geol. Ital., XCVI (4), 1975, 661-692.

Capecchi F. & Pranzini G. (1986) - Studi geologici e idrogeologici nella pianura di Pistoia. Boll. Soc. Geol. Ital., CIV (4), 1985, 601-620

Consorzio manutenzione acquedotto – Comuni di Peccioli, Capannoni e Terricciola – Ricostruzione tramite prospezione geoelettrica dei depositi alluvionali del F. Era nel territorio circostante la centrale dell'acquedotto – Monzali S., Tarchi O.

Regione Toscana - Criscuolo (in corso) Regione Toscana, Area Tutela delle Acque Interne e Costiere, Dipartimento delle Politiche Territoriali e Ambientali - Studio per la delimitazione dei corpi idrici significativi - Dr. Renato Criscuolo (in corso)

Gabbani G., Monzali S., Pranzini G. & Tarchi O. (1989) - I depositi alluvionali del Valdarno Superiore Fiorentino. Boll. Ingegneri Prov. di Firenze. n.3, 1989, 3-7

Getas Petrogeo – Ampliamento e ottimizzazione del campo pozzi di Montelupo – indagini idrogeologiche di dettaglio per l'ubicazione dei nuovi pozzi produttivi (rapporto eseguito per PUBLISER 1995)

Getas Petrogeo – Pianura d'Arno tra Montelupo e Sovigliana, Modello idrogeologico degli acquiferi (rapporto eseguito per PUBLISER 1998)

Getas Petrogeo – Campo pozzi Farfalla “Studio per l’ottimizzazione della produttività del campo pozzi” (rapporto eseguito per PUBLISER 1995)

Getas Petrogeo – Campo pozzi Prunecchio “Indagini geoelettriche per il reperimento di nuovi temi di ricerca idrica” (rapporto eseguito per PUBLISER 1998)

Getas Petrogeo – Centrale Sovigliana – indagine idrogeologica per l’ accertamento delle caratteristiche quali – quantitative del campo pozzi e per l’ ubicazione di un nuovo pozzo (rapporto eseguito per PUBLISER 1996)

Getas Petrogeo – Ampliamento e ottimizzazione del campo pozzi di Montelupo – indagini idrogeologiche di dettaglio per l’ ubicazione dei nuovi pozzi produttivi (rapporto eseguito per PUBLISER 1995)

Getas Petrogeo – Campo pozzi di Arnovecchio (rapporto eseguito per PUBLISER 1998)

Getas Petrogeo – Studio idrogeologico per il potenziamento degli acquiferi della Valdinievole (1999)

Getas Petrogeo – Acquedotto di Castelfiorentino – campo pozzi Profeti e zona sportiva – Studio per l’ ottimizzazione della produttività del campo (rapporto eseguito per PUBLISER 1995)

Getas Petrogeo – Centrale acquedotto di Molino di Roglio Comune di Palaia (PI) “Indagine di dettaglio per l’accertamento delle caratteristiche idrogeologiche all’esterno dell’area della centrale” (rapporto eseguito per PUBLISER 1996)

Francalanci P., Gabbani G., Monzali S., Neroni E., Pranzini G. (1988) – Ricostruzione dei depositi alluvionali del Valdarno Superiore Aretino. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem. Seria A Vol XCV pagg. 1 –17

Landini F., Pranzini G. & Venturucci E. (1990) - La falda idrica della conoide di Prato (Firenze). Acque Sotterranee, Giugno 1990, 48-70.

Protocollo d’intesa tra AdB e Provincia di Pistoia stipulato in data 8 gennaio 2003 finalizzato allo - Studio sugli acquiferi della pianura dell’Ombrone Pistoiese (in corso)

Protocollo d’intesa tra Autorità di bacino del Fiume Arno, Provincia di Pisa e Acque Ingegneria s.r.l. – Studio stratigrafico deposizionale dei depositi di sottosuolo del Valdarno inferiore finalizzato alla definizione geometrica degli acquiferi a cura di G. SARTI (2006)

Provincia di Lucca - Barsanti Sani & Nollodi 1997 Provincia di Lucca Settore Ecologia - Studio sulla vulnerabilità all'inquinamento della Piana di Lucca - Barsanti Sani & Nollodi, 1997

Provincia di Pisa – Settore Pianificazione del Territorio – Servizio difesa del Territorio – Studio della piana alluvionale del Fiume Era mediante prospezione geoelettrica: analisi dell’ area compresa tra Capannoli e loc. I Cappuccini: Bracci G., Del Tredici F., Montagnani F. (1994)

Scidà S. (2000) – Studio idrogeologico e valutazione del rischio d’inquinamento nel Valdarno Inferiore. Tesi di laurea, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra. Relatore G. Gabbani.

Tarchi V. (1998) – Studio idrogeologico dei depositi alluvionali del Casentino. Tesi di laurea, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra. Relatore G. Pranzini.

Vieri A. (1996) – Studio idrogeologico della pianura di Pisa. Tesi di laurea, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra. Relatore F. Baldacci

### *Organizzazione dei dati disponibili*

L'inserimento, l'organizzazione e l'interpretazione dei dati raccolti è stata condotta utilizzando il progetto su piattaforma Esri ArcView 3.2 Sira\_Dbgeo realizzato da ARPAT – Agenzia Regionale Protezione Ambientale – Sistema Informativo Regionale Ambientale della Toscana.

La banca dati risulta costituita da:

- coordinate (Gauss-Boaga) e la quota sul livello del mare del punto che identifica la stratigrafia;
- profondità da piano campagna dei singoli strati;
- descrizione litologica dello strato non codificata, riportata in modo fedele a quella originale della perforazione o sondaggio che ha originato la stratigrafia;
- interpretazione del “tipo” idrogeologico dello strato, cioè se sia acquifero, acquitardo od acquicludo, in relazione alle sue caratteristiche intrinseche di permeabilità;
- eventuale interpretazione di formazioni geologiche del sottosuolo o, comunque, *in unità idrogeologiche di sintesi del sistema acquifero* (copertura, acquifero in m. s.l., substrato, eventuali interstrati di separazione in sistemi locali multifalda) per le stratigrafie che interessano i CISS (Corpi Idrici Sotterranei Significativi).

I dati sono stati organizzati sotto forma di shapefiles e tabelle e la loro visualizzazione può essere effettuata tramite un apposito progetto su piattaforma ESRI ArcView, che consente la visualizzazione dei dati sia in singole colonne che in sezioni schematiche di correlazione. Ogni strato di una colonna stratigrafica appare con una campitura differente, su sfondo bianco, a seconda della permeabilità che lo caratterizza; quando allo strato è stato associato il codice corrispondente a una certa unità idrogeologica e/o geologica, la campitura appare su sfondo colorato in dipendenza del tipo di formazione geologica o di unità idrogeologica individuata.

### *Interpretazione idrogeologica – le unità idrogeologiche*

Una unità idrogeologica è un dominio dotato di un'unità stratigrafica, strutturale e morfologica, ai cui limiti si verificano delle condizioni idrodinamiche che annullano o comunque ostacolano le possibilità di travasi d'acqua e al cui interno i termini litologici sono complessivamente omogenei nel tipo e nel grado di permeabilità e con comportamento più o meno omogeneo nei riguardi dell'infiltrazione, dell'immagazzinamento e del movimento delle acque sotterranee. L'identificazione della suddetta unità si basa prevalentemente su criteri geologici, idrodinamici e idrochimici.

Gli studi stratigrafici e strutturali a larga scala permettono di individuare le grandi idrostrutture, quali i bacini sedimentari di origine detritica che colmano fosse tettoniche o zone di subsidenza, le conche quaternarie, le pianure alluvionali. Per identificare gli acquiferi nelle pianure alluvionali e nei bacini intermontani si rende però necessaria la ricostruzione degli orizzonti di ghiaie e sabbie che di solito sono intercalati con limi e argille. Per questa ricostruzione non sono sufficienti i dati geologici di superficie, ma occorrono indagini geofisiche o perforazioni che permettano di ottenere stratigrafie di maggior dettaglio.

I limiti delle unità idrogeologiche sono rappresentati da elementi stratigrafici o tettonici che condizionano in modo sostanziale la circolazione idrica sotterranea, sbarrandola

parzialmente o totalmente. Di solito si tratta di contatti fra complessi geologici a permeabilità relativa molto diversa. L'identificazione di massima di questo dominio si effettua con l'ausilio di carte geologiche, sezione geologiche e foto aeree.

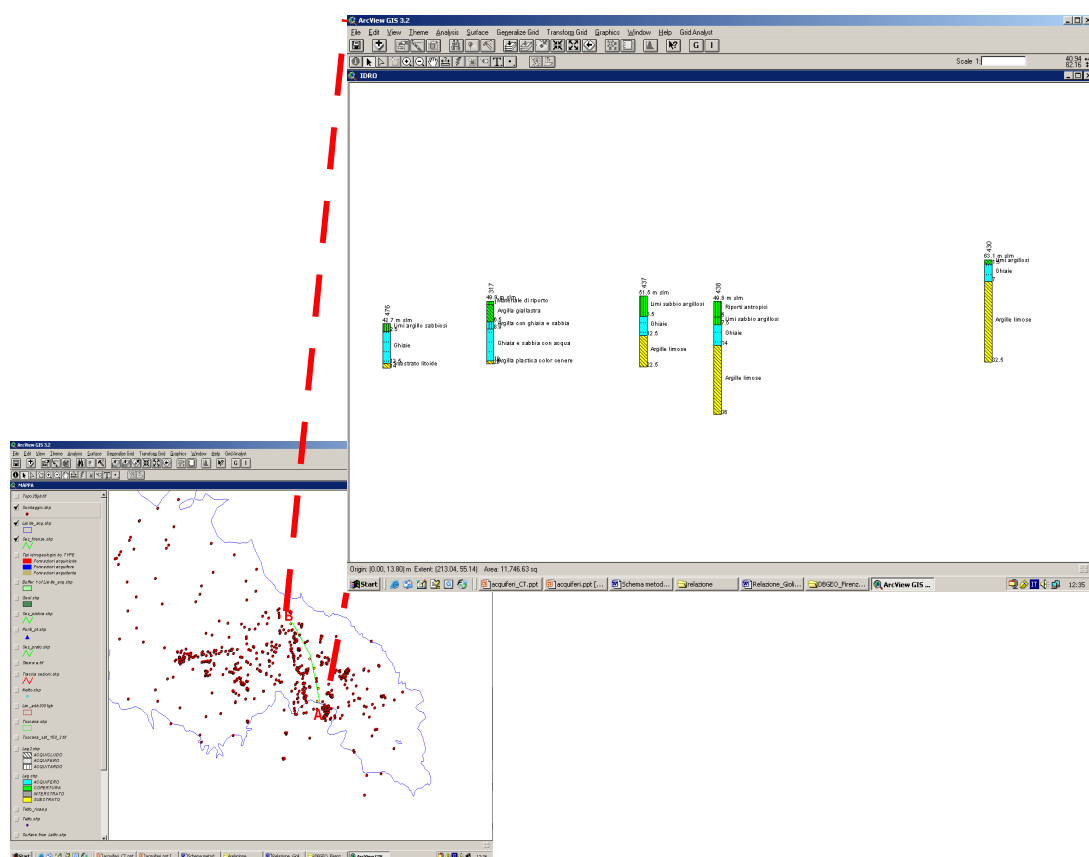
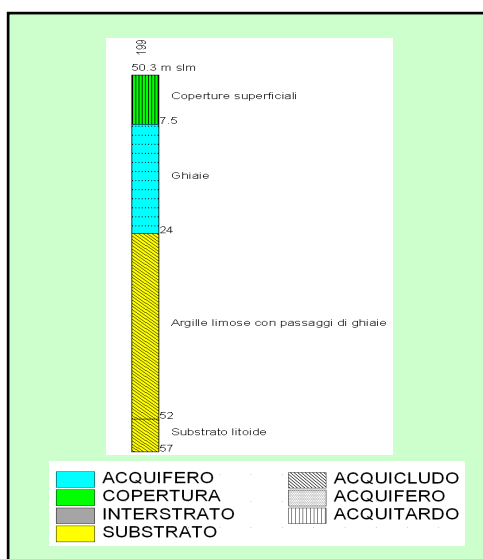


Figura 35 - Archiviazione, interpretazione e visualizzazione dei dati di sottosuolo utilizzati

Attraverso l'interpolazione dei dati disponibili è stato ricostruito l'andamento della base e del tetto del livello acquifero. La successione litostratigrafica dei sedimenti alluvionali è stata divisa in due unità principali: il terreno sovrastante l'acquifero e l'acquifero stesso. La successione stratigrafica ricostruita per il corpo idrico è schematicamente ripartita nelle seguenti unità idrogeologiche principali:

- COPERTURA
- ACQUIFERO
- SUBSTRATO

#### *Caratterizzazione del Corpo Idrico Sotterraneo in termini di delimitazione 3D delle superfici di tetto e di letto*

I dati idrogeologici raccolti, inseriti nel progetto GIS e interpretati sono sempre acquisiti sotto forma di osservazioni sparse di tipo puntuale, per cui, sia per un eventuale utilizzo in modelli matematici, sia per elaborare una rappresentazione grafica di sintesi che permetta di evidenziare l'andamento delle grandezze da stimare, devono necessariamente essere trasformati in campi continui.

Tale operazione viene svolta tramite le seguenti operazioni:

- *Interrogazione della banca dati interpretata per le quote di tetto e letto del CIS.* I dati così ottenuti sono stati organizzati sotto forma di shapefiles e tabelle, e la loro visualizzazione può essere effettuata tramite un apposito progetto su piattaforma Esri Arcgis – ArcMap 9.0, dove sono stati eseguiti i passi successivi.
- *Interpolazione delle superfici.* La fase di interpolazione è un'operazione fondamentale, che prevede in primo luogo la scelta dell' interpolatore più corretto da usare e la sua applicazione nella spazializzazione dei dati. Per la produzione delle superfici di tetto e di letto dell'acquifero sono stati quindi utilizzati due diversi interpolatori e cioè l'IDW (deterministico esatto), e il "KRIGING ordinario" (geostatistico inesatto).
- *Produzione di tematismi in formato raster.* attraverso l'uso dei suddetti interpolatori sono state prodotte carte di sintesi in formato raster delle superfici del tetto e del letto dell' acquifero (CARTE IDROSTRUTTURALI). Sono state inoltre prodotte le carte degli spessori totali dell'acquifero e/o dello spessore efficace dei livelli acquiferi.
- *Costruzione di sezioni idrostratigrafiche* (attraverso il progetto su piattaforma Esri ArcView 3.2 Sira\_Dbgeo realizzato da ARPAT – Agenzia Regionale Protezione Ambientale – Sistema Informativo Regionale Ambientale della Toscana).
- *Stima e interpolazione del parametro della permeabilità degli strati acquiferi*, calcolo della trasmissività: laddove esistevano dati a disposizione circa i parametri idrogeologici, sono state prodotte anche carte della trasmissività dell'acquifero.

#### *Caratterizzazione delle condizioni idrogeologiche al contorno*

Questa operazione è stata eseguita impostando la legenda della carta geologica classificando le formazioni contigue al CIS secondo la classe di permeabilità.

La caratterizzazione del tipo idrogeologico di ogni formazione è stata fatta partendo dallo strato informativo della permeabilità, già realizzato dall'Autorità di bacino dallo strato informativo della geologia.

L'attribuzione delle classi di permeabilità è la seguente:

<b>Classe</b>	<b>Descrizione (tipo idrogeologico)</b>	<b>Tipo di permeabilità</b>
A	Formazioni con permeabilità da praticamente nulla a bassissima	primaria
B	Formazioni con permeabilità medio-bassa	primaria
C	Formazioni con permeabilità medio	primaria
D	Formazioni con permeabilità medio-alta	primaria
E	Formazioni con permeabilità alta	primaria
I	Formazioni con permeabilità da praticamente nulla a bassissima	secondaria
II	Formazioni con permeabilità medio-bassa	secondaria
III	Formazioni con permeabilità medio	secondaria
IV	Formazioni con permeabilità medio-alta	secondaria
V	Formazioni con permeabilità alta	secondaria

*Tabella 11 – Classi di permeabilità*

La rappresentazione delle condizioni a contorno delle aree di affioramento dei corpi idrici sotterranei costituisce uno strumento conoscitivo importante per poter interpretare le piezometrie e, conseguentemente, le direzioni dei flussi idrici all'interno del corpo idrico sotterraneo.

Le condizioni idrogeologiche al contorno sono state classificate tramite procedura GIS secondo gli attributi delle formazioni confinanti, attraverso operazioni di delimitazione, controllo grafico e correzione. La classe di permeabilità attribuita alle formazioni contigue l'acquifero mostra quindi la capacità di scambio idrico delle suddette formazioni con il corpo idrico sotterraneo.

#### *Corpi idrici sotterranei alluvionali significativi del bacino dell'Arno*

La metodologia sopra descritta è stata utilizzata per lo studio dei corpi idrici sotterranei significativi alluvionali del bacino dell'Arno.

- Casentino
- Valdichiana
- Pianura di Arezzo
- Valdarno superiore
- Mugello
- Pianura di Firenze Prato Pistoia
  - pianura di Firenze
  - conoide di Prato

- pianura di Pistoia
- Val di Pesa
- Pianura di Empoli
  - Val di Nievole
  - Val d'Elsa
- Pianura di Fucecchio Santa Croce
- Val d' Era
- Pianura di Lucca
- Pianura di Bientina
- Pianura di Pisa.

Per ogni acquifero sono state prodotte le seguenti elaborazioni:

- *Scheda monografica descrittiva* del Corpo Idrico Sotterraneo, contenente il quadro geologico e geomorfologico dell'area. Sono descritte le unità stratigrafiche del sistema acquifero (copertura, acquifero, substrato) ed è sviluppata la parte idrogeologica di dettaglio. La scheda è corredata dalle seguenti cartografie:
  - *Carta delle Isobate della copertura dell'acquifero* - Rappresenta la morfologia del tetto del corpo sedimentario più superficiale, ghiaioso o sabbioso, facente parte del corpo acquifero significativo.
  - *Carta delle Isobate del letto dell'acquifero sfruttato e dello spessore efficace dei livelli acquiferi* - Riporta la morfologia del letto dell'acquifero sfruttato, intendendo con ciò l'acquifero nella sua interezza in senso verticale, o, alternativamente, la porzione di esso delimitata verso il basso dalla massima profondità raggiunta dai pozzi di emungimento; viene inoltre mostrato lo spessore efficace, inteso come sommatoria dei livelli permeabili presenti all'interno dello stesso acquifero sfruttato. Per gli acquiferi in cui il letto dell'acquifero sfruttato coincide con il substrato, viene prodotta la *Carta dello spessore dell' acquifero*
  - *Carta della trasmissività dell'acquifero* - *Prodotta dove esistono dati a disposizione circa i parametri idrogeologici.*
  - *Carta delle condizioni idrogeologiche al contorno* - La carta mostra il comportamento idrogeologico delle formazioni al contorno del corpo idrico sotterraneo, schematizzandole in base alla classe di permeabilità. La classe di permeabilità attribuita alle formazioni contigue l'acquifero mostra la capacità di scambio idrico delle stesse con il corpo idrico sotterraneo.
- *Sezioni idrostratigrafiche* - Sono state ricostruite una o più sezioni idrostratigrafiche significative del corpo idrico sotterraneo.
- *Carte piezometriche* - Redatte ove disponibili piezometrie recenti.

Tutte queste elaborazioni sono disponibili su apposita area dedicata del sito internet dell'Autorità di bacino del fiume Arno (<http://www.adbarno.it/cont/testo.php?id=28>).