



AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME ARNO

**BILANCIO IDROGEOLOGICO
NEL BACINO DELL'ARNO**

(LEGGE 18 MAGGIO 1989, N. 183
LEGGE 5 GENNAIO 1994, N.36 - D.Lgs N. 152/99,
D.Lgs N. 258/00)



DICEMBRE 2001

AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME ARNO BILANCIO IDROGEOLOGICO DEL BACINO DELL'ARNO

QUALITÀ DELLE ACQUE E RISORSE IDRICHE

BILANCIO IDROGEOLOGICO DEL BACINO DELL'ARNO

10 QUADERNI

Dicembre 2001

**Periodico di informazione
dell'Autorità di bacino dell'Arno**

Direttore scientifico
Giovanni Menduni

Direzione e Redazione:
Via dei Servi 15—50122 FIRENZE
Tel. 055—267431
adbarno@arno.autoritadibacino.it
www.arno.autoritadibacino.it

Spedizione in abbonamento postale gr. IV—70%
Reg. Trib. Di Firenze n. 4284 del 18-12-92

Stampato su carta senza cloro

*Questo lavoro è
stato sviluppato attraverso
una convenzione
tra il Prof. Giovanni Pranzini
e l'Autorità di bacino
del fiume Arno.*

*Coordinamento: Ing. Isabella Bonamini
Collaborazione per la cartografia: dott. Marco Redini*

Progetto grafico:
Canio Cristiani



Qualità delle Acque
e Risorse Idriche

Con questo Quaderno si dà avvio ad una nuova fase dell'attività di pianificazione dell'Autorità di bacino del fiume Arno. Il decennio passato ha visto tale attività centrata e, in un certo qual modo viziata, dalla "questione" rischio idraulico. I fatti del '66, così gravosi per l'Arno e dai quali ha trovato stimolo la legge 183, hanno di fatto indirizzato il lavoro di questa Autorità verso le problematiche di salvaguardia dagli eventi alluvionali, concedendo minore spazio ai temi inerenti l'acqua come risorsa. Questo fatto non ha impedito a questa Autorità di produrre un piano stralcio così importante come quello sulla "Qualità delle acque", approvato con D.P.C.M. del 31 marzo 1999, che nella sostanza, anticipa le finalità a cui mira il decreto legislativo n. 152 del maggio 1999, ponendo la qualità delle acque in rapporto all'ecosistema e non alle caratteristiche dello scarico.

Questo Quaderno colma adesso la lacuna inerente gli aspetti quantitativi della risorsa, rispondendo così alle indicazioni della legge Galli e fornendo una solida base di lavoro su cui impostare i "numeri" necessari alle Regioni Umbria e Toscana per la redazione dei propri Piani di Tutela.

Per comprendere compiutamente le finalità a cui tende questo lavoro e le successive azioni ad esso collegate, è opportuno ripercorrere brevemente l'evoluzione normativa che si è avuta nel settore, strettamente collegata, peraltro, allo sviluppo del pensiero scientifico in materia di gestione e sostenibilità della risorsa.

Il primo di tali provvedimenti è il T. U. n. 1775/1933 sulle acque e impianti elettrici, ancora vigente che, pur avendo finalità volte allo sviluppo del settore idroelettrico più che alla gestione sostenibile della risorsa, regola la disciplina di concessione di acque pubbliche, assoggettando gli utenti al pagamento di un modesto canone.

Al T.U. del 1933 ha fatto seguito un periodo di oltre trenta anni, caratterizzato da nessuna innovazione normativa in materia, nonostante le stravolgenti modificazioni sugli usi delle acque avvenute nello stesso periodo.

La prima legge che fornisce un quadro organico riguardo alla qualità delle acque è la legge n. 319/1976, nota anche come legge "Merli". La legge nasce come un atto di "polizia delle acque", finalizzata a fronteggiare il dilagare delle occasioni di inquinamento attraverso un insieme di limiti, controlli e sanzioni anche penali, applicabili a tutti gli scarichi di acque reflue.

Il 18 maggio 1989 viene pubblicata la legge n. 183, legge quadro in materia di difesa del suolo, istitutiva delle Autorità di bacino, che, tra le sue finalità, prevede la il risanamento delle acque superficiali e sotterranee allo scopo di fermarne il degrado e la razionale utilizzazione delle stesse, garantendo il deflusso minimo vitale negli alvei sotesi.

Il decreto legislativo 12 luglio 1993 n. 275 (Riordino in materia di concessioni di acque pubbliche) prevede l'espressione di un parere istruttorio relativamente alle piccole e grandi derivazioni da parte dell'Autorità di bacino in ordine alla compatibilità della domanda con il piano di bacino e comunque ai fini del controllo idrico o idrologico.

La legge n. 36/1994, nota anche come legge "Galli", dal parlamentare primo firmatario dei numerosi disegni di legge che si sono succeduti, enuncia alcune norme di principio già di per sé esplicative di come il quadro culturale si sia evoluto. Tra queste ricordiamo l'articolo che indica come tutte le acque siano pubbliche, che qualunque uso debba effettuarsi salvaguardando le aspettative ed i diritti delle generazioni future a fruire di un integro patrimonio ambientale, che gli usi siano indirizzati al risparmio ed al rinnovo delle risorse. La legge, sotto questo punto di vista, completa di fatto, sotto l'aspetto giuridico, la riforma del settore iniziata con la 183.

Il cardine della riforma poggia sul concetto di equilibrio idrico. A tal fine prevede che l'Autorità di bacino definisca ed aggiorni periodicamente il bilancio idrico, diretto ad assicurare l'equilibrio sostenibile fra le disponibilità di risorse reperibili o attivabili ed i fabbisogni per i diversi usi. Per assicurare tale equilibrio, l'Autorità di bacino, adotta, per quanto di competenza, le misure necessarie per la pianificazione gestione della risorsa in funzione degli usi.

Il decreto legislativo n. 152/99 e successive modifiche, affronta e accomuna gli aspetti relativi alla salvaguardia qualitativa e quantitativa delle acque, recuperando vistose inadempienze rispetto al recepimento di due importanti direttive comunitarie, la CEE n.91/271 e la n. 91/676. In conformità al d. lgs. n. 275/93, prevede inoltre l'espressione di un parere istruttorio in ordine alla compatibilità delle utilizzazioni con il Piano di Tutela e, anche in attesa dell'approvazione dello stesso, ai fini del controllo sull'equilibrio idrico e idrogeologico.

Questi ultimi provvedimenti costituiscono il chiaro indice della presa di coscienza collettiva, ormai definitivamente compiuta, della necessità di un nuovo sistema di gestione della risorsa acqua. Individuano inoltre precisi compiti per le Autorità di bacino, quali l'emissione di un parere istruttorio in merito alla compatibilità delle utilizzazioni richieste e la definizione, appunto, del bilancio idrico.

La forma con la quale esplicitare il bilancio non può essere altro che quella di stralcio di Piano di Bacino, strumento in cui si attua la funzione eminentemente pianificatoria, programmatica ed attuativa propria delle Autorità di bacino.

Questo stralcio assume caratteristiche particolari rispetto alla pianificazione già in atto. Il bilancio idrico costituisce, così come previsto dal d. lgs. n. 152, obiettivo specifico del Piano di Tutela la cui redazione è demandata, entro il dicembre 2003, alle Regioni. Ne consegue che il bilancio idrico, oltre che ad essere una tematica specificamente prevista dalla normativa vigente è anche vincolato nei tempi, in quanto deve essere necessariamente antecedente al Piano di tutela, di cui costituisce obiettivo.

Il "Bilancio idrogeologico del bacino dell'Arno", oggetto di questo Quaderno, contiene i risultati di uno studio condotto per conto dell'Autorità di Bacino dal Prof. Giovanni Pranzini dell'Università di Firenze.

Oggetto dello studio è la valutazione del bilancio idrico attuale in sezioni significative del reticolo superficiale nonché del bilancio degli acquiferi con maggiori potenzialità, derivante da

una ricognizione complessiva degli studi e delle conoscenze esistenti, opportunamente integrate ed omogeneizzate.

Questo "Quaderno" costituisce parte integrante del quadro conoscitivo necessario alla elaborazione del Piano di bacino stralcio Bilancio Idrico, attualmente in atto

Giovanni Menduni
Segretario Generale dell'Autorità di bacino
del fiume Arno



Foto n. 1 - L'Arno a Firenze

L'acqua, un bene da tutelare

Dati gli attuali livelli di consumo di acqua ed i limiti della sua disponibilità e delle condizioni di riproducibilità, la definizione delle regole per l'uso della risorsa idrica, nel rispetto delle esigenze dell'ambiente e col fine di garantire il soddisfacimento dei fabbisogni, è una sfida di non poco conto, che vede impegnate insieme Autorità di Bacino, Regione ed Enti Locali.

Il punto di partenza è l'acquisizione della conoscenza sulla dislocazione e sulla entità delle risorse disponibili, superficiali e sotterranee, in termini di volumi e di qualità.

Il bilancio idrologico, oggetto della presente pubblicazione, organizza i dati conoscitivi raccolti e rappresenta una contabilità delle entrate e delle uscite di acqua che si hanno in un dato sistema spaziale (bacino, sottobacino), per un dato intervallo di tempo. Attraverso il bilancio idrogeologico si contabilizzano anche le risorse idriche che si accumulano nel sottosuolo.

Una volta individuati per i vari settori (idropotabile, industriale e agricolo) i fabbisogni idrici (che saranno diversificati temporalmente, basti pensare all'uso irriguo che concentra il massimo dei consumi in specifiche aree e nei mesi estivi, alle notevoli esigenze idriche, negli stessi mesi, espresse dal turismo, soprattutto nelle aree costiere) la redazione del bilancio idrico consente di progettare l'equilibrio tra le risorse disponibili o reperibili e i consumi richiesti per i vari usi, nel rispetto del principio di sostenibilità.

Il bilancio idrico si presenta quindi quale strumento per osservare e caratterizzare le specifiche fisiche di un dato territorio - il bacino idrografico - che presenta uniformità di struttura e di funzionalità. Essendo l'acqua un elemento fisico variabile nel tempo e mobile nello spazio la sua conoscenza presuppone l'esame dinamico della stessa nello spazio (immissione/accumulo/deflusso) e nel tempo (escursione annuale, stagionale, mensile).

Le caratteristiche dei bacini idrografici che interessano la nostra regione evidenziano, anche nel caso dell'Arno, la natura torrentizia dei corsi d'acqua superficiali, con la accentuata escursione stagionale delle loro portate; ne deriva l'evidente interesse per la determinazione dei valori di soglia di portata minima (deflusso minimo vitale) necessaria per il mantenimento dell'ecosistema idrico, prendendo in considerazione la variabile tempo per la differenziazione stagionale e mensile dei valori presi a riferimento.

La determinazione di tali aspetti ha rilievo in primo luogo per la definizione delle condizioni e dei limiti da prescrivere per i prelievi e, quindi, soprattutto per la tutela delle acque sotterranee (fermo restando che tali limitazioni si applicano secondo l'ordine: industria - agricoltura - idropotabile) per affermare un consumo idrico sostenibile.

In secondo luogo la determinazione del bilancio idrico ha rilievo per la definizione delle condizioni e dei limiti per le immissioni antropiche (gli scarichi). Ciò ha particolare rilievo per la determinazione delle politiche specifiche per la tutela dei corpi idrici superficiali e per la fissazione degli obiettivi specifici di qualità che la Regione può determinare col Piano di Tutela, venendo ad articolare e differenziare i limiti tabellari standard fissati con la normativa nazionale, in relazione alla capacità ricettiva di ogni specifico corpo ricettore. La tutela quantitativa della risorsa acqua concorre infatti al raggiungimento degli obiettivi specifici di qualità.

In sintesi il bilancio idrico nel suo complesso, e nello specifico il bilancio idrogeologico per le acque sotterranee e il bilancio idrologico per quelle superficiali, si presentano quale strumento conoscitivo - modello di rappresentazione della realtà - riferimento d'obbligo per la disciplina e per la pianificazione del governo del ciclo idrico (regole e limiti per i prelievi e per gli scarichi) con la finalità di equilibrare e rendere compatibili le pressioni con la salvaguardia quanti-qualitativa dell'acqua, nel rispetto delle condizioni di riproducibilità.

Ma non di sola quantità può occuparsi il bilancio idrico.

E' chiaro che le quantità e la qualità di acqua prelevabile e di quella scaricabile dall'uomo dipendono non solo dalla quantità di acqua presente nei corpi idrici, sia sotterranei, che superficiali, ma anche dalla loro qualità. Il livello di contaminazione delle acque, o comunque la distanza dal livello qualitativo naturale delle stesse, determina, infatti, "correzioni" alle quantità prelevabili o scaricabili.

Ne consegue che il bilancio idrico deve necessariamente completarsi con la determinazione e valutazione della qualità delle acque disponibili. In altre parole il fattore qualità delle acque può spostare in basso il valore della quantità di acqua prelevabile o scaricabile.

Il Piano di Tutela, componente essenziale del Piano di Bacino, quale strumento di sintesi delle politiche per l'acqua secondo il modello tracciato dalla Direttiva Quadro sull'acqua 60/2000, è l'appuntamento a cui rapidamente tendere ed in cui inserire i pregevoli studi come il presente.

Paolo Matina

Responsabile area Risorsa idrica Interna e Marina
della Regione Toscana



Foto n. 2 - Impianto di depurazione consortile di S. Colombano (Lastra a Signa)

Indice

Presentazione	pag.	3
Premessa	pag.	11
Definizioni	pag.	21
1. Il bilancio idrico	pag.	24
2. Le caratteristiche idrologiche e idrogeologiche del bacino	pag.	27
3. Acque superficiali	pag.	30
3.1 Bilancio idrologico annuo	pag.	30
3.1.1 Bilancio idrologico medio annuo dei bacini sottesi da stazioni di misura del deflusso.....	pag.	30
3.1.2 Bilancio idrologico medio annuo dei bacini privi di stazioni di misura del deflusso	pag.	40
3.2 Bilanci idrologici medi mensili	pag.	58
3.2.1 Bilanci medi mensili dei bacini sottesi da stazioni di misura del deflusso (serie A).....	pag.	58
3.2.2 Bilanci idrologici medi mensili dei bacini senza idrometrografi (serie B).....	pag.	66
3.3 Componenti del deflusso.....	pag.	68
3.3.1 Metodologia adottata per il calcolo delle componenti del deflusso	pag.	68
3.3.2 Componenti del deflusso alle stazioni idrometriche (bacini della serie A).....	pag.	73
3.3.3 Deflusso di base dei bacini idrografici (bacini della serie B)...	pag.	76
3.4 Portate di magra	pag.	79
3.4.1 La portata minima vitale	pag.	79
3.4.2 Le portate di magra naturali	pag.	81
3.4.3 Portate minime climatiche attese	pag.	84
4. Acque sotterranee	pag.	89
4.1 Acquiferi per porosità	pag.	89
4.2 Acquiferi per fratture	pag.	90
5. Bilanci idrici	pag.	92
5.1 Risorse idriche fluenti	pag.	92
5.2 Risorse idriche sotterranee	pag.	95

5.2.1	Prelievi di acque sotterranee	pag.	95
5.2.2	Gli acquiferi montani	pag.	98
5.2.3	Gli acquiferi delle pianure	pag.	99
6. Conclusioni	pag.	133	
6.1	Bilancio idrogeologico dei bacini	pag.	135
6.2	Tendenza del clima	pag.	137
6.3	Deflusso minimo vitale, portate di magra e confronto con i prelievi.....	pag.	138
6.4	Bilancio idrogeologico degli acquiferi sotterranei	pag.	140
Bibliografia	pag.	145	
Quadro normativo cronologico di riferimento	pag.	153	
Bilancio idrico dei bacini dell'Arno			
Appendici	pag.	159	
Appendice 1			
Bilanci medi mensili alle sezioni idrografiche (bacini della serie A).....	pag.	161	
Appendice 2			
Bilanci medi mensili naturali alle sezioni idrografiche (bacini della serie A)	pag.	175	
Appendice 3			
Bilanci medi mensili naturali dei bacini idrografici (bacini della serie B)	pag.	189	
Appendice 4			
Bilanci medi mensili reali dei bacini idrografici (bacini della serie B).....	pag.	203	
Appendice 5			
Scomposizione delle componenti del deflusso mensile alle sezioni idrografiche (bacini della serie A)	pag.	219	
Appendice 6			
Idrogrammi dei corsi d'acqua alle sezioni idrometriche, con retta di esaurimento	pag.	247	

PREMESSA

La risorsa idrica nella Pianificazione di bacino

La legge n. 183 del 18 maggio 1989 (*Norme per il riassetto funzionale e organizzativo della difesa del suolo*), istitutiva delle Autorità di bacino, individua nel bacino idrografico l'ambito territoriale di riferimento. Le finalità della legge, oltre a quelle strettamente connesse alla difesa del suolo, riguardano il risanamento delle acque, la gestione e fruizione del patrimonio idrico, la razionale utilizzazione della risorsa idrica e la tutela degli aspetti ambientali ad essa connessi, inquadrando tutto il sistema degli interventi in un modello più generale di pianificazione e programmazione.

In particolare l'art. 3, comma 1, precisa che le attività di programmazione, di pianificazione e di attuazione degli interventi destinati a realizzare le finalità di cui all'art. 1 riguardano:

... il risanamento delle acque superficiali e sotterranee allo scopo di fermarne il degrado e, rendendole conformi alle normative comunitarie e nazionali, assicurarne la razionale utilizzazione per le esigenze della alimentazione, degli usi produttivi, del tempo libero, della ricreazione e del turismo, mediante opere di depurazione degli affluenti urbani, industriali ed agricoli, e la definizione di provvedimenti per la trasformazione dei cicli produttivi industriali ed il razionale impiego di concimi e pesticidi in agricoltura;

... la razionale utilizzazione delle risorse idriche superficiali e profonde, con una efficiente rete idraulica, irrigua ed idrica, garan-

tendo, comunque, che l'insieme delle derivazioni non pregiudichi il minimo deflusso costante vitale negli alvei sottesi, nonché la polizia delle acque.

L'attività dell'Autorità di bacino si esplica tramite la redazione del Piano di Bacino. Considerata la complessità di tale strumento, con legge 493/93 veniva data la possibilità di procedere alla redazione del Piano mediante piani stralcio per settore funzionale o per ambito territoriale, tra loro interrelati.

L'Autorità di bacino del fiume Arno si è avvalsa di questa facoltà procedendo alla redazione del Piano di bacino mediante stralci funzionali. In particolare è stato redatto un documento generale di sintesi, comprensivo del piano conoscitivo (in continuo aggiornamento) e delle finalità generali. Tale documento ha funzioni di piano direttore dei piani di settore, raggruppati in due tematiche primarie, *la difesa del suolo e la tutela della qualità delle acque*.

In riferimento alla seconda tematica, con DPCM del 31 marzo 1999 è stato approvato il piano "Qualità delle Acque".

Il "Piano Qualità", pur riguardando sostanzialmente l'aspetto qualitativo delle acque superficiali, introduce un quadro conoscitivo quantitativo relativo sia alle acque superficiali che a quelle sotterranee (acquiferi delle pianure alluvionali) e, nella consapevolezza che l'aspetto qualitativo è indivisibile da quello quantitativo, individua interventi e norme finalizzati al mantenimento del deflusso in alveo oltre a consentire gli

usi di risorsa prioritari.

In tal senso il piano anticipa i contenuti del Decreto Legislativo 152/99, indicando quale fine primario la salvaguardia delle caratteristiche di qualità della rete idraulica naturale, prevedendo, lì dove necessario, il raggiungimento di obiettivi di qualità superiori. In tal senso assume valenza significativa non il contenimento delle concentrazioni di particolari composti e/o elementi allo scarico, ma la qualità complessiva del corpo naturale ricettore.

Come stato qualitativo di partenza, con riferimento all'asta dell'Arno ed ai principali affluenti, è stato assunto quello derivante dal monitoraggio, iniziato già prima dell'entrata in vigore della legge 319/1976 (legge "Merli") ed effettuato dai Laboratori Provinciali di Igiene e Profilassi, poi dai Servizi Multizonali di Prevenzione Ambientale delle Unità Sanitarie Locali e quindi all'ARPAT (istituita con Legge Regionale Toscana n.66/95).

I parametri controllati per la classificazione delle acque sono di origine chimica (ossigeno disciolto, COD, azoto ammoniacale, fosfati) e microbiologica (coliformi fecali).

In base a questi parametri le acque sono classificate in quattro classi di qualità, con qualità decrescente al crescere della classe.

La qualità biologica è stata individuata tramite l'EBI (Extended Biotic Index).

Alla legge 183/89 si sono aggiunti altri provvedimenti innovativi relativamente alla gestione ed utilizzo della risorsa idrica, che tra l'altro affidano specifici compiti all'Autorità di Bacino. In particolare il decreto legislativo n. 275 del 12 luglio 1993 (*Riordino di concessioni in materia di acque pubbliche*), prevede all'art. 3 l'emanazione da parte dell'Autorità di un parere istruttorio relativamente alle derivazioni idriche (piccole e grandi concessioni) di cui al R.D. n.

1775/33 (*Testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e impianti elettrici*) ai fini del controllo del bilancio idrico e idrogeologico, e la legge n. 36/94 (Disposizioni in materia di risorse idriche, nota anche come "legge Galli").

La legge trae spunto dalla necessità di risolvere l'eccessiva frammentazione gestionale del servizio idrico, individuando ambiti territoriali ottimali (costituiti e resi operativi con leggi regionali. In particolare la regione toscana ha provveduto alla individuazione degli ATO con legge regionale n. 81/95, l'Umbria con legge regionale del 1997) all'interno dei quali pervenire ad una gestione unitaria ed integrata del ciclo idrico, inteso come l'insieme dei servizi di captazione, adduzione e distribuzione di acqua ad usi civili, di fognatura e depurazione delle acque reflue. La legge prevede inoltre una separazione tra titolarità e gestione del servizio idrico, ponendo fine alla coincidenza dei due ruoli prevista dal sistema normativo precedente, fonte di inevitabile confusione tra funzioni di indirizzo, regolamentazione controllo e gestione.

L'altro pilastro della riforma è rappresentato dalla disciplina tariffaria, capace di coprire sia i costi correnti che gli investimenti, con tariffe stabilite secondo il metodo normalizzato dal Comitato per la Vigilanza sull'Uso delle Risorse Idriche e adattato alle caratteristiche locali dall'autorità dell'ATO.

Il DPR 4 marzo 1996 (*disposizioni in materia di risorse idriche*) fornisce definizioni di alcuni concetti contenuti nella Galli. In particolare precisa che per economia idrica deve intendersi la gestione ottimale delle risorse idriche, al fine di conseguire la massima efficienza ed efficacia d'uso, tenuto conto della reale disponibilità nel tempo e nello spazio e delle situazioni di concorren-

zialità di usi diversi.

In particolare le risorse la cui disponibilità va disciplinata sono le risorse già disponibili e le risorse potenzialmente disponibili attraverso la attivazione di nuove captazioni, il trasferimento da altri bacini, il riutilizzo delle acque trattate.

Per usi si intendono sia gli usi esterni (prelievi in senso stretto), che interni (Dmv, navigabilità, pesca, attività ricreative..).

Il soddisfacimento dei fabbisogni, attuali e futuri si intende ottimale quando venga attivato in quantità e qualità commisurate alla specifica tipologia d'uso.

Qualora si manifestino situazioni di deficit qualitativo/quantitativo, l'equilibrio va perseguito adottando tra le situazioni di seguito elencate quella più efficiente sotto il profilo economico e sociale, verificata con tecniche costi - benefici:

- utilizzo di risorse potenzialmente disponibili;
- utilizzo di risorse attualmente destinati ad altri usi quando questi siano soddisficibili con risorse di qualità minore;
- minimizzazione delle perdite;
- introduzione di misure per il risparmio idrico;
- trasferimento temporaneo di risorse all'interno del bacino;
- trasferimento di risorse da bacini con tiguì;
- ridefinizione delle concessioni.

Il decreto legislativo n. 152/99 (*Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole*) e successive modifiche, effettua il recepimento di due

direttive comunitarie e, nel contempo, riordina la precedente normativa in tema di tutela delle acque dall'inquinamento, coordinandola con quella in materia di gestione delle risorse idriche.

In particolare collega i limiti di emissione imposti agli scarichi con la fissazione di specifici obiettivi di qualità dei corpi idrici.

La valutazione dello *stato di qualità ambientale dei corpi idrici significativi* deriva da considerazioni riguardanti sia lo stato chimico che ecologico del sistema; lo stato di qualità per specifica destinazione individua lo stato dei corpi idrici idonei ad una particolare utilizzazione da parte dell'uomo, per la vita dei pesci e dei molluschi.

Lo *stato di qualità ambientale* per le acque superficiali è definito in rapporto ad un corpo idrico di riferimento, che rappresenta la condizione indisturbata per ciascun ambiente naturale. Il *corpo idrico di riferimento* pertanto è il termine di confronto al quale rapportare sia lo stato attuale del sistema ad esso connesso, sia la sua evoluzione futura.

Il D. Lgs. 152/99 introduce anche notevoli variazioni relativamente alle competenze in materia. In particolare, le competenze dell'A.d.B., sono precisate e modificate nei seguenti articoli:

- *art. 23, comma 1* - Le domande relative sia alle piccole che alle grandi derivazioni sono altresì trasmesse alle Autorità di bacino competenti che nel termine massimo di quaranta giorni dalla ricezione comunicano il proprio parere all'Ufficio istruttore in ordine alla compatibilità delle utilizzazioni con il piano di tutela e, anche in attesa dell'approvazione dello stesso, ai fini del controllo sull'equilibrio idrico e idrogeologico...

- *art. 44 comma 1* - Il Piano di Tutela costituisce piano stralcio di settore del piano

di bacino ai sensi dell'art. 17, comma 6 – ter della legge 183/89; *comma 2* - Entro il 31 dicembre 2001 le autorità di bacino sentite province ed ATO, definiscono gli obiettivi a scala di bacino cui debbono attenersi i piani di tutela delle acque nonché le priorità degli interventi.

- *Allegato 1 paragrafo 2.1.3.1* - Corpi idrici di riferimento -...I corpi idrici di riferimento sono individuati, anche in via teorica, dalle Autorità di bacino...

Dal punto di vista procedurale l'aspetto predominante è sicuramente l'art.44, che, di fatto, inverte l'iter previsto dalla legge 183/89 per l'adozione e approvazione del piano di bacino tra Regione, che ha il compito di redigere il piano ed Autorità di bacino cui spetta l'individuazione di obiettivi di qualità da perseguire e l'espressione di un parere vincolante sul raggiungimento degli stessi. Nel caso particolare dell'Autorità di bacino dell'Arno il quadro è reso ancor più complicato dalla presenza di un piano settore già vigente, relativo ad aspetti propri del Piano di Tutela.

Così come previsto dal decreto di cui sopra, l'Autorità nel dicembre 2001 ha trasmesso gli obiettivi individuati alle Regioni Toscana e Umbria. In accordo con le stesse Regioni, si è ritenuto di riproporre quanto già previsto nel Piano "Qualità", di seguito sommariamente riportato.

Acque superficiali – Stato della pianificazione e obiettivi da conseguire.

Il bacino del fiume Arno ricade quasi integralmente nella Regione Toscana, interessando per una superficie di circa il 5% il territorio umbro.

La parte di bacino ricadente in Umbria, anche se di rilevanza territorialmente ridotta, presenta aspetti ambientali peculiari, con

problematiche già affrontate in una specifica misure di salvaguardia, totalmente recepita nel piano *Qualità* (norma di piano n. 8 – *Salvaguardia del lago di Chiusi*).

Questa condizione di sostanziale appartenenza ad un unico ambito territoriale agevola le procedure e soprattutto rende più facilmente perseguibili obiettivi volti sostanzialmente ad un'unica amministrazione.

Inoltre, la vigenza di un piano di settore conforme ai criteri direttori del D.Lgs. 152/99, non può non costituire una base di lavoro attuale.

Ciò premesso, per quanto riguarda la definizione di obiettivi di qualità relativamente alle acque superficiali ai fini della redazione del Piano di Tutela, esaminata la rete di monitoraggio dei corpi idrici significativi individuata e deliberata della Regione Toscana, si propone il raggiungimento degli obiettivi previsti dal piano "*Qualità delle Acque*", cui si fa riferimento per il dettaglio degli stessi, così come riportato nel "Quaderno n.8" di questa Autorità. Si ricorda tuttavia che gli obiettivi, configurabili come obiettivi per specifica destinazione, sono individuati per tratti omogenei dell'asta principale, di seguito elencati (cfr. tav a):

Tratto 1 – dalla sorgente a Ponte a Buriano;

Tratto 2 – da Ponte a Buriano al potabilizzatore dell'Anconella e tratto urbano fiorentino;

Tratto 3 – dalla confluenza in Arno del fiume Bisenzio al canale Scolmatore (Pontedera);

Tratto 4 – dal canale Scolmatore alla foce (Bocca d'Arno).

L'affidare obiettivi di qualità legati a tratti dell'asta principale impone precisi standard di riferimento anche per gli affluenti relativi al tratto sotteso e quindi consente una uniformità gestionale, al di là dei limiti amministrativi, a livello di bacino idrografico.

La definizione puntuale di obiettivi di

qualità ambientale sarà effettuata una volta noti i risultati del monitoraggio dei corpi idrici significativi, concordato con la Regione Toscana e già avviato.

Acque di falda – Stato della Pianificazione e obiettivi da conseguire.

Mentre le caratteristiche quali/quantitative generali delle acque superficiali a livello di bacino sono sostanzialmente note, le conoscenze delle acque di falda sono scarse, frammentarie e ricavate dall'interpretazione di dati derivanti dall'utilizzo delle stesse.

Infatti, nonostante la prevalenza di rocce a bassa permeabilità, le acque sotterranee costituiscono la risorsa più importante e più utilizzata per i diversi usi. Oltre a fornire circa l'80% dell'acqua per gli usi agricoli ed industriali, i pozzi, ed in parte assai minore le sorgenti, rappresentano la risorsa principale per la maggior parte degli acquedotti civili.

Da un censimento delle fonti di approvvigionamento idropotabile condotto per conto dell'Autorità di Bacino nel 1997, risulta che, per tale uso il "pozzo", isolato o appartenente ad un campo pozzi, è l'opera di captazione delle acque più rappresentata. I pozzi totali censiti risultano essere 1251 contro le 1043 sorgenti e le 96 prese da acque superficiali, da cui peraltro derivano, quantitativamente, le maggiori portate, dell'ordine del 46,6% (4178 l/s) dell'acqua addotta contro il 43,1% dei pozzi (3869 l/s) ed il 10,2% (920 l/s) delle sorgenti. Il totale delle acque prelevate dal suolo e sottosuolo ad uso idropotabile assomma pertanto a 8966 l/s.

In particolare, per quanto riguarda le acque di falda, sono state individuate tre formazioni geologiche che, da sole, contribuiscono per il 66,17%, con i loro acquiferi, a fornire acque per le reti acquedottistiche.

L'acquifero maggiormente sfruttato

trova sede nella formazione geologica dell'Arenaria del Cervarola, con 325 fonti di approvvigionamento corrispondenti al 25,57%: anche gli acquiferi presenti nei depositi alluvionali sono ampiamente sfruttati attraverso numerose opere corrispondenti a 297 fonti (23,37%). La terza formazione altamente sfruttata è rappresentata dall'arenaria "macigno" con 219 sorgenti pari al 17,23%.

Gli acquiferi delle pianure alluvionali risultano inoltre intensamente sfruttati per usi produttivi, con problemi di approvvigionamento idrico in periodi siccitosi e con frequenti casi di inquinamento diffuso dovuto sia alla elevata vulnerabilità intrinseca per la scarsa copertura dell'acquifero stesso, sia alla presenza diffusa delle fonti di inquinamento potenziale, costituite da aree urbanizzate senza soluzione di continuità.

L'attività di censimento di pozzi, di ricognizione di studi e progetti, di studi specifici ad oggi svolta dall'Autorità di bacino ha permesso di effettuare una prima valutazione della disponibilità, in termini quantitativi e qualitativi, delle risorse sotterranee. In particolare sono state individuate alcune zone di crisi, coincidenti con le aree a più intenso sfruttamento, dove gli squilibri tra disponibilità ed usi hanno compromesso le riserve della falda, con preoccupanti abbassamenti della superficie piezometrica e, in alcuni casi, innesco di fenomeni di subsidenza indotta.

L'attività della Autorità relativamente alla distribuzione delle acque di falda al momento è volta ad acquisire approfondimenti conoscitivi su alcuni acquiferi delle pianure alluvionali caratterizzati da un intenso grado di sfruttamento.

Il bilancio idrico

Il raggiungimento e/o mantenimento in alveo di valori di portata compatibili con il

buon regime delle acque è considerato nello stralcio di Piano Qualità delle Acque come obiettivo prioritario (da raggiungere o con interventi strutturali, tra i quali l'invaso, ad esempio, l'invaso di Bilancino, ad oggi completato e collaudato o con interventi gestionali/normativi), congiuntamente a quelli di depurazione in senso stretto.

Questo indirizzo è ribadito dall' art. 22, comma 2 del D. Lgs. 152/99 in cui testualmente si precisa che nel Piano di Tutela sono adottate le misure volte ad assicurare l'equilibrio del bilancio idrico così come definito dall'A.d.B., nel rispetto delle priorità della L. 36/94 e tenendo conto dei fabbisogni, delle disponibilità, del minimo deflusso vitale, della capacità di ravvenamento della falda e delle destinazioni d'uso della risorsa compatibili con le relative caratteristiche qualitative e quantitative. Il conseguimento del bilancio idrico quindi è esso stesso un obiettivo del Piano di tutela.

L'Autorità di bacino del fiume Arno, in considerazione di problematiche strettamente connesse al sistema degli approvvigionamenti e anche al fine di ottemperare alle precise disposizioni legislative di cui sopra, si è attivata con studi e censimenti finalizzati alla valutazione del bilancio idrico ed idrogeologico, muovendosi su due fronti, quello della quantificazione delle risorse disponibili, sia superficiali che sotterranee, e quello della quantificazione degli usi assentiti.

Per migliorare l'acquisizione di tali dati, tra l'altro, è stato finanziato l'ampliamento della rete di rilevamento dati idropluviometrici in tempo reale (prevedendo l'inserimento di stazioni di misura in corrispondenza di sezioni di chiusura dei bacini, ove mancanti), nonché la ristrutturazione delle centraline di

monitoraggio qualità delle acque, sempre in tempo reale, installate nel 1986 dalla Regione Toscana e andate poi in disuso per una non adeguata assistenza manutentoria a seguito della cessione delle stesse ai Comuni. Ad oggi la rete delle centraline è stata completata con l'inserimento di un nuovo punto in corrispondenza delle cateratte di Usciana, corso d'acqua ricettore degli scarichi della Val di Nievole, del Pescia e del Comprensorio del Cuoio. La gestione delle centraline è affidata all'ARPAT. Sempre l'ARPAT, su finanziamento dell'Autorità, sta predisponendo un modello qualitativo relativo all'asta principale, che una volta tarato, permetterà, oltre che la simulazione di vari scenari, uno snellimento dell'attività di monitoraggio puntuale ad oggi effettuata

Dall'attività conoscitiva effettuata emerge che la risorsa idrica media annua è teoricamente elevata e potrebbe soddisfare tutte le richieste, sia potabili che agricole e industriali (il deflusso medio annuo calcolato per il periodo 1960-1991, alla stazione di misura delle portate di S. Giovanni alla Vena è di 81,62 mc/s, pari a 2574 milioni di mc l'anno).

Lo sfruttamento della risorsa potenziale è ostacolato dalla combinazione di due fattori: da un lato il fatto che le precipitazioni sono scarse nel periodo estivo, quando maggiore è la domanda; dall'altro la prevalenza nel bacino di rocce a bassa permeabilità, che non consentono l'immagazzinamento nel sottosuolo di una parte consistente degli afflussi meteorici.

Si è reso quindi necessario valutare come la risorsa idrica complessiva risulta distribuita nell'anno, per cui, scelti dei sottobacini ritenuti significativi, sono stati calcolati:

- i bilanci idrogeologici medi mensili, con procedure diverse a seconda che le sezioni di chiusura del bacino interessato siano o meno dotate di stazione di misura delle portate;
- i deflussi naturali, con l'inserimento nei precedenti degli scarichi e dei prelievi idrici;
- le risorse idriche di sottosuolo.

I risultati di tale attività, condotta dal Prof. Giovanni Pranzini per conto dell'A.d.B., sono integralmente riportati in questo "Quaderno".

Nel "Quaderno" sono riportate anche alcune considerazioni sul concetto di *minimo deflusso vitale (Dmv)*, configurato come un uso prioritario cui far seguire, così come previsto dalla Legge 36/94, l'uso potabile ed irriguo.

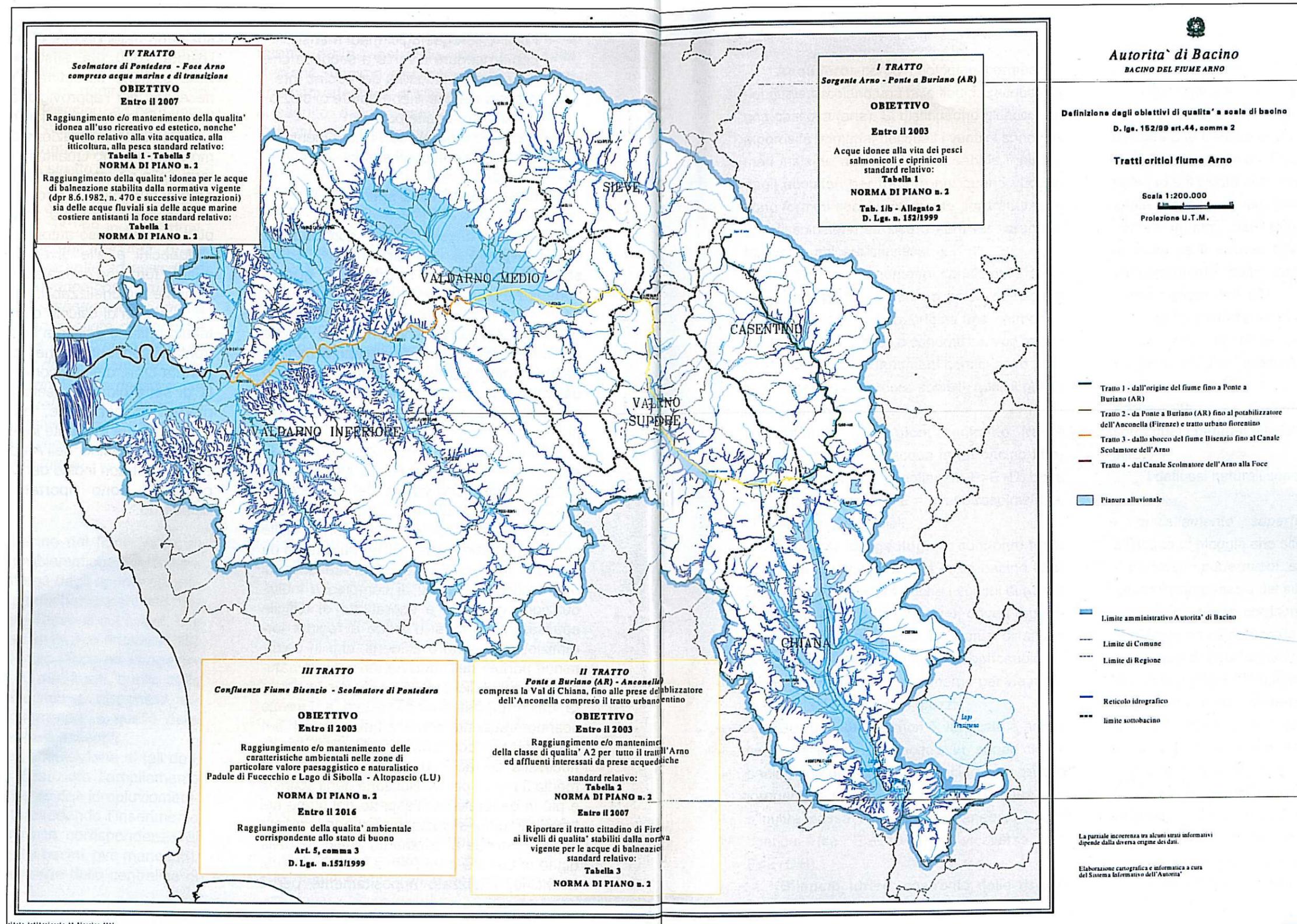
Teoricamente il *Dmv* è definito come la portata che deve garantire la salvaguardia delle caratteristiche fisiche del corso d'acqua, chimico-fisico delle acque nonché il mantenimento delle biocenosi tipiche delle condizioni naturali locali. E' un parametro da valutare caso per caso e caratteristico di ogni sezione e quindi di complessa individuazione generale e soprattutto di difficile applicazione a corsi d'acqua a regime torrentizio, quali Arno e affluenti, che in determinati periodi dell'anno hanno portate naturali prossime allo zero. Ad esempio la portata dell'Arno nel periodo estivo a Firenze scende frequentemente al di sotto di 3-4 mc/s, valore del tutto insufficiente per le necessità dell'acquedotto dell'Anconella (in media 3 mc/s), per la diluizione degli scarichi e più in generale per l'aspetto del fiume nel tratto cittadino, situazione oggi parzialmente superata grazie al contributo artificiale delle dighe di Levane e La Penna e dell'invaso di Bilancino, realizzato appositamente per il

sostegno delle portate di magra e che, nell'estate 2000, ha effettivamente garantito nella sezione fiorentina i quantitativi idrici necessari per l'approvvigionamento idropotabile del Comprensorio fiorentino.

Per la determinazione del deflusso minimo vitale il piano Qualità fa riferimento al criterio della portata unitaria, pari a 1,6 l/s per Km² di superficie di bacino sottesa. E' chiaro che il criterio della portata unitaria non può essere esteso automaticamente a tutti i sottobacini e alle diverse aste fluviali, in quanto funzione di una serie di variabili difficilmente regionalizzabili.

L'ipotesi di calcolo che si basa sul contributo unitario dell'area sottesa è stata confrontata con quella che fa riferimento alla portata $Q_{7,10}$, definita come la minima portata di sette giorni consecutivi con tempo di ritorno 10 anni, che, anche esperienze recentemente maturate in ambienti simili a quello del bacino dell'Arno, ha dimostrato essere un buon indice del *Dmv*. Le tabelle di confronto sono riportate all'interno del Quaderno.

Tav. a - Obiettivi di qualità ex art. 44, comma 1, D. lgs. 152/99, posti dall'Autorità di Bacino del fiume Arno.



DEFINIZIONI

Acquifero: corpo geologico permeabile nel quale circolano una fase liquida (acqua) ed una gassosa (aria). Si distinguono gli acquiferi a porosità primaria, nei quali i vuoti si sono formati insieme alla roccia (es. sabbia, ghiaia), dagli acquiferi per fratture nei quali i vuoti si sono formati successivamente per fratturazione, dissoluzione carsica o altro (es. arenaria fratturata, calcare carsificato).

Carsismo: fenomeno consistente nella dissoluzione dei calcari da parte dell'acqua con anidride carbonica; origina una permeabilità secondaria (canali e condotti carsici) anche di elevata entità. I fenomeni carsici sono possibili anche in altre rocce solubili, quali il gesso e il salgemma.

Bilancio idrologico: confronto fra le entrate e le uscite d'acqua in un bacino idrografico, secondo l'uguaglianza: $P=E+D$, dove P = afflussi meteorici, E = evapotraspirazione, D = deflussi superficiali.

Bilancio idrogeologico: confronto fra le entrate e le uscite d'acqua in un bacino idrografico, che considera anche i volumi di acqua sotterranea coinvolti: $P=E+D+I$, dove I rappresenta l'infiltrazione, cioè il volume di acqua che, mediamente, si infiltra nel sottosuolo ad alimentare le falde e ne riemerge per vie naturali (sorgenti) o artificiali (pozzi).

Se l'uguaglianza non è verificata e non ci sono trasferimenti d'acqua in superficie, il bacino idrografico non coincide con quello idrogeologico, cioè una parte dell'acqua che s'infiltra passa per vie sotterranee ai bacini contigui (se $P>E+D+I$) o viceversa (se $P<E+D+I$).

Bilancio idrico: confronto delle risorse

idriche, di superficie e sotterranee, disponibili con i consumi e le necessità per i diversi usi.

Deflusso di un corso d'acqua: volume d'acqua che transita in una sezione fluviale in un determinato tempo. Può essere espresso in m^3/s , ed è il valore che si avrebbe se il volume totale transitasse ad una portata costante, oppure in mm, pari all'altezza che l'acqua avrebbe se il volume totale fosse distribuito uniformemente sulla superficie del bacino (lama d'acqua defluita).

I deflussi naturali (o climatici) sono quelli conseguenti ai soli termini naturali del bilancio idrogeologico: precipitazioni, evapotraspirazione, infiltrazione, emergenza naturale delle acque sotterranee. I deflussi attuali (o effettivi) sono quelli naturali alterati dai prelievi e dagli scarichi.

I deflussi naturali sono formati da tre componenti:

- *ruscellamento superficiale:* corrisponde all'acqua di pioggia che scorre sul terreno;
- *deflusso ipodermico:* si svolge nel suolo (entro il primo metro del sottosuolo);
- *deflusso di base:* corrisponde all'acqua che si è infiltrata ad alimentare le riserve sotterranee. Il deflusso di base continua, anche in assenza di nuove precipitazioni, fino a che non si è scaricata tutta l'acqua sotterranea al di sopra del livello di sfioro. E' la sola componente attiva durante la fase di esaurimento dell'acqua portata, che si ha in assenza di precipitazioni.

Deflusso minimo vitale: minima quantità di acqua che deve essere presente in un corso di acqua per garantire la sopravvivenza e la conservazione dell'ecosistema fluviale.

Falda (idrica): massa d'acqua contenuta

in un acquifero di sottosuolo che può essere sfruttata mediante pozzi. Si distinguono:

- *Falda libera o freatica*: falda la cui superficie è sottoposta ovunque alla pressione atmosferica.

- *Falda confinata* (o in pressione): falda contenuta in un acquifero confinato, ovvero compreso fra due strati impermeabili; il livello piezometrico è situato sopra il tetto dell'acquifero e corrisponde alla pressione dell'acqua nell'acquifero.

- *Falda artesianiana*: falda il cui livello piezometrico è più alto della superficie topografica.

Infiltrazione: moto dell'acqua dalla superficie al sottosuolo, essenzialmente verticale, sotto l'azione combinata della gravità, della viscosità e della capillarità.

Coefficiente d'infiltrazione: rapporto fra l'acqua infiltrata e l'acqua piovuta su una determinata superficie.

Coefficiente d'infiltrazione efficace: rapporto fra l'acqua infiltrata e l'acqua disponi-

bile P - E.

Permeabilità: attitudine di una roccia a far defluire l'acqua sotterranea.

Livello piezometrico: livello idrico di una falda, misurabile nei pozzi e nei piezometri. Quando si riferisce ad una falda libera (o freatica) si può sostituire col termine livello freatico.

Superficie piezometrica: superficie corrispondente al livello di saturazione di un acquifero libero (in tal caso si parla di superficie freatica) o alla pressione di un acquifero confinato. Si può ricostruire mediante misure di livello idrico.

Isopieze (o isopiezometriche): linee di uguale quota della superficie piezometrica. Nel caso di acquifero libero si può usare il termine isofreatiche.

Tempo di corrivazione: tempo teoricamente richiesto da una goccia d'acqua per giungere dal punto più distante alla sezione di chiusura del bacino.

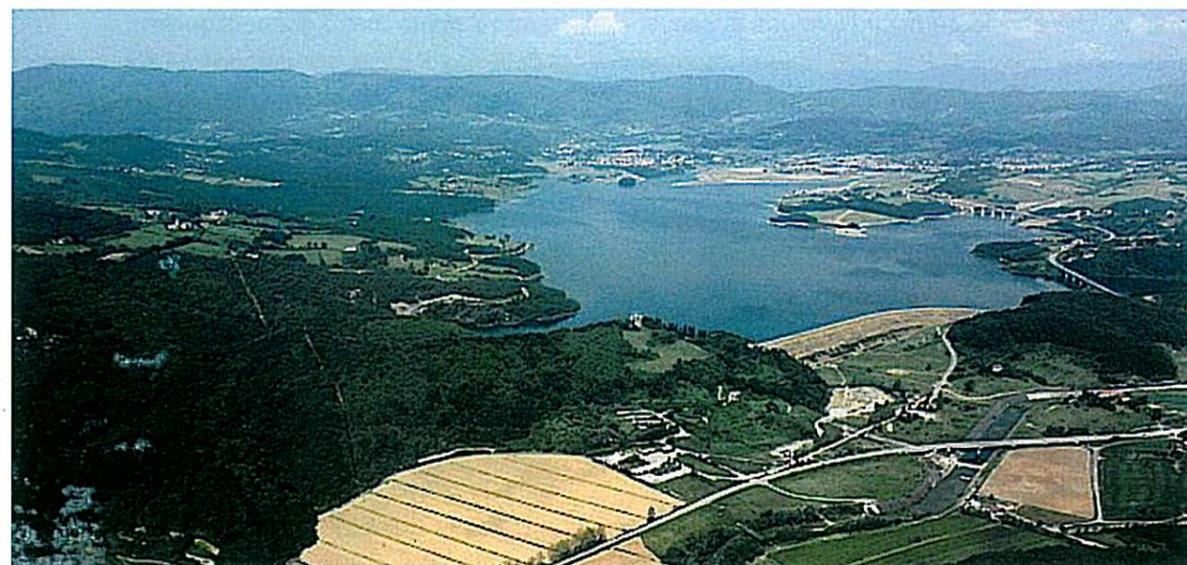


Foto n. 3 - Barberino di Mugello - Vista da lontano del lago di Bilancino

Foto n. 4 - Invaso di Bilancino - vista dello sfioratore da monte



Foto n. 5 - Invaso di Bilancino - vista dello scarico di superficie



1. IL BILANCIO IDRICO

E' opportuno innanzi tutto chiarire il significato di alcuni termini, in particolare le diverse accezioni di *bilancio* relativo alle acque di un bacino.

Il bilancio idrologico di un bacino idrografico è sintetizzato dalla relazione:

$$P = E + D$$

dove P = afflussi meteorici, E = evapotraspirazione, D = deflussi superficiali

In tale relazione non compare un termine relativo alle acque di sottosuolo, in considerazione del fatto che l'acqua che si infiltra torna poi in superficie (per vie naturali, tramite le sorgenti e l'alimentazione diretta dei corsi d'acqua, o artificialmente) e quindi si suddivide nuovamente fra E e D.

Questa assunzione è valida se si verificano le due condizioni seguenti:

- il bacino idrografico coincide col bacino idrogeologico, quindi non ci sono scambi sotterranei con i bacini contigui (tutta l'acqua che si infiltra riemerge all'interno del bacino stesso);
- il bilancio è riferito ad un anno medio relativo ad un periodo sufficientemente lungo (di norma 30 anni): in tal caso l'acqua che si infiltra corrisponde, mediamente, a quella che torna in superficie (sempre che i prelievi dal sottosuolo non riducano sostanzialmente le riserve). Ciò non è vero per un singolo anno:

se piove più della media l'infiltrazione supera le uscite di acqua dal sottosuolo (e le riserve aumentano).

Relativamente ai deflussi possiamo distinguere:

a) I deflussi naturali (o climatici): sono quelli conseguenti ai soli termini naturali del bilancio idrogeologico: precipitazioni, evapotraspirazione, infiltrazione, emergenza naturale delle acque sotterranee

Nei deflussi naturali possiamo distinguere il contributo del *ruscellamento superficiale* da quello delle acque sotterranee: in quest'ultimo si distinguono il *deflusso ipodermico*, che avviene nel suolo e che continua per qualche tempo (ore o giorni) dopo la fine della precipitazione, e il *deflusso di base*, che corrisponde all'acqua che si è infiltrata ad alimentare le riserve sotterranee, il quale continua, anche in assenza di nuove precipitazioni, fino a che non si è scaricata tutta l'acqua sotterranea al di sopra del livello di sfioro.

b) I deflussi attuali (o effettivi): sono quelli naturali alterati dai prelievi e dagli scarichi.

c) Il deflusso minimo vitale: è la portata al di sotto della quale un corso d'acqua non dovrebbe scendere per non pregiudicare l'equilibrio dell'ecosistema fluviale. Il suo valore deve essere definito caso per caso, non essendoci un criterio di assegnazione valido in generale.

Chiaramente i deflussi *misurati* alle stazioni di misura sono quelli *attuali*, mentre quelli *naturali* possono essere calcolati solo con approssi-

mazione sulla base dei metodi che verranno descritti in seguito.

E' evidente che il bilancio idrologico così espresso non dà indicazioni sulle risorse idriche sotterranee: considera l'infiltrazione e la riemersione in superficie una "partita di giro", di cui non importa conoscere l'entità.

Il bilancio idrogeologico di un bacino o di un'area qualsiasi deve invece considerare anche i volumi di acqua sotterranea coinvolti nel bilancio, e quindi ha la forma

$$P = E + D + I$$

dove I rappresenta l'infiltrazione, in altre parole il volume di acqua che, mediamente, si infiltra nel sottosuolo ad alimentare le falde e ne riemerge per vie naturali (sorgenti) o artificiali (emungimenti da pozzi).

Se il bacino idrogeologico non coincide con quello idrografico, i due membri dell'equazione del bilancio risulteranno diversi: la somma $E + D + I$ risulterà minore di P se parte dell'acqua che si infiltra nel bacino defluisce per vie sotterranee nei bacini contigui; risulterà maggiore nel caso opposto.

I termini del bilancio, sia idrologico che idrogeologico, possono essere espressi in volume (di solito in milioni di mc) oppure in millimetri: nel secondo caso si fa riferimento alla "lama d'acqua" ovvero all'altezza che l'acqua avrebbe se tutto il volume annuo fosse distribuito uniformemente sul bacino.

I bilanci idrologico e idrogeologico annui

descritti sopra sono *naturali*, nel senso che non comprendono eventuali trasferimenti artificiali di acqua da un bacino all'altro: anche se ci sono dei prelievi dalle falde, l'acqua estratta viene utilizzata nel bacino stesso e quindi fa parte dei termini in gioco.

Un bilancio idrogeologico completo può essere espresso da:

$$P + As + Au + Ai + Po = E + D + I + Du + Ae \pm Dr$$

dove, oltre ai termini già definiti, As = afflussi di superficie, Au = afflussi di sottosuolo, Ai = acqua importata da aree contigue (mediante tubi o canali), Po = acqua estratta dal sottosuolo mediante pompaggi, Du = deflussi di sottosuolo, Ae = acque esportate verso aree contigue, DR = variazione delle riserve sotterranee.

Per quanto riguarda le acque sotterranee, sono definite riserve totali tutte le acque presenti nel sottosuolo teoricamente estraibili mediante i pozzi; quindi comprendono l'*acqua di gravità*, libera di muoversi per gravità o per differenza di pressione, ma non l'*acqua di ritenzione*, quella trattenuta per adesione dalle rocce nel sottosuolo.

Le riserve totali si dividono in: riserve stagionali (o regolatrici), corrispondenti alla ricarica stagionale; riserve permanenti, che rappresentano le riserve residue, in genere assai più consistenti di quelle stagionali.

Le riserve sfruttabili corrispondono al volume d'acqua sotterranea che può essere attinto, mediamente, dal sottosuolo senza pregiudicare l'equilibrio idrogeologico. Mediamente perché le riserve permanenti rappresentano un patrimonio cui si può attingere in anni con scarsi afflussi meteorici, fidando in anni più piovosi per la loro ricostituzione. Se però gli attingimenti superano la ricarica media annua, le riserve andranno ad esaurirsi: si parla allora di *sfruttamento di tipo minerario*, appunto come le riserve di una miniera di carbone o di un giacimento petrolifero.

In prima approssimazione le riserve sfruttabili corrispondono alle riserve stagionali, ma il concetto non si limita all'aspetto quantitativo, bensì coinvolge anche aspetti di qualità, economici e di diritto d'uso.

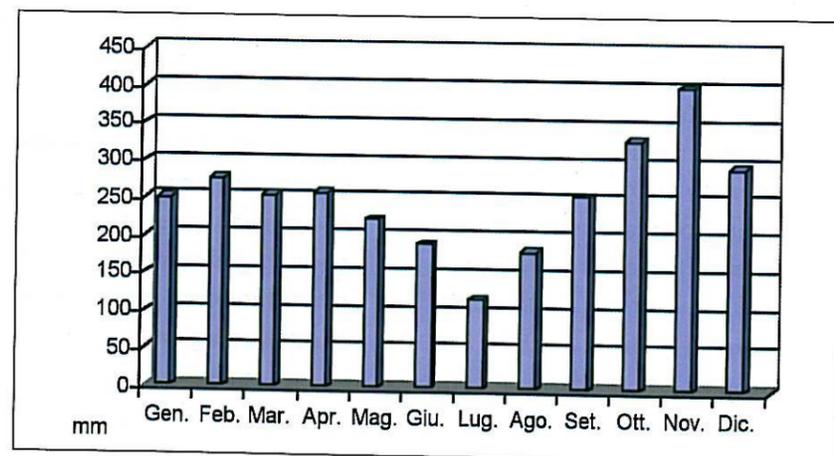
Secondo l'art. 3 della legge 36/1994, "l'Au-

torità di Bacino competente definisce ed aggiorna periodicamente il bilancio idrico diretto ad assicurare l'equilibrio fra le disponibilità di risorse reperibili o attivabili nell'area di riferimento ed i fabbisogni per i diversi usi nel rispetto dei criteri e degli obiettivi di cui agli articoli 1 e 2".

Il bilancio idrico va quindi inteso come confronto fra la necessità di acqua per i diversi usi e le effettive risorse del bacino. Ma per l'equilibrio fra i fabbisogni e le disponibilità idriche che l'Autorità di Bacino deve perseguire, non si può fare riferimento solo al bilancio medio annuo, ma occorre anche vedere come la risorsa idrica complessiva risulta distribuita nell'anno.

Per questo è necessario redigere i bilanci mensili, che permettono di calcolare la disponibilità idrica di ciascun mese dell'anno medio, nonché cercare di valutare le riserve d'acqua disponibili nei periodi di siccità.

Fig. 1 - Regime medio delle precipitazioni nel bacino dell'Arno, periodo 1960-1991.



2. CARATTERISTICHE IDROLOGICHE E IDROGEOLOGICHE DEL BACINO

Le precipitazioni medie annue nel bacino dell'Arno sono di circa 970 mm, con notevoli differenze fra le diverse aree, in relazione alla quota topografica, alla distanza dal mare e all'esposizione dei versanti: si va dagli oltre 2500 mm di alcune zone dell'Appennino ai 600 mm di ampie parti del Valdarno Inferiore.

Per il periodo 1960-1991, il deflusso medio annuo alla stazione di misura delle portate di S. Giovanni alla Vena, che sottende un bacino di 8203 Km² e si trova a circa 37 Km dalla foce (ma a valle di questa stazione l'Arno non ha più affluenti), è di 81,62 mc/s, pari a 2574 milioni di mc l'anno. In pratica c'è un contributo specifico di 0,31 mc l'anno per Km² di bacino.

Questa risorsa idrica è teoricamente elevata e potrebbe soddisfare tutte le richieste, sia potabili che agricole e industriali. Ma lo sfruttamento di questa risorsa potenziale è ostacolato dalla combinazione di due fattori: da un lato il fatto che le precipitazioni sono scarse nel periodo estivo (Fig. 1), quando maggiore è la domanda, dall'altro la prevalenza nel bacino di rocce a bassa permeabilità (Tav. 1), che non consente l'immagazzinamento nel sottosuolo di una parte consistente degli afflussi meteorici.

Le rocce che affiorano nel bacino possono essere così suddivise:

- rocce praticamente impermeabili: 14,5%
- rocce a permeabilità bassa: 29,0%
- rocce a permeabilità medio bassa: 31,1%
- rocce a permeabilità medio alta: 23,5%
- rocce a permeabilità alta: 1,9%

In queste condizioni, le piogge, più fre-

quenti nel periodo autunnale e primaverile, si traducono in massima parte in ruscellamento superficiale; conseguentemente il regime dei corsi d'acqua presenta forti variazioni di portata, con piene che comportano anche un elevato rischio alluvionale.

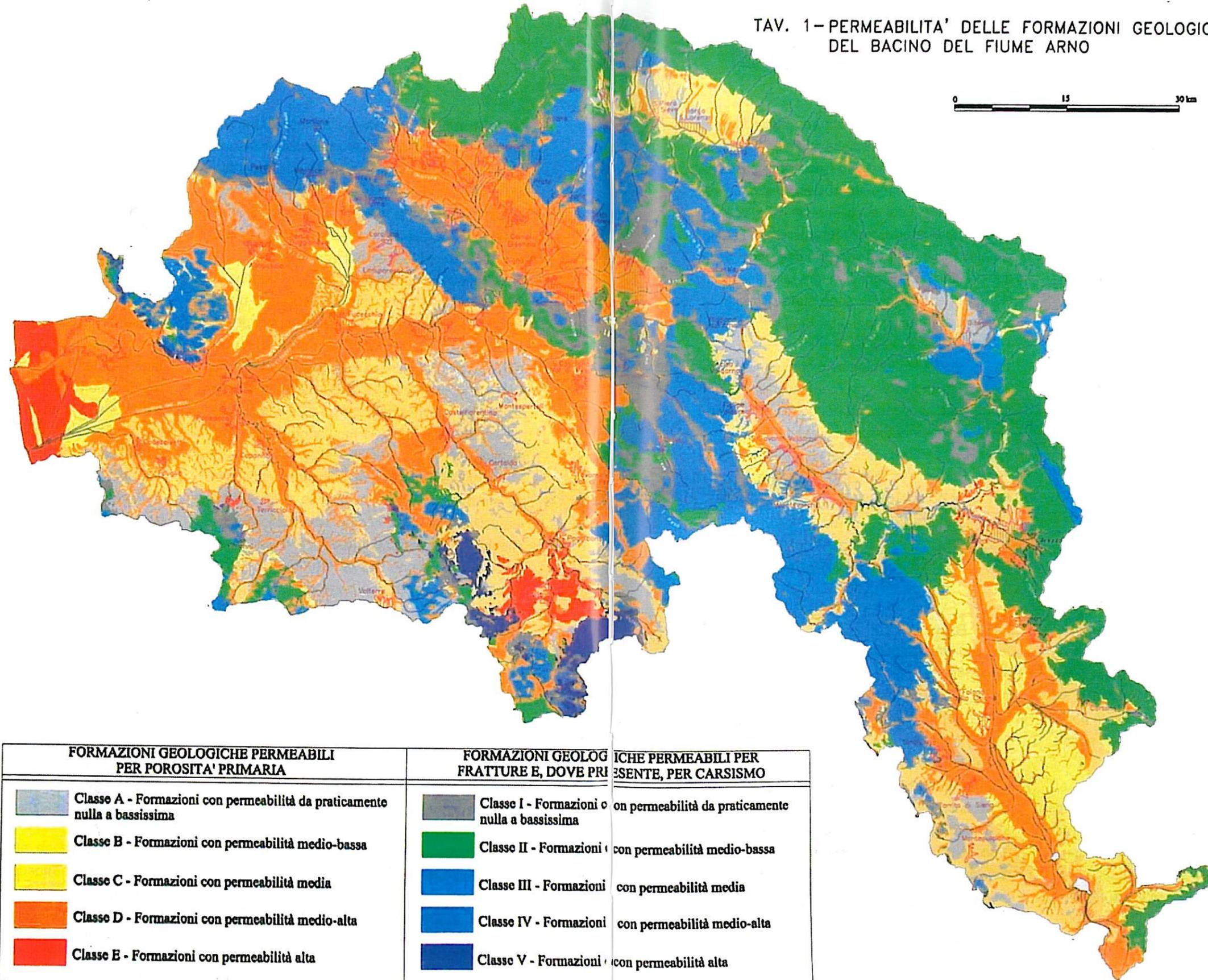
Questo rischio, dovuto fondamentalmente alle caratteristiche climatiche e geologiche del bacino, è aumentato nell'ultimo secolo per cause antropiche: l'abbandono delle capillari opere di regimazione idraulica nelle aree montane, un tempo curate dagli agricoltori ed il restringimento degli alvei, hanno fatto ridurre i tempi di corrivazione delle acque ed aumentare l'altezza dei picchi di piena. Così la frequenza delle alluvioni è aumentata e sono aumentati anche enormemente i danni conseguenti, dato che le aree un tempo lasciate libere per le esondazioni sono ora occupate da insediamenti abitativi e produttivi.

Inoltre, le opere idrauliche costruite per contenere le acque entro un alveo sempre più stretto hanno ridotto notevolmente gli scambi d'acqua con le zone golenali e con le falde. Questo ha avuto conseguenze non solo sull'aumento delle portate di piena, ma anche sulle magre: la riduzione dell'acqua immagazzinata ai lati del fiume, sia in superficie che nel sottosuolo, ha reso minimi gli apporti durante i periodi asciutti. In sostanza il progressivo isolamento del Fiume dal territorio che attraversa ha accentuato le sue caratteristiche torrentizie.

L'infiltrazione efficace (cioè l'acqua che s'infiltra nel sottosuolo ed alimenta le falde acquifere) è stata calcolata (Pranzini, 1992) in meno del 5% delle precipitazioni nelle arenarie

TAV. 1 - PERMEABILITA' DELLE FORMAZIONI GEOLOGICHE DEL BACINO DEL FIUME ARNO

0 15 30 km



FORMAZIONI GEOLOGICHE PERMEABILI PER POROSITA' PRIMARIA	FORMAZIONI GEOLOGICHE PERMEABILI PER FRATTURE E, DOVE PRESENTE, PER CARSIAMO
<p> Classe A - Formazioni con permeabilità da praticamente nulla a bassissima</p> <p> Classe B - Formazioni con permeabilità medio-bassa</p> <p> Classe C - Formazioni con permeabilità media</p> <p> Classe D - Formazioni con permeabilità medio-alta</p> <p> Classe E - Formazioni con permeabilità alta</p>	<p> Classe I - Formazioni con permeabilità da praticamente nulla a bassissima</p> <p> Classe II - Formazioni con permeabilità medio-bassa</p> <p> Classe III - Formazioni con permeabilità media</p> <p> Classe IV - Formazioni con permeabilità medio-alta</p> <p> Classe V - Formazioni con permeabilità alta</p>

3. ACQUE SUPERFICIALI

che affiorano in prevalenza nella dorsale appenninica. Solo nelle rocce carbonatiche carsificate, poco rappresentate nel bacino dell'Arno, l'infiltrazione efficace raggiunge e può superare il 50% di P (Piccini e Pranzini, 1990; Piccini e al., 1998).

La bassa portata delle sorgenti è una conferma della bassa permeabilità media delle rocce del bacino: tutte le sorgenti hanno una portata media inferiore ai 50 l/s, con la sola eccezione delle Vene degli Onci (Colle Val d'Elsa) che ha una portata media di 960 l/s.

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. Ma neppure dai depositi alluvionali delle pianure l'Arno ed i suoi affluenti ricevono alimentazione consistente: al contrario, questi acquiferi sono normalmente alimentati dai corsi d'acqua, dato che la superficie di falda risulta spesso depressa rispetto agli alvei, per effetto dei pompaggi.

La conseguenza di questa situazione è la bassa portata dell'Arno nel periodo asciutto: a S. Giovanni alla Vena, a monte di Pisa, la portata estiva scende frequentemente al di sotto di 5 mc/s.

In prima istanza è stato redatto, con i criteri metodologici di seguito esposti, il bilancio idrogeologico relativo alle acque superficiali dei sottobacini e bacini sottesi a stazioni di misura dei deflussi.

In particolare, considerato che la finalità dello studio è quella di individuare i valori della risorsa idrica in periodi di magra con una scansione almeno mensile, sono state condotte le seguenti elaborazioni:

1. il bilancio idrologico medio annuo;
2. i bilanci idrologici medi mensili;
3. la scomposizione del deflusso nelle tre componenti: ruscellamento superficiale, deflusso ipodermico e deflusso di base;
4. le portate di magra.

3.1. IL BILANCIO IDROLOGICO MEDIO ANNUO

3.1.1 BILANCIO IDROLOGICO MEDIO ANNUO DEI BACINI SOTTESI DA STAZIONI DI MISURA DEL DEFLUSSO

La redazione del bilancio idrologico (P = D + E) è relativamente semplice se riguarda un bacino idrografico, o una sua parte, chiusa in corrispondenza di una stazione di misura del deflusso. Queste stazioni sono composte da un registratore in continuo del livello idrico in una sezione fluviale. Mediante una serie di misure di portata, eseguite di solito mediante mulinello idrometrico, in corrispondenza di

diversi livelli, viene ricostruita la curva di correlazione fra le altezze idrometriche e le portate. Questa curva consente di ottenere la portata corrispondente ad ogni livello registrato. La curva di correlazione deve essere periodicamente riverificata, mediamente ogni due anni ed in ogni caso dopo ogni evento di piena

importante che può avere modificato la sezione fluviale.

Per avere un bilancio idrologico medio annuo attendibile, è necessario che la stazione abbia funzionato per un numero di anni statisticamente significativo: 30 anni è considerato un periodo sufficiente. Attualmente, solo le

Tabella 1 - Stazioni di misura dei deflussi.

Stazione	Kmq di bacino sotteso
A - Canale Maestro della Chiana al ponte della ferrovia	1285,180
B - Arno a Sabbiano	704,619
C - Arno a Stia	60,202
D - Sieve a Fornacina	809,131
E - Sieve a Ponte di Bilancino	150,421
F - Bisenzio a Gamberane	150,828
G - Elsa a Castelfiorentino	798,309
H - Bisenzio a Fraticello	59,619
I - Nievole a Colonna	39,337
L - Arno a San Giovanni alla Vena	8202,940
M - Arno a Nave di Rosano	4124,980
N - Greve al ponte dei Falciani	116,057
O - Pesa a Sambuca	113,281
P - Era a Capannoni	335,313
Q - Vinci a Cireglio	1,440

stazioni idrometriche dell'Ufficio Idrografico dell'Arno e Bacini Limitrofi hanno una serie storica significativa, sia pure con un diverso numero di anni. Per il bacino dell'Arno sono disponibili i dati di 15 stazioni idrometriche (Tabella 1 e Tav. 2).

In altre sezioni fluviali sono state misura-

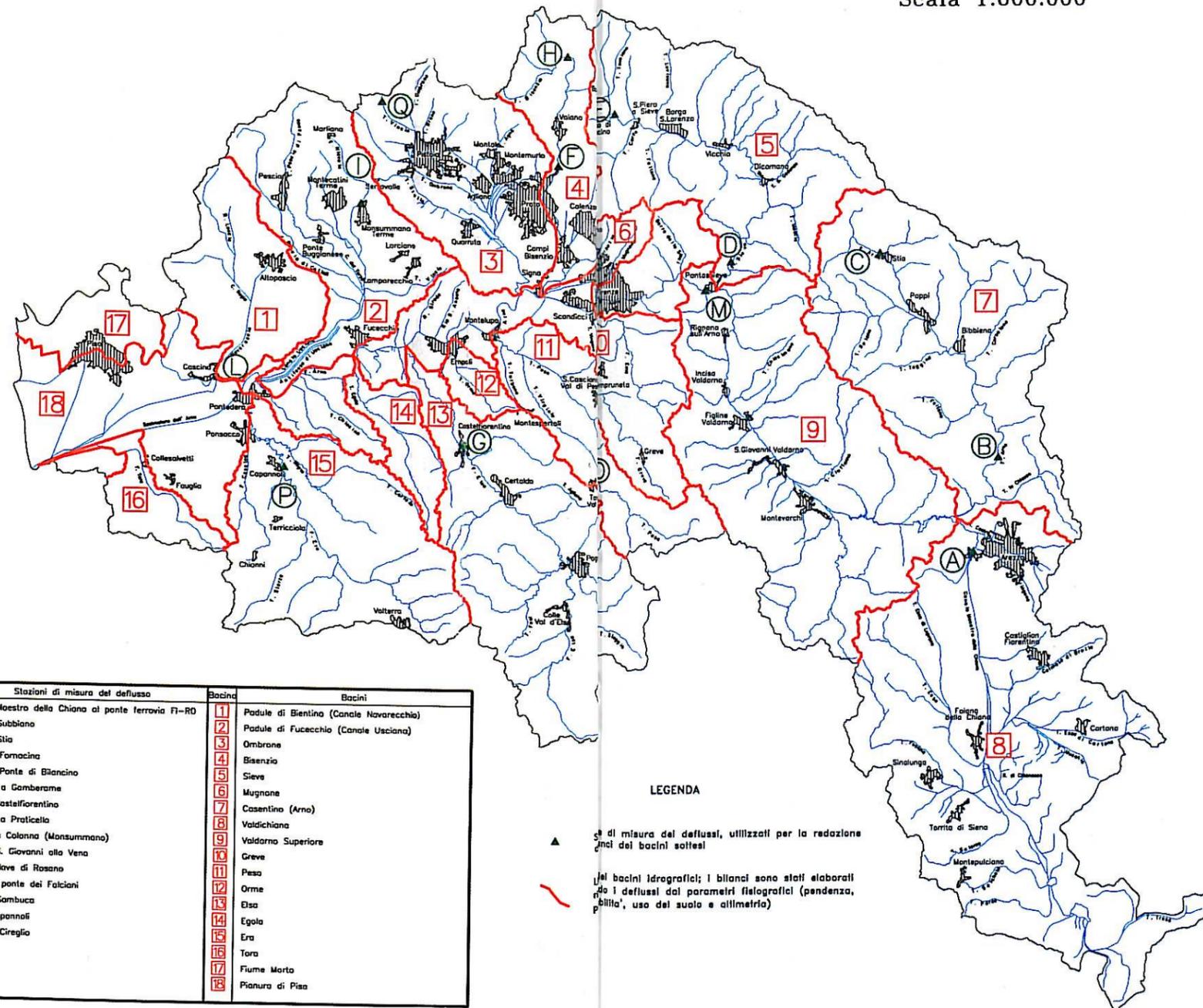
te le portate per un numero di anni insufficiente dal punto di vista statistico; in genere queste stazioni sono state in funzione prima dell'ultima guerra e le misure erano finalizzate al calcolo dei volumi d'acqua che potevano essere raccolti in bacini artificiali per la produzione di energia elettrica.

¹ Valori più elevati, fino al 20%, sono stati registrati in alcune aree di affioramento della Formazione Marnoso-arenacea attraversate dalla Galleria Firenzuola della linea ferroviaria ad alta velocità, in corrispondenza di fasce di fratture aperte ed estese.

TAV. 2 - CARTA DEI BACINI DEI QUALI E' STATO REDATTO IL BILANCIO

0 15 30km

Scala 1:600.000



Stazione	Stazioni di misura del deflusso	Bacino	Bacini
(A)	4520 Canale Maestro della Chiana al ponte ferrovia FI-RD	1	Padule di Bientina (Canale Navarecchia)
(B)	4410 Arno a Subbiano	2	Padule di Fucecchio (Canale Usciana)
(C)	4380 Arno a Stia	3	Ombrone
(D)	4640 Sieve a Fornacina	4	Bisenzio
(E)	4610 Sieve a Ponte di Bilancino	5	Sieve
(F)	4780 Bisenzio a Gamberame	6	Mugnone
(G)	4970 Elsa a Castelfiorentino	7	Casentino (Arno)
(H)	4750 Bisenzio a Praticella	8	Valdichiana
(I)	5040 Nievole a Colonna (Monsummano)	9	Valdarno Superiore
(L)	5190 Arno a S. Giovanni alla Vena	10	Greve
(M)	4660 Arno a Nave di Rosano	11	Pesa
(N)	4710 Greve al ponte dei Falciani	12	Orme
(O)	4910 Pesa a Sambuca	13	Elsa
(P)	5130 Era a Capannoli	14	Egola
(Q)	- Vinci a Cireglio	15	Era
		16	Tora
		17	Fiume Morto
		18	Pianura di Pisa

LEGENDA

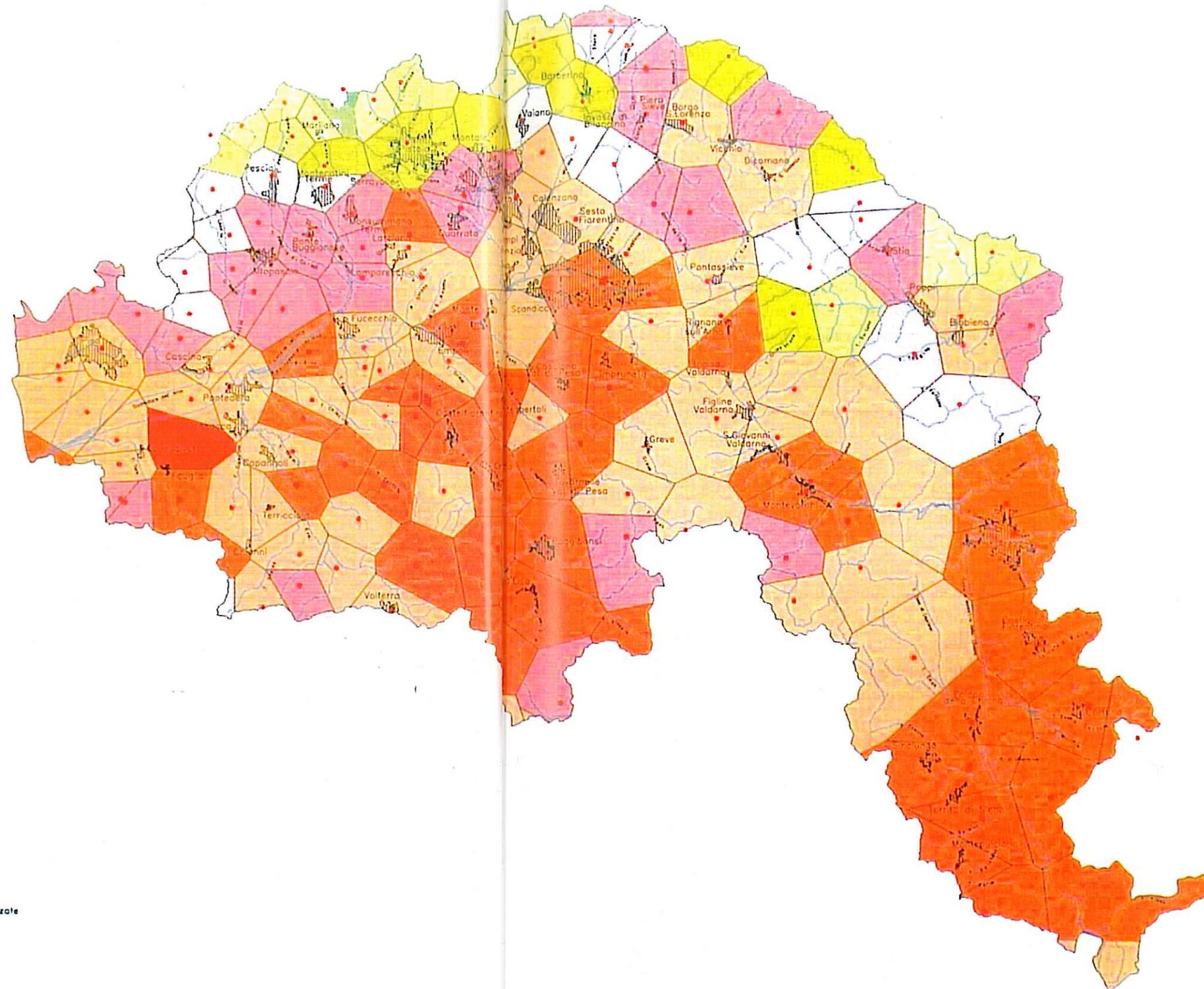
▲ Stazioni di misura del deflusso, utilizzati per la redazione del bilancio dei bacini sottesi

— Bacini idrografici; i bilanci sono stati elaborati sulla base dei deflussi dai parametri fisiografici (pendenza, area, pendenza, uso del suolo e altimetria)

TAV. 3 - CARTA DELLE PRECIPITAZIONI
MEDIE ANNUE (1960 - 1991)

0 15 30km

Scala 1:600.000



Dato che, per bacini idrografici coincidenti con quelli idrogeologici il deficit di deflusso (P - D) è uguale alla evapotraspirazione reale, si è ritenuto inutile continuare l'applicazione dei suddetti metodi di calcolo, perché avrebbero fornito dei valori certamente meno validi della differenza fra due termini effettivamente misurati.

Nelle Tabelle 3 e 4 sono riportati i bilanci, ottenuti con i calcoli illustrati nel paragrafo precedente, espressi rispettivamente in mm e in milioni di mc.

Per la stazione del Canale Maestro della Chiana al ponte della ferrovia Firenze-Roma, oltre al bilancio del periodo 1960-1991, è stato calcolato quello del periodo 1960-1968, ovvero con i dati disponibili degli anni precedenti alla costruzione della diga sul torrente Foenna, la cui capacità (4,1 milioni di metri cubi) viene utilizzata ad uso irriguo. Questa diga altera i deflussi, in quanto il volume invasato si traduce in evapotraspirazione dalla zona irrigata. Tuttavia si è ritenuto che il coefficiente di deflusso del primo periodo (0,27) risulta maggiore di quello del periodo successivo alla costruzione della diga (0,25) soprattutto per la maggiore piovosità: 889,64 mm contro 781,69.

Analogamente per l'Arno per la stazione di S. Giovanni alla Vena sono stati redatti altri due bilanci, oltre a quello del periodo 1960-1991: uno dal 1960 al 1984 e l'altro dal 1986 al 1991 per le variate condizioni idrografiche dell'area afferente. In particolare infatti dal 1986 il Canale Usciana, emissario del Padule di Fucecchio e della Valdinievole, affluente del-

l'Arno in corrispondenza delle cateratte di Usciana, è stato collegato allo Scolmatore tramite un canale terminante con una botte a sifone in corrispondenza dell'incile dello Scolmatore stesso. A seguito della nuova conformazione, in condizioni di piena dell'Arno, vengono chiuse le cateratte e l'Usciana recapita direttamente nello Scolmatore; in condizioni di magra, in considerazione anche dell'elevato carico inquinante dell'Usciana, lo stesso viene convogliato in Arno per favorire la diluizione. In considerazione di questo funzionamento, avvalorato anche dalla modesta differenza tra i bilanci redatti, si è ritenuto di poter riportare nella tabella il bilancio medio del periodo 1960-1991.

Osserviamo che i coefficienti di deflusso D/P sono assai diversi nei diversi sottobacini dell'Arno. Si va dai massimi del Vincio a Cireglio (0,72) e dall'Arno a Stia (0,65), ai minimi del Canale Maestro della Chiana, della Greve al Ponte dei Falciani e dell'Elsa a Castelfiorentino (0,25). I valori più alti sono quelli dei sottobacini di quota più alta, nei quali una elevata altezza di deflusso si associa ad una minore temperatura media annua (quindi ad una minore evapotraspirazione) e ad una maggiore acclività media.

3.1.2 Bilancio idrologico medio annuo dei bacini privi di stazioni di misura del deflusso

Per una valutazione completa delle risorse idriche del bacino è necessario estendere i bilanci anche a quei bacini idrografici non dotati di stazioni di misura dei deflussi.

Tabella 3 - Bilanci idrogeologici medi annui, in mm, alle sezioni idrometriche (Bacini della serie A), sulla base delle misure di deflusso.

	Bacino	Area Km ²	Periodo	Afflussi mm	Deflussi mm	Evapotrasp. mm	D/P
A	Can. M. della Chiana al ponte FS	1285.18	'60-'91	781.69	193.75	587.94	0.25
A	Can. M. della Chiana al ponte FS	1285.18	'60-'68	889.64	241.60	647.74	0.27
B	Arno a Subbiano	704.62	'60-'91	1215.75	850.40	365.35	0.63
C	Arno a Stia	60.20	'60-'91	1210.58	787.93	422.65	0.65
D	Sieve a Fornacina	809.13	'60-'91	1134.33	560.28	574.05	0.49
E	Sieve a Ponte del Bilancino	150.42	'60-'91	1266.32	640.53	625.78	0.49
F	Bisenzio a Gamberame	150.83	'60-'91	1417.80	942.50	475.30	0.55
G	Elsa a Castelfiorentino	798.31	'60-'91	835.98	201.66	634.32	0.25
H	Bisenzio a Praticello	59.62	'60-'91	1605.74	860.00	745.73	0.54
I	Nievole a Colonna	39.34	'60-'91	1331.65	514.72	816.93	0.35
L	Arno a S.Giovanni alla Vena	8202.94	'60-'91	969.67	302.04	667.64	0.32
L	Arno a S.Giovanni alla Vena	8202.94	'60-'84	1006.82	311.02	695.80	0.32
L	Arno a S.Giovanni alla Vena	8202.94	'86-'91	865.96	265.55	600.41	0.32
M	Arno a Nave di Rosano	4124.98	'60-'91	971.37	421.08	550.29	0.43
N	Greve a Ponte dei Falciani	116.06	'60-'91	851.64	228.78	622.86	0.25
O	Pesa a Sambuca	113.28	'60-'91	879.44	350.40	529.03	0.38
P	Era a Capannoli	335.31	'60-'91	885.51	325.37	560.14	0.36
Q	Vincio a Cireglio	1.44	'60-'91	1735.36	1250.48	484.87	0.72

Tabella 4 - Bilanci idrogeologici medi annui, in milioni di mc, alle sezioni idrometriche (Bacini della serie A), sulla base delle misure di deflusso.

	Bacino	Area Km ²	Periodo	Afflussi Mmc/a	Deflussi Mmc/a	Evapotrasp. Mmc/a	D/P
A	Can. M. della Chiana al ponte FS	1285.18	'60-'91	1004.62	246.29	758.33	0.25
A	Can. M. della Chiana al ponte FS	1285.18	'60-'68	1143.35	308.17	835.18	0.27
B	Arno a Subbiano	704.62	'60-'91	856.64	542.04	314.60	0.63
C	Arno a Stia	60.20	'60-'91	72.88	47.43	25.44	0.65
D	Sieve a Fornacina	809.13	'60-'91	917.82	446.44	471.38	0.49
E	Sieve a Ponte del Bilancino	150.42	'60-'91	190.48	92.84	97.64	0.49
F	Bisenzio a Gamberame	150.83	'60-'91	213.84	117.78	96.07	0.55
G	Elsa a Castelfiorentino	798.31	'60-'91	667.37	64.43	502.94	0.25
H	Bisenzio a Praticello	59.62	'60-'91	95.73	51.47	44.26	0.54
I	Nievole a Colonna	39.34	'60-'91	52.38	18.40	33.98	0.35
L	Arno a S.Giovanni alla Vena	8202.94	'60-'91	7954.18	2573.84	5380.34	0.32
L	Arno a S.Giovanni alla Vena	8202.94	'60-'84	8258.88	2551.28	5707.60	0.32
L	Arno a S.Giovanni alla Vena	8202.94	'86-'91	7103.42	2178.29	4925.13	0.32
M	Arno a Nave di Rosano	4124.98	'60-'91	4006.87	1724.86	2282.00	0.43
N	Greve a Ponte dei Falciani	116.06	'60-'91	98.84	25.01	73.83	0.25
O	Pesa a Sambuca	113.28	'60-'91	99.62	38.13	61.49	0.38
P	Era a Capannoli	335.31	'60-'91	296.92	107.56	189.37	0.36
Q	Vincio a Cireglio	1.44	'60-'91	2.50	1.80	0.70	0.72

Nella Tabella 5 sono elencati i bacini idrografici (delimitati nella Tav. 2), denominati della Serie B, per i quali i bilanci medi annui sono stati ottenuti utilizzando i dati meteorologici

relativi e, con una procedura originale, mediante analisi delle caratteristiche fisiografiche.

Tabella 5 - Bacini idrografici non sottesi da stazioni idrometriche (bacini della serie B) dei quali sono stati redatti i bilanci.

Bacino	Area (Km ²)
1 - Bientina (Canale emissario)	308.58
2 - Padule di Fucecchio (Canale Usciana)	489.70
3 - Ombrone	484.31
4 - Bisenzio	308.04
5 - Sieve	837.93
6 - Mugnone	71.74
7 - Casentino (Arno fino alla confluenza del Canale maestro della Chiana)	877.41
8 - Valdichiana (Canale Maestro della Chiana)	1370.55
9 - Valdarno Superiore (Arno fra Canale Maestro della Chiana e Sieve)	1018.55
10 - Greve	290.42
11 - Pesa	336.23
12 - Orme	56.37
13 - Elsa	865.12
14 - Egola	114.29
15 - Era	595.48
16 - Tora	105.64
17 - Fiume Morto	119.91
18 - Pianura di Pisa	430.26

Si fa osservare che la superficie dei bacini della Tabella 5 può risultare leggermente diversa da quella riportata in altri Quaderni dell'Autorità di bacino, pur derivando dallo stesso Sistema Informativo Territoriale, perché i limiti assunti possono non coincidere. Ad esempio, il Valdarno Superiore è stato qui considerato quella parte del bacino idrografico dell'Arno compresa fra la confluenza del Canale Maestro della Chiana e quella della Sieve, mentre dal punto di vista geografico la valle è più piccola.

La maggior parte di questi corrispondono a sottobacini idrografici completi, altri a parti del bacino dell'Arno (ad es. il Valdarno Superiore); quelli del Fiume Morto e della pianura di Pisa sono in realtà pianure solcate da una serie di canali.

Alcuni dei primi bacini coincidono quasi con i bacini della Tabella 1: ad esempio, il baci-

no del Casentino è di poco più ampio del bacino dell'Arno sotteso dalla stazione idrometrica di Subbiano; il bacino del F. Sieve è di poco maggiore rispetto a quello sotteso della Sieve a Fornacina. In questi casi si è comunque ritenuto utile ricalcolare i bilanci alle chiusure naturali dei bacini idrografici.

Per questi bacini, i dati delle stazioni pluviometriche consentono, tramite il metodo dei topoi, il calcolo dell'afflusso medio annuo. Inoltre, utilizzando i valori di temperatura registrati nelle 27 stazioni termometriche (Tabella 6), è possibile ottenere le temperature medie annue dei singoli bacini. Con questi dati sarebbe teoricamente possibile calcolare il deflusso medio annuo, passando attraverso il calcolo della evapotraspirazione reale con uno dei metodi in uso. Ma, come abbiamo visto, tali metodi forniscono risultati imprecisi.

Tabella 6 - Stazioni termometriche e relativi valori medi del periodo.

Stazioni nel bacino dell'Arno	Quota	Periodo di osservazione (1960 - 1991)												
		Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giù.	Lug.	Ago.	Set.	Ott.	Nov.	Dic.	Media annuale
Stia	479	4,41	5,08	7,38	10,61	14,89	18,31	20,91	21,11	17,77	13,65	8,42	4,98	12,29
Camaldoli (Eremo)	1111	0,63	1,06	3,34	6,37	10,83	14,59	17,85	17,72	14,55	10,10	5,10	1,70	8,65
Montepulciano	605	4,90	5,91	8,66	12,07	16,70	20,55	23,86	23,58	19,87	14,72	9,61	5,88	13,86
Cortona (Redentoristi)	393	6,37	7,41	9,83	13,12	17,48	21,18	24,73	24,66	21,26	16,74	11,19	7,26	15,09
Arezzo (S.Fabiano)	277	5,40	6,77	9,38	12,65	16,66	20,23	23,50	23,58	20,35	15,89	10,26	6,49	14,26
S. Giovanni Valdarno	160	4,67	6,22	9,25	11,92	16,22	19,96	23,23	22,66	19,25	14,71	8,74	5,62	13,54
Montevarchi (Circonvall.)	160	4,84	6,66	8,86	12,99	17,03	20,19	23,06	22,80	19,45	14,14	10,06	5,23	13,78
Vallombrosa	955	1,62	2,01	4,27	7,23	11,34	14,87	18,05	17,92	14,81	10,72	5,83	2,49	9,26
Borgo S. Lorenzo	193	4,31	5,89	8,52	12,32	16,33	20,00	22,61	22,53	19,33	14,64	9,19	5,09	13,40
Consuma (Fattoria del Moscia)	950	1,56	2,22	4,27	7,27	11,09	14,72	17,74	17,83	14,96	10,64	6,20	2,77	9,27
Firenze (Oss. Ximeniano)	79	6,42	7,77	10,39	13,54	17,58	21,34	24,50	24,13	20,78	15,96	10,59	6,98	15,00
Prato in Toscana	74	6,05	7,64	10,23	13,81	17,99	21,48	24,46	24,33	20,98	16,18	10,53	6,64	15,03
Pistoia (Oss. Meteorologico)	88	5,87	7,20	9,74	12,94	16,98	20,58	23,66	23,43	20,13	15,61	10,19	6,48	14,40
Empoli	27	5,69	7,23	9,68	13,03	16,97	20,79	23,47	23,50	20,05	15,53	10,39	6,54	14,41
Poggibonsi	241	5,47	6,51	8,84	11,82	15,83	19,50	22,34	22,31	19,01	14,55	9,69	6,24	13,51
S. Miniato	137	6,61	7,69	10,18	13,35	17,21	20,78	23,93	23,73	20,47	16,25	10,94	7,28	14,87
Marti	165	5,20	6,15	10,00	13,75	19,70	21,70	26,15	26,25	23,45	18,30	11,00	7,95	15,80
Pescia	81	6,15	7,40	9,80	12,77	16,61	20,22	23,35	23,00	19,92	15,60	10,51	6,86	14,35
Castelmartini	23	6,03	7,66	10,40	13,46	17,55	21,09	23,80	23,55	20,53	15,94	10,32	6,52	14,74
Castelfranco di Sotto	17	3,90	5,65	9,15	12,80	18,30	20,50	24,35	24,30	21,60	16,20	9,95	6,80	14,46
Volterra (Osp. Psichiatrico)	500	5,31	6,12	8,46	11,34	15,38	19,01	22,48	22,55	19,15	14,89	9,76	6,06	13,38
Bagni di Casciana	141	6,43	7,66	10,18	13,22	16,96	20,88	23,82	23,75	20,64	16,15	11,07	7,47	14,85

Per il calcolo dei deflussi è stata pertanto usata una metodologia originale, basata sulla considerazione che i deflussi dipendono non solo dai dati climatici (precipitazione e temperatura), ma anche dalle caratteristiche fisiografiche dei bacini, in particolare dall'*acclività*, dalla *permeabilità* e dall'*uso del suolo*.

L'*acclività* favorisce il ruscellamento superficiale a scapito dell'infiltrazione, diminuisce il tempo di corrivazione e quindi fa diminuire la percentuale di acqua che evapotraspira: in ultima analisi la maggiore acclività si associa (a parità degli altri parametri in gioco) ad un maggiore coefficiente di deflusso.

La *permeabilità* dei terreni e delle rocce affioranti condiziona il rapporto fra l'acqua che ruscella e quella che s'infiltra: a maggiore permeabilità corrisponde una maggiore infiltrazione. L'acqua di sottosuolo, una volta tornata in superficie, risulta disponibile per le piante per un tempo maggiore rispetto a quella che ruscella. In pratica, aumenta l'evapotraspirazione e diminuisce il coefficiente di deflusso.

Si deve dire che non tutti i ricercatori sono d'accordo con questa conclusione, che risulta peraltro confermata, per i bacini dell'Arno forniti di stazioni idrometriche, dalla correlazione fra i due parametri. Possono fare eccezione a questa regola i bacini con rocce carsificate, dove l'acqua d'infiltrazione confluisce a poche sorgenti e raggiunge il reticolo idrografico, dando scarso contributo all'evapotraspirazione.

L'*uso del suolo*, inteso anche come tipolo-

gia della copertura vegetale, ha notevole influenza sull'evapotraspirazione, quindi ancora una volta sul coefficiente di deflusso: aree coltivate o con bosco determinano un coefficiente di deflusso minore rispetto a quelle con roccia nuda o vegetazione scarsa.

La validità di queste relazioni è stata controllata, per i bacini dotati di stazioni di misura delle portate, tramite correlazioni binarie fra il coefficiente di deflusso e i parametri direttamente esprimibili con un numero: da una parte i coefficienti di deflusso, dall'altra gli afflussi medi annui (Fig. 2), l'*acclività* media (Fig. 3) e la temperatura media (Fig. 4)².

Per correlare i parametri del deflusso con la permeabilità e l'uso del suolo, è stato necessario trovare un metodo per esprimere questi due parametri mediante un solo numero.

Per la *permeabilità* è stato usato il seguente metodo.

Le formazioni geologiche della Carta Geologica in scala 1:200.000 dell'Autorità di Bacino sono state raggruppate in 10 classi, 5 per le rocce permeabili per porosità e 5 per quelle permeabili per fratture, per le quali si ritiene che la permeabilità decresca dalla classe a alla classe e, e dalla classe I alla classe V.

Per le sigle delle formazioni geologiche si rimanda alla Carta Geologica sopra detta.

A ciascuna classe è stato attribuito un numero che si ritiene esprima il grado di permeabilità di quella classe di formazioni geologiche (Tab. 7).

² Per queste correlazioni sono state utilizzate anche le stazioni idrometriche di Serchio a Borgo a Mozzano, Turrite Secca a Castelnuovo Garfagnana e Lima a Fabbriche di Casabasciana, per le quali c'è un numero di anni di misure statisticamente significativo.

Fig. 2 - Correlazione afflussi - coefficienti di deflusso per i bacini della serie A

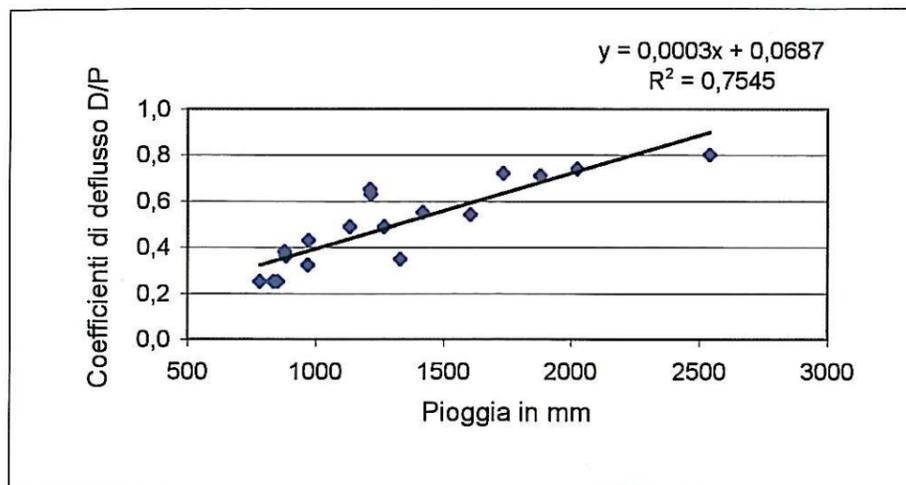


Fig. 3 - Correlazione acclività - coefficienti di deflusso per i bacini della serie A

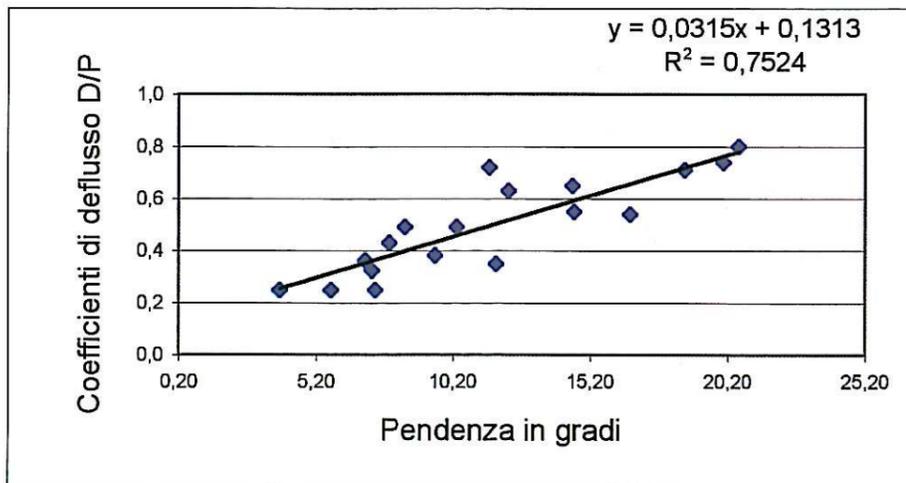


Fig. 4 - Correlazione temperatura media - coefficienti di deflusso per i bacini della serie A

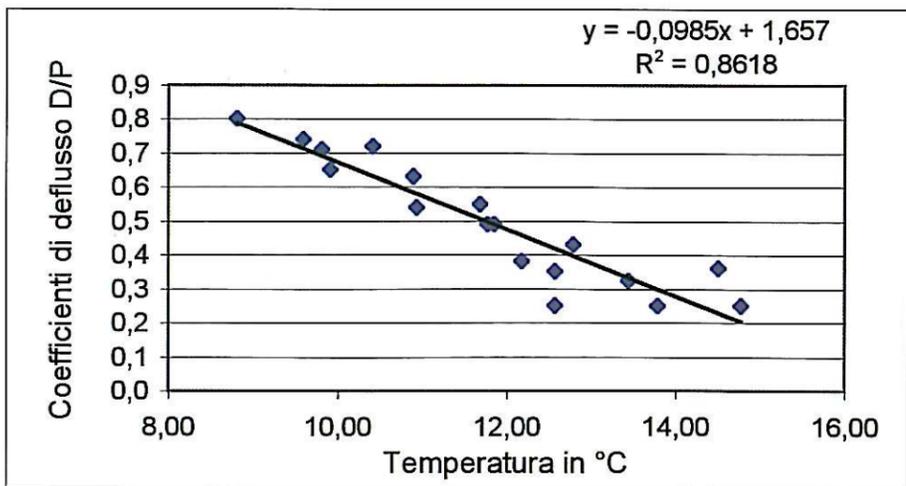


Tabella 7 - Classificazione delle formazioni geologiche del bacino dell'Arno in base alla loro permeabilità.

classe punteggio	Permeabilità per porosità					Permeabilità per fratture e carsismo				
	a 1	b 2	c 4	d 6	e 8	I 1	II 2	III 4	IV 6	V 7
	agQ	t	f	dis	s	asP	bnS	Mlar	cC	cm
	Vag	p	e	dt	d2	fVR	pb	MaP	mac	cc
	arg	fIC	at	all	d1	cb	a	Msg	cs2	mM
	Pag	fA-Cv	sV	cd	tv2	fP3	fh	Mcb2	cs1	mbr
	Pm	Pla	Qf12	fA-C	tv1	fPaC	cbh	Mcb1	cs2M	mcm
	Mlag	Pags	sB	VVB	cM	ol	fV	aS	cs1M	gr
	Mg	Mag	Vcg	Vs	McR	fP2	pf	bn	mcs2	
	Mlag2	co	Qcal	Pls		fP1	fM	d	mcs1	
		r	Ps3'	ctM		sc	fl	pfw		
			Ps	cg/mg		mp	mar	D		
			Mcg2	Pca3		sMM	aC	G		
			Micg	Pcg			scm	S		
				Pbm			scd	aP		
				Pc			di	alb		
				Pcg3			fT	bw		
				Pcg1			vr	b		
				Mcg			pmg	bD		
				Mlm			msc	g		
							brA	aM		
							scSL	mg		
							fB	Nu		
							mmp	ra		
								cR		
								mdi		
								qz		
								ang		

Di fatto non c'è la possibilità di attribuire i valori veri di permeabilità alle diverse formazioni geologiche, perché:

- non ci sono misure di permeabilità relative alla maggior parte delle formazioni;
- anche se ci fossero, in rocce permeabili per discontinuità secondarie (faglie, fratture, discontinuità carsiche) dovrebbero essere molto numerose, per avere un valore medio significativo;
- la permeabilità che interessa in questo caso è la capacità di infiltrazione dell'acqua meteorica,

piuttosto che la conducibilità idraulica che si ricava dalle prove nei pozzi e nei fori di sondaggio.

Pertanto l'attribuzione dei valori di permeabilità alle diverse classi è stata fatta sui valori del coefficiente d'infiltrazione (I/P) trovati in letteratura per formazioni geologiche simili (Celico, 1988), corretti in base alle conoscenze idrogeologiche specifiche sulle formazioni toscane (Pranzini, 1990/1992).

Dal sistema informativo territoriale dell'Autorità di Bacino sono stati calcolati, per cia-

scuno dei bacini considerati (sia quelli sottesi da stazioni di misure dei deflussi che gli altri), le percentuali delle aree di affioramento delle 10 classi di permeabilità (Tabella 8); poi è stata fatta la media ponderata, ottenendo per ogni bacino un numero.

Con questo metodo, in pratica, si è ottenuto un numero che esprime il grado di permeabilità medio di ciascun bacino, numero confrontabile con i numeri degli altri bacini e che ha permesso l'analisi statistica, finalizzata alla regressione multipla fra i parametri idroclimatici e quelli fisiografici. Infatti il confronto fra l'indice di permeabilità media e il coefficiente di deflusso dei bacini della serie A mostra una buona correlazione lineare (Fig. 5), a dimo-

strazione della validità dell'indice scelto e della dipendenza del coefficiente di deflusso dalla permeabilità.

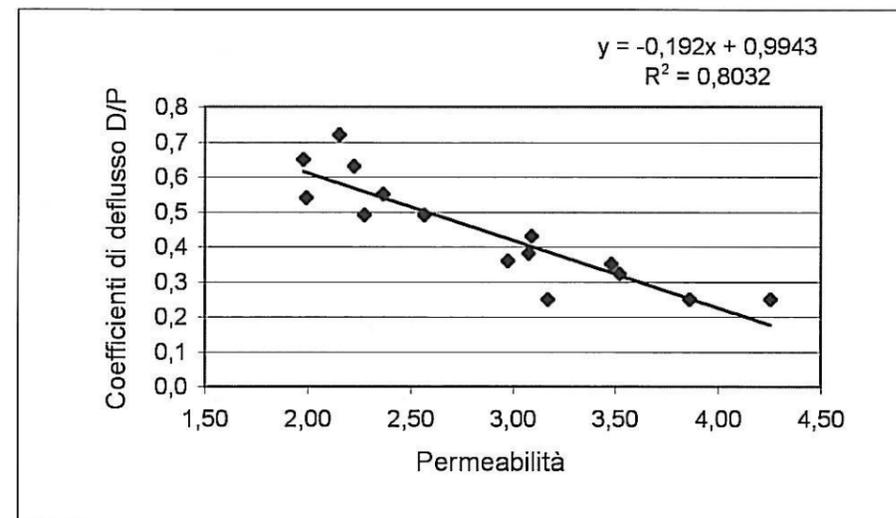
Per l'uso del suolo il procedimento è stato un po' diverso. Anche in questo caso è stato utilizzato il sistema informativo territoriale dell'Autorità di Bacino, che contiene l'uso del suolo del punto centrale di una maglia quadrata di 400 metri di lato. Le tipologie sono state raggruppate in 6 classi, di seguito elencate, per le quali si ritiene che l'evapotraspirazione reale diminuisca dalla A alla F.

A = Specchi d'acqua, corsi d'acqua, laghi, invasi artificiali, lagune, estuari, paludi con vegetazione arborea, paludi senza vegetazio-

Tabella 8 - Permeabilità dei bacini dell'Arno (serie A).

	Formazioni permeabili per porosità (%)					Formazioni permeabili per fratture e carsismo (%)					Coeff. di perm.
	a	b	c	d	e	I	II	III	IV	V	
A - Can.M.della Chiana a p.Ferr. Fi-Ro	2,6	19,5	19,9	32,3	0,0	1,4	13,8	10,0	0,3	0,0	3,86
B - Arno a Subbiano	2,8	0,0	1,7	4,2	0,0	10,0	73,8	7,4	0,0	0,0	2,22
C - Arno a Stia	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	4,5	94,9	0,0	0,0	0,0	1,98
D - Sieve a Fomacina	2,5	0,0	13,8	5,6	0,0	13,0	54,0	11,1	0,0	0,0	2,57
E - Sieve a Ponte del Bilancino	2,2	0,0	9,9	2,5	0,0	26,8	45,2	13,3	0,1	0,0	2,27
F - Bisenzio a Gamberame	0,0	0,0	0,0	3,9	0,0	4,6	78,5	12,9	0,0	0,0	2,37
G - Elsa a Castelfiorentino	12,1	0,0	36,3	14,7	6,7	3,7	8,4	6,6	1,0	10,5	4,26
H - Bisenzio a Praticello	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	1,2	98,6	0,0	0,0	0,0	1,99
I - Nievole a Colonna	0,0	0,0	0,5	6,8	0,2	21,7	1,0	69,5	0,3	0,0	3,48
L - Arno a S.Giovanni alla Vena	7,0	3,5	16,0	23,3	0,8	7,5	25,5	15,1	0,3	1,1	3,52
M - Arno a Nave di Rosano	3,9	6,5	15,2	15,3	0,1	6,3	39,4	13,2	0,1	0,0	3,09
N - Greve a Ponte dei Falciani	0,0	0,0	0,1	16,0	0,0	33,2	7,7	43,0	0,0	0,0	3,17
O - Pesa a Sambuca	0,0	0,0	0,1	3,4	0,0	16,9	24,1	55,5	0,0	0,0	3,08
P - Era a Capannoli	43,2	1,6	14,5	25,0	0,2	0,7	10,6	3,1	0,6	0,4	2,97
Q - Vinci a Cireglio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	61,7	0,0	38,3	0,0	0,0	2,15

Fig. 5 - Correlazione permeabilità - coefficiente di deflusso per i bacini della serie A



ne arborea, corpi d'acqua senza maggiore specificazione.

B = Boschi, soprassuoli boschivi, rimboschimenti, boschetti, formazioni vegetali lineari, castagneto da frutto, aree boschive senza maggiore specificazione.

C = Verde pubblico, colture erbacee, coltivazioni orto-floro vivaistiche e frutteti in generale, aree boschive transitoriamente prive di vegetazione arborea, aree agricole senza maggiore specificazione.

D = Pascoli cespugliosi ed arborei, cespuglieti, macchia, aree residenziali.

E = Pascoli nudi, pertinenze agricole, allevamenti zootecnici ed impianti agro-industriali, praterie, pascoli ed incolti senza maggiore specificazione.

F = Spiagge, scogliere, affioramenti rocciosi e

pietrosi, cave e discariche minerarie, trasporti e servizi pubblici, aree industriali, aree commerciali, aree nude.

La mancanza di dati di letteratura attendibili sull'evapotraspirazione dei vari tipi di suolo impedisce l'attribuzione di un valore numerico a ciascuna classe. Se però consideriamo la distribuzione percentuale dei diversi tipi di suolo (Tabella 9), vediamo che le classi C (aree coltivate), B (aree boschive) e D (aree con macchie, cespugli e prati con alberi) coprono oltre il 90% dell'area dei bacini. Si è quindi ritenuto che il rapporto B/(C+D), che esprime il rapporto fra le aree coltivate e quelle a verde spontaneo, fosse abbastanza indicativo della capacità evapotraspirativa.

In effetti il diagramma fra il coefficiente di deflusso e questo indice fornisce una buona correlazione di tipo lineare (Fig. 6).

Verificata, con queste correlazioni, la dipendenza del deflusso e del coefficiente di

Tabella 9 - Uso del suolo dei bacini idrografici dell'Arno (serie A).

	Uso del suolo %						C/(B+D)
	A	B	C	D	E	F	
A - Can.M.della Chiana a p.Ferr. Fi-Ro	0,7	16,4	68,7	10,4	2,8	1,0	2,57
B - Arno a Subbiano	0,4	61,2	23,2	10,3	4,4	0,5	0,32
C - Arno a Stia	0,0	72,5	9,2	9,7	8,1	0,5	0,11
D - Sieve a Fomacina	0,5	55,3	28,1	10,0	5,2	0,9	0,43
E - Sieve a Ponte del Bilancino	0,4	54,1	23,4	10,4	10,7	1,0	0,36
F - Bisenzio a Gamberame	0,0	73,4	12,5	9,7	3,8	0,6	0,15
G - Elsa a Castelfiorentino	0,2	25,6	56,4	14,8	2,1	0,8	1,40
H - Bisenzio a Praticello	0,0	86,7	5,0	6,1	2,2	0,0	0,05
I - Nievole a Colonna	0,0	60,0	30,4	2,8	5,2	1,6	0,48
L - Arno a S.Giovanni alla Vena	0,7	34,6	47,5	12,4	3,7	1,2	1,01
M - Arno a Nave di Rosano	0,5	39,8	42,7	12,2	3,6	1,1	0,82
N - Greve a Ponte dei Falciani	0,0	32,2	41,5	21,9	3,8	0,5	0,77
O - Pesa a Sambuca	0,3	33,5	29,3	30,7	6,0	0,1	0,46
P - Era a Capannoli	0,7	31,0	53,8	9,7	4,1	0,6	1,32
Q - Vinci a Cireglio	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00

deflusso dai parametri meteorologici e da quelli fisiografici, si è passati alla regressione multipla, ovvero alla ricerca dell'equazione che lega il deflusso agli altri parametri presi tutti insieme.

L'obiettivo della regressione multipla è quello di spiegare y (variabile dipendente) in funzione delle m variabili x_j (per j = 1, 2, ..., m, variabili indipendenti o esplicative), ossia di descrivere la dipendenza di y dalle m variabili x_j mediante una funzione lineare delle m variabili x_j.

In generale il modello è dato da:

$$y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_mx_{im} \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

y_i è il valore assunto dalla variabile dipendente per la i-esima unità (osservazione), x_{ij}

(per j = 1, 2, ..., m) è il valore assunto dalla j-esima variabile indipendente per la i-esima unità di osservazione; b_j (per j = 0, 1, 2, ..., m) sono i coefficienti di regressione da stimare. Ognuno di essi è associato ad una variabile indipendente.

In generale i dati ottenuti da un modello di regressione multipla non permettono di ottenere esattamente i valori della variabile dipendente originari (i valori della y), ma si discostano da questi a causa di una serie di elementi quali errori di misurazione nelle variabili, variabili esplicative non incluse nella equazione di regressione, presenza di fattori di non linearità ecc.

Il modello precedente deve quindi essere riformulato introducendo un termine e_i costituito dalla somma di tutti questi elementi di disturbo:

$$y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_mx_{im} + e_i \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

Per quante variabili indipendenti possano essere incluse nel modello, esisteranno sempre degli aspetti che non quantificati e quindi inclusi nelle variabili esplicative del modello. Gli n valori di e_i sono costituiti dalla somma di tutte le variabili esplicative non incluse nella equazione di regressione, più una serie di altri elementi di disturbo. La combinazione di tutti questi elementi impedisce che i dati ottenuti dal modello di regressione corrispondano esattamente ai dati reali (le misure). È proprio grazie a questo che i coefficienti di regressione rappresentano delle stime e non dei valori noti con certezza.

L'analisi di regressione multipla procede quindi alla determinazione delle migliori stime dei coefficienti b.

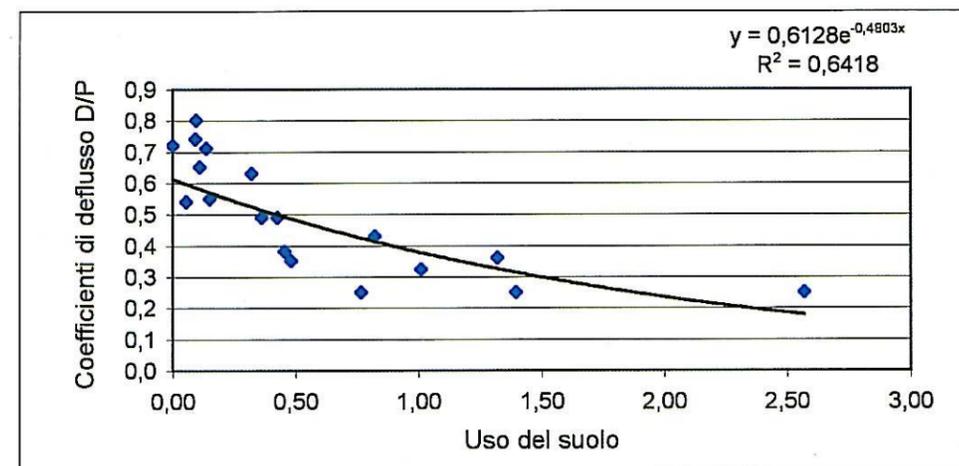
Per il deflusso medio annuo, il modello di regressione cercato prevede la seguente struttura:

Deflusso annuo = f (pendenza, permeabilità, pioggia, uso del suolo, temperatura)

Bisogna però tenere conto del fatto che i deflussi medi annui ottenuti con le misure alle sezioni idrometriche (quelli delle Tabelle 3 e 4) sono alterati, anche se in piccola misura, dai prelievi e dagli scarichi. Per una migliore correlazione con i dati climatici e con i parametri fisiografici, si è preferito utilizzare, per l'equazione di regressione multipla, i **deflussi annui naturali**. Questi sono stati ottenuti (Tabella 10) sommando, ai deflussi misurati, i prelievi e sottraendo gli scarichi, sulla base dei dati e dei criteri adottati per il calcolo dei deflussi medi mensili naturali (si veda il par. 3.2.1).

Si può osservare che in alcune sezioni

Fig. 6 - Correlazione uso del suolo - coefficiente di deflusso per i bacini della serie A



fluviali i deflussi naturali sono inferiori a quelli misurati, in altre è il contrario: il primo caso (il più rappresentato) è quello in cui i prelievi superano gli scarichi, il secondo è quello in cui avviene l'opposto.

Ad esempio gli scarichi superano i prelievi per l'Arno a S. Giovanni alla Vena, evidente-

mente a causa dei prelievi ad uso potabile e industriale delle acque sotterranee del bacino.

Per l'Arno a Stia e per il Vincio a Cireglio il deflusso naturale è uguale a quello misurato, in quanto a monte non ci sono né prelievi né scarichi.

Tabella 10 - Deflussi medi annui misurati e naturali alle sezioni idrografiche (serie A).

Sottobacino		Area Km ²	Periodo considerato 1960-1991	
			Deflussi mis. (mm/anno)	Deflussi mis. (mm/anno)
A	Can. M. della Chiana al ponte F.S.	1285,18	191,64	193,75
A	Can. M. della Chiana al ponte F.S. (1960-68)	1285,18	239,79	241,90
B	Arno a Subbiano	704,62	769,27	850,40
C	Arno a Stia	60,20	787,93	787,93
D	Sieve a Fornacina	809,13	551,75	560,28
E	Sieve a Ponte del Bilancino	150,42	617,18	640,53
F	Bisenzio a Gamberame	150,83	780,86	942,50
G	Elsa a Castelfiorentino	798,31	205,98	201,66
H	Bisenzio a Praticello	59,62	863,31	860,00
I	Nievole a Colonna	39,34	467,80	514,72
L	Arno a S. Giovanni alla Vena	8202,94	313,77	302,04
L	Arno a S. Giovanni alla Vena (1960-84)	8202,94	322,75	311,02
L	Arno a S. Giovanni alla Vena (1986-91)	8202,94	277,28	265,55
M	Arno a Nave di Rosano	4124,98	418,15	421,08
N	Greve a Ponte dei Falciani	116,06	215,48	228,78
O	Pesa a Sambuca	113,28	336,63	350,40
P	Era a Capannoli	335,31	320,77	325,37
Q	Vincio a Cireglio	1,44	1250,48	1250,48

In base all'analisi di regressione multipla, l'equazione che lega il deflusso naturale medio annuo ai fattori climatici e fisiografici è risultata la seguente:

$$\text{Deflusso} = 548.07 \text{ (costante)} + 0.894 \text{ (pioggia)} + 78.03 \text{ (uso del suolo)} - 2.76 \text{ (pendenza)} - 14.39 \text{ (permeabilità)} - 79.64 \text{ (temperatura)}$$

[equazione 1]

Una misura che comunemente si usa per valutare la bontà di una regressione è il valore di R², che in questo caso risulta essere uguale a 0.97, quindi un valore elevato.

Per un'ulteriore verifica della bontà del modello individuato per descrivere i dati disponibili, si può analizzare la distribuzione dei

residui. Questi sono calcolati come differenza tra i valori determinati realmente (in questo caso i deflussi naturali calcolati applicando alle misure i dati di prelievo e di scarico) e quelli stimati applicando il modello ottenuto.

I valori ottenuti sono di seguito riportati.

Da un'analisi dei residui non risultano campioni che mostrano un comportamento tipo "outliers". Si fa notare che manca il dato della Nievole a Colonna: il suo deflusso non è stato inserito nella regressione multipla perché a monte della stazione c'è un campo pozzi che richiama acqua dal subalveo della Nievole, diminuendo la portata naturale.

Effettuare una regressione significa, da un punto di vista statistico, cercare di spiegare la varianza (variabilità) della variabile dipen-

Stazione	Deflusso	Stima	Residui
Arno a Stia	787.93	781.4069	6.5231
Arno a Subbiano	850.40	726.6348	123.7652
Can M. Chiana	193.75	205.2289	-11.4789
Sieve a Ponte di Bilancino	640.53	708.1859	-67.6559
Sieve a Fornacina	560.28	592.4436	-32.1636
Arno a Nave Rosano	421.08	395.2370	25.8430
Greve Ponte Falciani	228.78	302.0593	-73.2793
Bisenzio Praticello	860	1042.1691	-182.1691
Bisenzio a Gamberame	942.50	822.3224	120.1776
Pesa a Sambuca	350.40	329.8116	20.5884
Vincio a Cireglio	1250.48	1208.2767	42.2033
Elsa a Castelfiorentino	201.66	229.6379	-27.9779
Era a Capannoli	325.37	225.4430	99.9270
Arno a San Giovanni alla Vena	302.04	352.3844	-50.3444

dente y per mezzo delle varianze delle variabili esplicative x_1, \dots, x_m , prese congiuntamente. Non è tuttavia possibile sapere, dai coefficienti di regressione "netti" come quelli trovati, qual'è il contributo di ciascuna variabile indipendente alla spiegazione della varianza della variabile dipendente, poiché i coefficienti b_j ($j = 1, 2, \dots, m$) dipendono dall'unità di misura in cui sono espresse la variabile dipendente e la variabile indipendente x_j a cui b_j è associato. Pertanto dal confronto tra i diversi valori di b_j non è possibile stabilire quale tra le variabili x_j è più importante ai fini della spiegazione della varianza di y .

Per cercare di capire qualcosa di più sulle relazioni tra i coefficienti, spesso si usano i "coefficienti beta" che indicano la correlazione tra la variabile dipendente e ciascuna variabile indipendente, al netto della parte di correlazione esistente tra la variabile dipendente e le rimanenti $m - 1$ variabili indipendenti.

Ciascun coefficiente beta fornisce pertanto una misura del contributo "netto" della variabile x_j alla spiegazione della varianza di y . In questo caso i valori di beta sono i seguenti:

- Pendenza	-0.0126
- Permeabilità	0.000876
- Pieggi	1.496
- Uso del suolo	0.513
- Temperatura	-0.612

Da questi dati si può rilevare il contributo prevalente (ovviamente positivo) della pioggia rispetto alle altre variabili inserite nel modello.

Il contributo negativo della temperatura (che incide per poco più di un terzo rispetto alla pioggia) trova spiegazione nel fatto che a maggiore temperatura media annua corrisponde una maggiore evapotraspirazione e quindi un minore deflusso.

Fra le caratteristiche fisiografiche appare nettamente prevalente l'uso del suolo (con l'indice calcolato) sulla pendenza e la permeabilità. Per quest'ultima il valore negativo di beta conferma che il deflusso diminuisce all'aumentare della permeabilità delle rocce del bacino.

Il modello presentato, così come i modelli relativi al deflusso di base e al coefficiente di esaurimento a (vedi i capitoli relativi), da un punto di vista strettamente statistico dovrebbe essere utilizzato solo come *modello descrittivo* della situazione analizzata. A causa del piccolo numero di campioni inserito nel modello (17 casi) rispetto al numero delle variabili, infatti, alcuni dei requisiti necessari per usare i modelli a scopo di inferenza non sono stati incontrati.

Ciò vuol dire che i coefficienti di regressione (b) individuati potrebbero essere degli stimatori distorti per dati non inclusi nel modello, cioè per bacini diversi da quelli considerati.

Nelle Tabelle 11 e 12 ci sono rispettivamente la permeabilità e l'uso del suolo dei bacini idrografici (serie B), che sono stati inseriti nell'equazione 1 per ottenere i deflussi medi annui naturali dei 20 bacini.

Nelle Tabelle 13 e 14 sono riportati i dati numerici del bilancio idrologico medio annuo dei 20 bacini idrografici dell'Arno privi di misu-

re del deflusso (bacini della Serie B). I deflussi sono riferiti alla chiusura dei bacini. Oltre ai deflussi naturali ci sono quelli "reali", ottenuti togliendo i prelievi ed aggiungendo gli scarichi.

I deflussi del Valdarno Superiore sono quelli originati dalle sole piogge nel bacino idrografi-

co; per avere i deflussi effettivi occorre sommare quelli provenienti dai bacini 7 (Casentino) e 8 (Valdichiana).

Per i bacini costieri del Fiume Morto e della Pianura di Pisa, i deflussi calcolati non si riferiscono al corso d'acqua principale, ma al deflus-

Tabella 11 - Permeabilità dei bacini idrografici dell'Arno (serie B).

	Formazioni permeabili per porosità (%)					Formazioni permeabili per fratture e carsismo (%)					Coeff. di perm.
	a	b	c	d	e	I	II	III	IV	V	
1 - Bientina	2,97	10,62	3,8	65,4	0,0	2,6	0,3	14,4	0,0	0,0	4,9
2 - Padule di Fucecchio Usciana)	6,10	4,94	8,6	37,0	0,1	5,0	0,2	38,0	0,2	0,0	4,3
3 - Ombrone	0,54	0,00	1,3	44,9	0,0	12,8	21,1	19,3	0,1	0,0	4,1
4 - Bisenzio	0,00	0,00	0,0	22,9	0,0	5,7	39,6	31,8	0,0	0,0	3,5
5 - Sieve	2,41	0,00	13,6	5,6	0,0	12,9	53,7	11,8	0,0	0,0	2,6
6 - Mugnone	0,00	0,00	0,0	35,4	0,0	37,5	15,3	11,7	0,0	0,0	3,3
7 - Casentino (Arno)	2,44	0,00	2,9	4,7	0,2	9,6	73,6	6,5	0,0	0,0	2,3
8 - Chiana	2,61	18,09	20,8	31,0	0,0	1,4	16,3	9,3	0,2	0,0	3,8
9 - Valdarno Superiore	7,91	1,60	19,6	11,6	0,1	4,6	28,7	25,7	0,0	0,0	3,3
10 - Greve	0,00	0,00	2,4	47,8	0,0	7,1	13,3	29,3	0,0	0,0	4,5
11 - Pesa	5,68	0,00	12,6	38,7	0,0	8,2	14,7	20,1	0,0	0,0	4,1
12 - Orme	52,31	0,00	13,9	33,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1
13 - Elsa	12,74	0,01	36,3	16,6	6,2	3,4	7,9	6,2	0,9	9,7	4,2
14 - Egola	14,60	0,00	40,3	36,2	0,0	0,0	7,7	1,0	0,1	0,0	4,1
15 - Era	34,24	1,07	22,0	31,2	0,6	1,3	6,6	2,3	0,4	0,4	3,4
16 - Tora	40,06	0,56	19,9	25,4	1,0	4,2	8,0	0,9	0,0	0,0	3,0
17 - Fiume Morto	0,00	1,96	1,0	71,2	13,7	0,0	2,7	5,1	0,9	3,4	6,0
18 - Pianura di Pisa	1,02	24,90	7,1	22,7	32,0	3,6	2,1	4,4	2,2	0,0	5,1

Tabella 12 - Uso del suolo dei bacini idrografici dell'Arno (serie B).

	Uso del suolo %						C/(B+D)
	A	B	C	D	E	F	
1 - Bientina	1,35	28,16	57,99	9,11	1,72	1,67	1,56
2 - Padule di Fucecchio (Canale Usciana)	2,59	32,90	50,46	9,11	3,74	1,21	1,20
3 - Ombrone	0,66	35,37	46,00	10,53	4,32	3,12	1,00
4 - Bisenzio	0,53	53,51	23,03	14,57	4,95	3,40	0,34
5 - Sieve	0,54	55,27	28,14	10,01	5,12	0,93	0,43
6 - Mugnone	0,24	25,43	43,03	20,54	7,09	3,67	0,94
7 - Casentino (Arno)	0,37	58,49	25,48	11,03	4,09	0,55	0,37
8 - Chiana	0,65	16,64	67,77	10,94	2,74	1,25	2,46
9 - Valdarno Superiore	0,51	38,57	39,79	16,51	3,19	1,43	0,72
10 - Greve	0,17	27,60	50,39	16,76	4,20	0,88	1,14
11 - Pesa	0,48	23,35	54,78	16,70	4,07	0,62	1,37
12 - Orme	0,29	11,43	70,57	10,29	5,71	1,71	3,25
13 - Elsa	0,26	25,10	57,44	14,18	2,21	0,81	1,46
14 - Egola	0,00	30,18	55,63	10,43	3,62	0,14	1,37
15 - Era	0,49	26,21	59,74	9,66	3,40	0,49	1,67
16 - Tora	0,00	26,22	62,67	7,29	3,47	0,35	1,87
17 - Fiume Morto	1,23	21,80	59,67	12,26	3,81	1,23	1,75
18 - Pianura di Pisa	1,43	21,12	61,25	12,07	3,15	0,98	1,85

so complessivo della rete di canali, nell'ipotesi che tali canali portino al mare solo le acque del deflusso prodotto dalle precipitazioni. In realtà qui la situazione è più complessa, perché i cana-

li trasportano anche l'acqua drenata o pompata dal sottosuolo, senza contare il contributo dell'acqua del mare che entra nei canali, soprattutto in occasione delle mareggiate.

Tabella 13 - Bilanci idrogeologici medi annui in mm (periodo 1960-1991) dei bacini idrografici.

	Area in Km ²	Afflussi (mm/anno)	Deflussi nat. (mm/anno)	Deflussi eff. (mm/anno)	Evapotrasp. (mm/anno)	D/P
1 Padule di Bientina (Canale Navarecchio)	308,58	1130,77	555,10	564,91	575,67	0,49
2 Padule di Fucecchio (Canale Usciana)	489,70	1175,17	637,31	589,67	537,86	0,54
3 Ombrone	484,31	1228,81	698,31	632,93	530,50	0,57
4 Bisenzio	308,04	1206,84	676,97	776,63	529,87	0,56
5 Sieve	837,93	1132,78	558,92	573,29	573,86	0,49
6 Mugnone	71,74	940,74	391,96	393,59	548,78	0,42
7 Casentino (Arno)	877,41	1170,61	738,12	756,97	432,49	0,63
8 Chiana	1370,55	786,29	196,03	189,03	590,26	0,25
9 Valdarno Superiore	1018,55	925,72	273,69	284,19	652,03	0,30
10 Greve	290,42	843,50	222,95	209,13	620,55	0,26
11 Pesa	336,23	849,77	324,93	325,98	524,84	0,38
12 Orme	56,37	846,92	207,68	204,44	639,24	0,25
13 Elsa	865,12	834,96	201,21	172,79	633,75	0,24
14 Egola	114,29	862,07	215,30	218,62	646,77	0,25
15 Era	595,48	875,64	317,31	315,81	558,33	0,36
16 Tora	105,64	938,61	369,42	364,14	569,19	0,39
17 Fiume Morto	119,91	1019,23	437,78	406,05	581,45	0,43
18 Pianura di Pisa	430,26	878,24	320,62	353,41	557,62	0,37

Tabella 14 - Bilanci idrogeologici medi annui in milioni di m3 (periodo 1960-1991) dei bacini idrografici.

	Area in Km ²	Afflussi (Mm ³ /anno)	Deflussi nat. (Mm ³ /anno)	Deflussi eff. (Mm ³ /anno)	Evapotrasp. (Mm ³ /anno)	D/P
1 Padule di Bientina (Canale Navarecchio)	308,58	348,94	171,29	174,32	177,64	0,49
2 Padule di Fucecchio (Canale Usciana)	489,70	575,48	312,09	288,76	263,39	0,54
3 Ombrone	484,31	595,13	338,20	306,54	256,93	0,57
4 Bisenzio	308,04	371,75	208,53	239,23	163,22	0,56
5 Sieve	837,93	949,19	468,34	480,38	480,86	0,49
6 Mugnone	71,74	67,49	28,12	28,23	39,37	0,42
7 Casentino (Arno)	877,41	1027,11	647,63	664,18	379,48	0,63
8 Chiana	1370,55	1077,65	268,67	259,08	808,98	0,25
9 Valdarno Superiore	1018,55	942,89	278,76	289,46	664,12	0,30
10 Greve	290,42	244,97	64,75	60,74	180,22	0,26
11 Pesa	336,23	285,71	109,25	109,60	176,47	0,38
12 Orme	56,37	47,74	11,71	11,52	36,03	0,25
13 Elsa	865,12	722,34	174,07	149,49	548,27	0,24
14 Egola	114,29	98,53	24,61	24,99	73,92	0,25
15 Era	595,48	521,42	188,95	188,06	332,47	0,36
16 Tora	105,64	99,15	39,03	38,47	60,13	0,39
17 Fiume Morto	119,91	122,22	52,49	48,69	69,72	0,43
18 Pianura di Pisa	430,26	377,87	137,95	152,06	239,92	0,37

Per alcuni bacini è stata apportata una correzione al valore di D tenendo conto dei coefficienti di deflusso dei bacini della serie A di cui quelli della serie B sono una estensione (ad es. per il Casentino si è tenuto conto del deflusso della stazione dell'Arno a Subbiano).

In conclusione, i deflussi calcolati per i bacini idrografici non dotati di stazione di misura dei deflussi (serie B) sono ovviamente meno precisi di quelli calcolati per i sottobacini della serie A; tuttavia si ritiene che questi valori siano più vicini ai valori reali di quelli che si possono ottenere dalla differenza P-D, calcolando l'evapotraspirazione con le consuete formule.

3.2 BILANCI IDROLOGICI MEDI MENSILI

I bilanci idrologici medi annui, calcolati nel capitolo precedente, forniscono la risorsa idrica disponibile nei singoli bacini, ma senza fornire indicazioni sui tempi delle disponibilità, né sulla natura della risorsa (acqua superficiale o acqua sotterranea); i prelievi e gli scarichi si annullano, dato che per i bacini studiati non ci sono trasferimenti da un bacino all'altro.

Per la distribuzione nell'anno bisogna passare ai bilanci idrologici mensili, mentre per la separazione delle componenti di deflusso occorrono elaborazioni più sofisticate dei dati idrometeorologici.

3.2.1 Bilanci medi mensili dei bacini sottesi da stazioni di misura del deflusso (serie A)

Per i bilanci idrologici medi mensili dei bacini chiusi alle stazioni idrometriche, è stata seguita la stessa metodologia utilizzata per quelli annui, ovviamente utilizzando i dati mensili. Il periodo è ancora quello dei 32 anni 1960-1991.

Per gli anni per i quali non erano disponibili misure di deflusso, gli stessi sono stati calcolati partendo dagli afflussi meteorici e dai coefficienti di deflusso medi mensili relativi al periodo per cui esiste il dato misurato

L'utilizzo dei topoi per il calcolo degli afflussi mensili ha reso meglio confrontabili i valori, oltre a rendere più semplice il calcolo.

In Appendice 1 sono riportate le tabelle con i bilanci idrologici medi mensili, in mm ed in milioni di metri cubi, alle sezioni di misura dei deflussi e i diagrammi illustrativi del regime medio.

Si riporta di seguito, come esempio il bilancio dell'Arno a S. Giovanni alla Vena, con i deflussi misurati (Tabella 15) e con i deflussi "naturali" (Fig. 7), cioè quelli che ci sarebbero senza i prelievi e gli scarichi in alveo.

Per la Valdichiana, oltre al bilancio del periodo 1960-1991, è stato calcolato il bilancio del periodo 1960 - 1968, precedente la costruzione della diga sul torrente Foenna, che altera il regime delle portate mensili.

Per l'Arno a S. Giovanni alla Vena, oltre al bilancio 1960-1991 sono stati redatti i bilanci dal 1960 al 1984 e dal 1986 al 1991, per le mutate condizioni idrografiche del corso d'acqua negli anni 1985/86, che peraltro hanno comportato una diminuzione dei deflussi a S. Giovanni alla Vena.

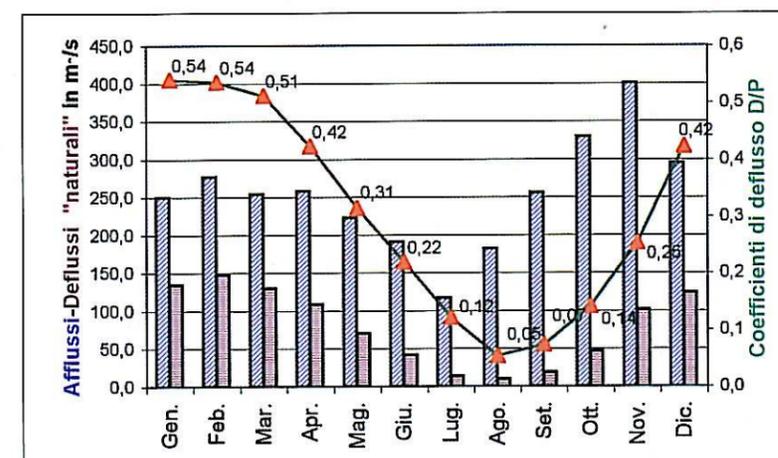
Poiché i deflussi medi mensili derivano dalle portate effettivamente misurate, i bilanci sopra riportati non sono *naturali*, in quanto alterati dai prelievi e dagli scarichi. Solo per i

bacini montani di piccole dimensioni, dove i prelievi e gli scarichi sono nulli o trascurabili, i bilanci mensili possono essere considerati *naturali* e i deflussi *climatici*. Questo è il caso

Tabella 15 - Bilancio idrologico medio mensile (deflussi misurati) dell'Arno a S. Giovanni alla Vena (periodo 1960-1991).

Mesi	P in mm	D in mm	P in Mm ³	D in Mm ³	D/P
Gen.	81,63	45,42	669,59	372,61	0,56
Feb.	81,60	44,87	669,34	368,08	0,55
Mar.	82,83	43,73	679,45	358,69	0,53
Apr.	81,46	35,69	668,24	292,76	0,44
Mag.	72,76	24,05	596,86	197,24	0,33
Giu.	60,43	14,12	495,67	115,79	0,23
Lug.	38,23	4,81	313,57	39,49	0,13
Ago.	59,43	3,15	487,51	25,81	0,05
Set.	80,71	6,35	662,03	52,10	0,08
Ott.	107,74	16,41	883,77	134,64	0,15
Nov.	126,72	33,26	1039,45	272,79	0,26
Dic.	96,15	41,92	788,71	343,84	0,44

Fig. 7 - Bilancio idrologico medio mensile (deflussi "naturali") dell'Arno a S. Giovanni alla Vena (periodo 1960-1991).



dell'alto Casentino, (stazione idrometrica di Stia), e dell'alta valle del Bisenzio (Bisenzio a Praticello).

Un altro elemento che provoca variazioni al regime naturale dei deflussi mensili è la presenza di dighe di ritenuta: l'invaso di acqua nei periodi di pioggia e il loro rilascio durante la stagione asciutta fa aumentare i coefficienti di deflusso dei mesi estivi, a danno di quelli degli altri mesi; comportando un aumento artificiale delle portate minime annuali.

Oltre agli effetti dei prelievi e dei rilasci delle dighe, fra gli elementi di alterazione dei deflussi naturali sono da considerare l'apporto dato dagli scarichi delle acque emunte da falda, particolarmente rilevanti nei bacini caratterizzati da falde idriche importanti e ampiamente sfruttate. Il risultato è un incremento delle portate di magra. Tale contributo fa sì che a San Giovanni alla Vena la portata non scenda mai al di sotto di 5-6 mc/s: alla portata di base, depauperata dalle derivazioni, si aggiungono i rilasci delle dighe e gli scarichi civili e industriali della parte più abitata della Toscana.

Di fatto esiste un metodo teorico per il calcolo dei deflussi medi mensili "naturali" o "climatici": il metodo di Thornthwaite e Mater, che si basa sul bilancio idrico mensile del suolo e fornisce l'evapotraspirazione reale, il surplus idrico e il deficit, nonché il deflusso, espressi in mm d'acqua.

Il metodo di Thornthwaite e Mater è stato ideato e sperimentato per il bilancio idrico del suolo in corrispondenza di una stazione di misura termopluviometrica. I dati di ingresso sono la latitudine e la quota, le temperature e

le precipitazioni medie mensili, la capacità di ritenzione idrica del terreno.

I valori di temperatura, associati ai parametri geografici, forniscono l'evapotraspirazione potenziale E_p , ovvero quella che si avrebbe se il terreno fosse sempre saturo e che quindi dipende solo dalla temperatura. Tale valore viene confrontato, mese per mese, con gli afflussi meteorici: nei mesi in cui $P > E_p$, l'evapotraspirazione reale E_r è uguale a quella potenziale; nei mesi in cui $P < E_p$, l'evapotraspirazione reale è uguale a P più quella parte di acqua che il terreno fornisce, e che è una parte della riserva. Alcune tabelle forniscono la variazione della riserva idrica del suolo in funzione del deficit pluviometrico cumulato.

Nei mesi in cui E_p supera E_r si ha un deficit idrico, nei mesi in cui P supera E_p si ha un surplus, che si traduce in deflusso.

Il bilancio idrico secondo Thornthwaite viene spesso esteso ad un intero bacino, utilizzando i valori medi ponderati dei parametri necessari al calcolo (Fig. 8).

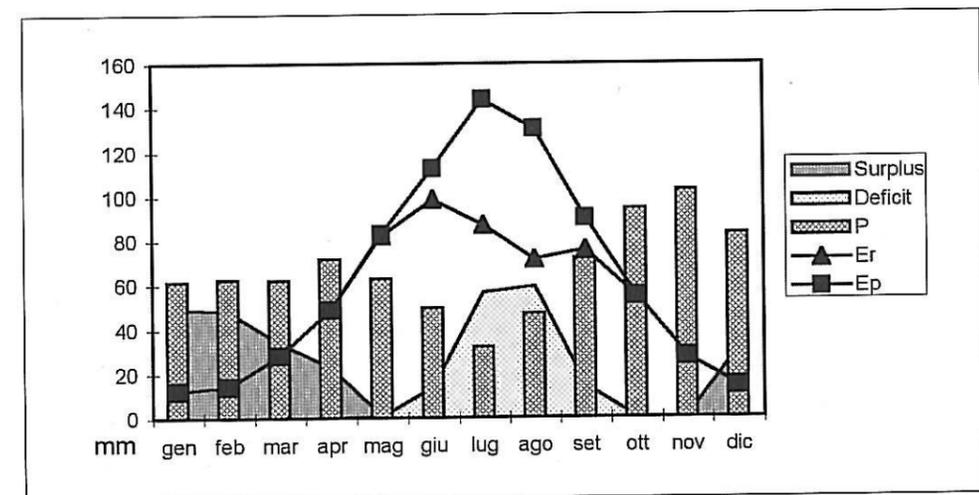
Purtroppo il metodo, se permette di calcolare con buona approssimazione l'evapotraspirazione totale annua, non riesce a separare l'infiltrazione dal ruscellamento superficiale; infatti esso prevede che l'eccedenza idrica ($P - E_p$) dia origine ad un ruscellamento superficiale solo dopo la totale ricostituzione della riserva idrica del terreno. In realtà è evidente, dai deflussi misurati, che le prime piogge autunnali forniscono un deflusso anche con terreno non saturo. La conseguenza è che il metodo non fornisce un valore attendibile del deflusso mensile.

Un esempio è fornito dal bilancio medio

mensile del bacino dell'Elsa a Castelfiorentino (1960 - 1991), dove il deflusso in mm calcolato con il metodo di Thornthwaite e Mater è confrontato con quello effettivamente misurato:

possiamo osservare che, nei mesi autunnali, il deflusso calcolato risulta assai minore di quello misurato.

Fig. 8 - Bilancio idrico del bacino del Fiume Elsa, chiuso a Castelfiorentino, secondo il metodo di Thornthwaite e Mater (periodo 1950-1997) (da Gala e Pranzini, 1999).



Il problema del calcolo dei deflussi naturali mensili è di difficile soluzione in tutti i casi in cui non sono ben noti i prelievi e gli scarichi (e la loro distribuzione temporale), ed ancora di più dove ci sono dighe che intercettano le portate di piena e di morbida e le rilasciano secondo modalità variabili.

Nel bacino dell'Arno le dighe di Levane e la Penna, nel Valdarno Superiore, e quella sul torrente Foenna, in Valdichiana, sono le uniche di dimensioni tali da incidere in maniera

sostanziale sui deflussi. Nel Mugello è ormai a regime la diga di Bilancino, ma i dati di deflusso disponibili consentono di redigere il bilancio naturale del sottobacino. L'invaso, progettato per uso plurimo ma con la funzione primaria di sostegno alle portate di magra del fiume Arno, ha dimostrato nell'estate 2001 la sua efficacia in tal senso. Infatti, con l'azione combinata delle dighe ENEL di Levane e La Penna, i valori di portata in Arno nel periodo luglio, agosto, settembre a monte delle prese dell'Acque-

	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
Deflusso calcolato	33.0	40.6	37.2	30.1	15.1	7.5	3.8	1.9	0.9	0.5	0.2	16.7
Deflusso misurato	23.0	23.8	21.5	18.2	13.9	8.7	6.6	5.5	7.4	16.3	19.3	23.3

dotto dell'Anconella si sono mantenuti sull'ordine degli 8 mc/s, valore considerato ottimale per la sezione.

Il quadro della distribuzione delle dighe, con il relativo anno di costruzione (se noto all'Ufficio Dighe), è riportato Tabella 16.



Foto 6 - Provincia di Arezzo - Vista della diga di Levane

Nome	Comune	Corso d'acqua	Prov.	Altezza diga (m)	Volume invaso (Mmc)	Data di ultimazione
Acquirico	Vaglia		FI	19.00	0.02	
Aiano	San Gimignano		SI	26.10	0.08	
Bilancino	Barberino di Mugello	Sieve	FI	42.00	66.5	1996
Bozzolo	Radda in Chianti	Pesa	SI	15.50	0.03	1960
Calcione	Lucignano	Foenna	AR	26.00	4.10	1969
Calvanella	Pontassieve	Rio Calvanella	FI	22.00		1961
Canalone	Impruneta	Borro Ricavo	FI	16.47	0.28	1961
Casole d'Elsa	Casole d'Elsa	Borro Ricavolo	SI	18.50	0.99	1970
Castelfalfi	Montaione	Borro della Casa	FI	15.94	0.38	1965
Chiocchio	Greve in Chianti	Sezzatana	FI	18.40	0.02	
Drove di Cepparello	Poggibonsi	Drove	SI	26.21	0.52	1962
Giudea a Gello	Pistoia	Rio Fontanacci	PT	31.90	0.85	1970
Il Monte	Barberino di Mugello	Rezzano	FI	21.77	0.16	1962/70
La Penna	Laterina	Arno	AR	36.30	16.00	1957
Levane	Montevarchi	Arno	AR	26.00	4.90	1958
Vigneto	Barberino di Mugello	Navale	FI	23.00	0.18	1974
Pietrafitta	San Gimignano		SI	15.33/18.30	0.18	1960
Sammontana	Montelupo Fiorentino	Fossi Petrognano e Bandite	FI	18.00	0.12	1960
San Cipriano	Cavriglia	Borro S.Cipriano	AR	16.50	3.62	1958

Per quanto riguarda i prelievi dai corsi d'acqua e gli scarichi in questi, nel tentativo di calcolarne gli effetti sui deflussi, sono stati elaborati i dati dei censimenti realizzati dalla Geotecnico (1995) per conto l'Autorità di Bacino.

Nella tab.17 sono riportati i totali dei prelievi e degli scarichi nel bacino dell'Arno, calcolati per i tratti fluviali a monte delle stazioni idrometriche dei bacini interessati dal bilancio.

Nelle elaborazioni condotte si è supposto che il prelievo netto max. corrisponda a quello del periodo di massima irrigazione, considerato pari al 95% del valore concesso.

I dati relativi alle derivazioni idriche contenuti negli archivi dell'autorità riguardano le portate concesse che spesso non coincidono con quelle effettivamente prelevate. Che le due

Tabella 17 - Prelievi e scarichi nei corsi d'acqua dei bacini sottesi da stazioni di misura.

	Q prelevata totale	Q restituita	Q prelevata uso irriguo	Sup. irrigata	Scarichi	Prel. max.
	mc/s	mc/s	mc/s	ha	mc/s	mc/s
A - Can.M.della Chiana al ponte F.S.	1.227	0.04639	1.14	3170	0.169	0.955
B - Arno a Subbiano	10.1347	9.09	0.2715	871.1	0.109	0.922
C - Arno a Stia	2.884	2.884	0	0	0.000	0.000
D - Sieve a Fornacina	1.2939	0	0.9139	818.2	0.333	0.915
E - Sieve a Ponte del Bilancino	0.1806	0	0.0386	52.6	0.038	0.141
F - Bisenzio a Gamberame	0.933	0.01	0	0	0.150	0.773
G - Elsa a Castelfiorentino	0.9926	0.607	0.2864	565	0.262	0.109
H - Bisenzio a Praticello	0	0	0	0	0.006	-0.006
I - Nievole a Colonna	0.8867	0.786	0.04461	84	0.006	0.093
L - Arno a S. Giovanni alla Vena	65.799	55.322	5.312	12326	9.217	0.994
M - Arno a Nave di Rosano	51.615	49.973	2.955	6699	1.963	2.496
N - Greve a Ponte dei Falciani	0.08175	0	0.0036	0.478	0.030	0.052
O - Pesa a Sambuca	0.0937	0.04	0	0	0.004	0.049
P - Era a Capannoli	0.1094	0	0.0744	91	0.000	0.106
Q - Vincio a Cireglio	0	0	0	0	0.000	0.000

portate non possono essere uguali appare evidente dal fatto che in alcuni casi le derivazioni concesse superano le portate di magra dei corsi d'acqua. Inoltre non sono note le modalità della distribuzione dei prelievi nell'arco dell'anno e quindi la loro incidenza sui deflussi dei vari mesi.

In generale si può ritenere che le portate effettivamente prelevate siano *in media* inferiori a quelle assentite per due motivi: uno è che i prelievi di solito non sono continui, l'altro è che le richieste di derivazione sono spesso superiori alle effettive necessità dell'utente; questo in previsione di una futura maggiore necessità ed anche per il fatto che il costo dell'acqua è veramente modesto.

Nel tentativo di avvicinarsi il più possibile ai valori reali, si è tenuto conto della tipologia dei prelievi e degli scarichi, per arrivare ad una distribuzione temporale attendibile.

In particolare si è ritenuto che i prelievi per *usi civili e industriali* siano distribuiti uniformemente nell'anno.

Per i prelievi di acque superficiali ad *uso agricolo* si è fatto riferimento ad uno studio eseguito per la Regione Lazio (Marcello, 1997), relativo a tutti i corsi d'acqua dei bacini regionali. Tale studio, redatto sulla base di interviste e di indagini sul campo, che ha portato alla determinazione di un coefficiente α , moltiplicativo delle portate concesse nei diversi periodi dell'anno:

$\alpha = 0$ dal 1 ottobre al 2 maggio
 $\alpha = 0 - 0.1$ dal 3 al 31 maggio

$\alpha = 0.1 - 0.4$ dal 1 al 30 giugno
 $\alpha = 0.4 - 0.9$ dal 1 al 31 luglio
 $\alpha = 0.9 - 1.0$ dal 1 al 20 agosto
 $\alpha = 1 - 0$ dal 20 agosto al 30 settembre

Data la somiglianza del regime climatico toscano con quello laziale, si è ritenuto di applicare gli stessi coefficienti ai corsi d'acqua del bacino dell'Arno. Una distribuzione temporale più mirata potrebbe essere realizzata a seguito di un'indagine specifica sulle colture e sulle modalità d'irrigazione adottate.

In Appendice 2 sono riportati, sia sotto forma tabellare che in diagrammi, i bilanci idrologici medi mensili "naturali", in mm ed in milioni di metri cubi, relativi agli stessi periodi per i quali sono stati redatti i bilanci con i deflussi misurati.

Per il Canale Maestro della Chiana, oltre al bilancio mensile naturale per il trentennio 1960-1991, è riportato anche quello relativo al periodo 1960-1968, precedente alla costruzione della diga sul torrente Foenna (1969).

Per l'Arno a S. Giovanni alla Vena ci sono, oltre al solito bilancio trentennale, quelli del 1960-1984 e del 1986-1991, per un confronto fra il periodo in cui il canale Usciana confluiva in Arno e il periodo successivo nel quale le portate di piena vengono deviate nel canale Scolmatore.

In ogni caso, i bilanci mensili "naturali" forniscono dei valori approssimati dei deflussi "climatici" veri, a causa dell'incertezza sui prelievi effettivi e sulla loro distribuzione nell'anno.

Il sospetto è che, nonostante le correzioni apportate, i prelievi netti siano in genere sovrastimati, e di conseguenza siano sovrastimati i deflussi "climatici". E questo nonostante che i prelievi risultanti dagli non contengano, né potevano farlo, i prelievi abusivi, che pure si suppone essere consistenti in certi bacini (Valdichiana, Valdarno Superiore, Mugello).

3.2.2 Bilanci idrologici medi mensili dei bacini senza idrometrografi (serie B)

Per i 18 bacini e sottobacini idrografici per i quali non si hanno misure di deflusso, denominati di "Serie B" (cfr. tab. 5), i dati di partenza per i bilanci medi mensili sono stati gli afflussi meteorici medi mensili, calcolati con il metodo dei topoi.

Anche in questo caso sono stati calcolati prima i deflussi medi mensili "naturali", legati alle caratteristiche climatiche e fisiografiche, e quindi i deflussi reali che risultano togliendo i prelievi e aggiungendo gli scarichi.

Un primo tentativo è stato fatto con il metodo delle regressioni multiple, lo stesso utilizzato per i bilanci annui. In questo caso, per ogni bacino dotato di stazione di misura, il deflusso medio mensile "naturale" è stato correlato con gli afflussi meteorici e con la temperatura media del mese, considerate fisse nell'anno caratteristiche fisiografiche.

Ma un'analisi delle relazioni lineari fra la variabile dipendente e le variabili indipendenti ha messo in evidenza valori di R² bassi, soprattutto nei mesi di agosto e settembre.

Per effetto di questa cattiva correlazione lineare, le 12 equazioni $D = f(P, T)$ forniscono

valori di deflusso poco attendibili, addirittura in qualche caso negativi per i due mesi suddetti. Ciò dipende evidentemente dal fatto che, in questi mesi, il deflusso non dipende tanto dalle precipitazioni nel mese stesso quanto dal deflusso di base, ovvero dall'esaurimento delle riserve idriche sotterranee.

Per questi motivi si è preferito abbandonare il metodo della regressione multipla, basando il calcolo sui soli coefficienti di deflusso. A tal fine, per ciascuno dei 18 bacini idrografici della serie B, il deflusso naturale annuo è stato diviso nei 12 valori mensili assegnando i coefficienti di deflusso mensili naturali, espressi in percentuale del deflusso annuo, del bacino della serie A le cui caratteristiche sono le più simili, per posizione geografica, per quota e per clima (soprattutto per le precipitazioni), in ultima analisi anche per le caratteristiche fisiografiche.

Nell'Appendice 3 sono riportati i bilanci medi mensili naturali dei bacini idrografici, in tabelle e diagrammi.

Per ottenere i bilanci medi mensili effettivi, ai deflussi mensili naturali calcolati è stata fatta la somma algebrica di scarichi e prelievi (tab.18), secondo le modalità descritte al par. 3.2.1.

Tabella 18 - Prelievi e scarichi nei corsi d'acqua dei bacini dell'Arno denominati di "serie B"

	Q prelevata totale	Q restituita	Q prelevata uso irriguo	Sup. irrigata	Scarichi	Prel. max. -scar.
	mc/s	mc/s	mc/s	ha	mc/s	mc/s
1 - Bientina	0.366	0.059	0.1222	171.2	0.112	0.189
2 - Padule di Fucecchio (Usciana)	6.0229	5.14	0.4778	587.4	1.235	-0.376
3 - Ombrone	5.0487	3.4973	0.9355	1253	1.796	-0.291
4 - Bisenzio	1.4622	0	0.0271	17.5	0.467	0.994
5 - Sieve	1.4983	0	0.9648	831	0.333	1.117
6 - Mugnone	0.0225	0	0.0125	1.8	0.009	0.013
7 - Casentino (Arno)	17.501	16.545	0.3806	1155.2	0.122	0.815
8 - Chiana	1.2592	0.0464	1.1529	3250.1	0.581	0.574
9 - Valdarno Superiore	31.6722	29.6457	0.6139	1518.7	1.189	0.807
10 - Greve	0.1525	0	0.0531	17.7	0.237	-0.087
11 - Pesa	0.1388	0.04	0.003	73.6	0.085	0.014
12 - Orme	0	0	0	0	0.006	-0.006
13 - Elsa	1.07	0.6095	0.3395	578.4	0.966	-0.521
14 - Egola	0.114	0	0.114	48.7	0.009	0.099
15 - Era	0.1584	0	0.1164	166.2	0.092	0.060
16 - Tora	0.0131	0	0.012	33.7	0.021	-0.009
17 - Fiume Morto	0.0248	0	0.0248	21.4	0.125	-0.102
18 - Pianura di Pisa	0.8601	0	0.0201	5.1	0.396	0.463

Si sono così ottenuti i deflussi mensili reali e quindi i bilanci medi mensili effettivi, riportati in Appendice 4 in tabelle e diagrammi.

Si osserva che i numeri dell'ultima colonna sono in alcuni casi negativi: in quei bacini

gli scarichi superano i prelievi massimi calcolati, quindi ci sarebbero deflussi effettivi superiori a quelli naturali.

3.3 COMPONENTI DEL DEFLUSSO

La portata Q di un corso d'acqua perenne, misurata in una stazione idrometrica, è data dalla somma del *ruscellamento* Ru (acque superficiali), del *deflusso ipodermico* Di (acque sotterranee con brevi tempi di residenza) e del *deflusso di base* Db (acque sotterranee con tempi di residenza lunghi):

$$Q = Ru + Di + Db$$

La scomposizione del deflusso nelle sue componenti consente di valutare l'entità delle risorse idriche sotterranee di un bacino: in particolare il deflusso di base corrisponde allo scarico delle riserve idriche sotterranee stagionali e, se separato dalle altre componenti, fornisce una valida indicazione dell'entità delle risorse sotterranee teoricamente sfruttabili.

Inoltre, il calcolo della portata di base nei periodi di siccità consente di individuare valori utilizzabili per la definizione deflussi minimi naturali.

In un idrogramma giornaliero sono facilmente individuabili repentini picchi di portata, che si esauriscono in poche ore o in pochi giorni, legati ad episodi di piogge intense. Se il picco è preceduto e seguito da un numero di giorni senza piogge abbastanza lungo (che dipende dalle dimensioni del bacino), nell'idrogramma è possibile separare le tre componenti del deflusso.

Il lento decremento della portata che si ha nei periodi senza piogge (*curva di esaurimento*) indica la graduale diminuzione del flusso di base.

Se le piogge si susseguono abbastanza ravvicinate, come avviene di solito nei nostri climi durante le stagioni piovose, la separazione delle tre componenti diventa difficile, in quanto il ruscellamento superficiale e il deflusso ipodermico di un episodio di pioggia si aggiungono a quelli, non ancora esauriti, dell'episodio precedente.

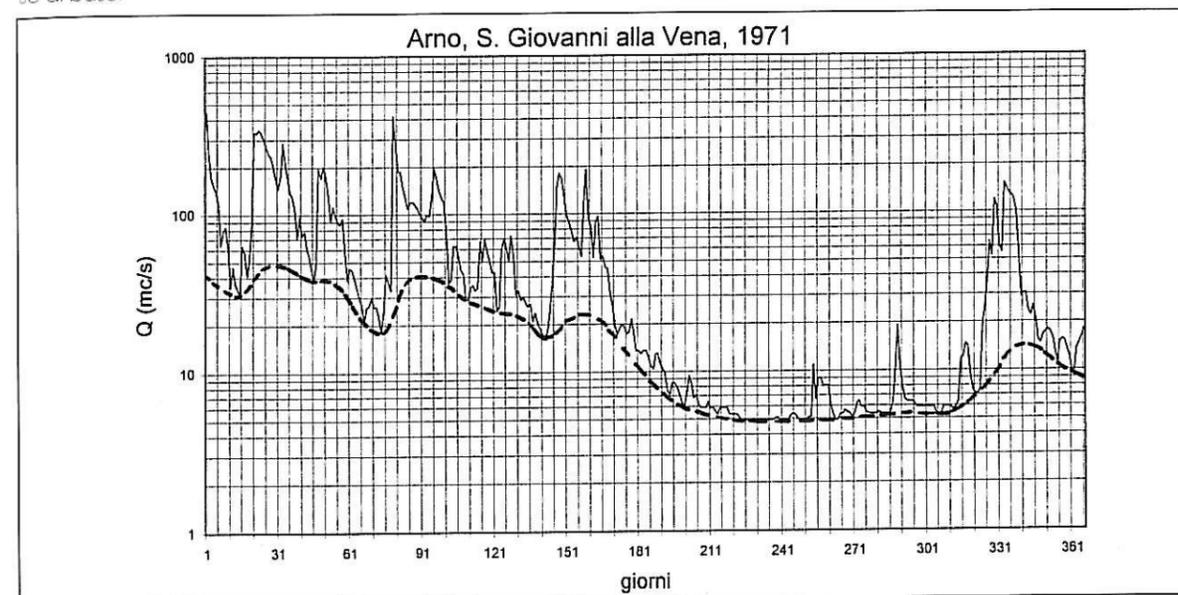
3.3.1 Metodologia adottata per il calcolo delle componenti del deflusso

Per la separazione delle tre componenti nell'idrogramma annuale sono stati elaborati vari metodi, utilizzando i soli dati di portata.

Un metodo approssimativo è quello di tracciare la curva che unisce i minimi dell'idrogramma, nei tratti in lo stesso mostra una bassa pendenza, tale da far ritenere esaurito almeno il ruscellamento superficiale.

La fig. 9 mostra l'idrogramma dell'Arno a S. Giovanni alla Vena per l'anno 1970, con la linea di unione dei minimi.

Fig. 9 - Portate medie giornaliere dell'Arno a S. Giovanni alla Vena (1971). La linea tratteggiata corrisponderebbe al deflusso di base.



Il calcolo delle portate corrispondenti alle curve dei minimi, Q_b , relativo agli anni indicati,

ha fornito i seguenti risultati:

Anno	Portata media totale Q_t	Portata media Q_b	Q_b/Q_t
1969	84,33 mc/s	40,59 mc/s	0,481
1970	85,90 mc/s	42,77 mc/s	0,498
1971	63,10 mc/s	32,74 mc/s	0,519
1972	52,29 mc/s	25,33 mc/s	0,484
media	71,41 mc/s	35,36 mc/s	0,495

I dati sarebbero più significativi se il calcolo fosse fatto per un maggior numero di anni. Tuttavia possiamo osservare che, nonostante nei quattro anni ci siano state delle portate medie totali anche decisamente diverse, il rapporto Q_b/Q_t presenta una varianza assai ridotta ed ha il valore medio di 0,495.

Si tratta quindi di un valore caratteristico del bacino. Tuttavia è improbabile che la portata Q_b calcolata in questo modo corrisponda al solo deflusso di base: questo perché le dimensioni del bacino sono tali da fare sì che il ruscellamento di base delle zone più lontane, ma forse anche una parte del ruscellamento

superficiale, raggiungano S. Giovanni alla Vena in tempi così lunghi da mescolarsi con il deflusso di base delle zone più vicine alla stazione di misura.

Inoltre, la stabilizzazione delle portate nel periodo estivo è palesemente in relazione con gli scarichi effettuati a monte di S. Giovanni alla Vena; scarichi che provengono, almeno in parte, da acque di pozzo e che si sommano al deflusso di base naturale del bacino.

Per queste considerazioni e per la bassa permeabilità di gran parte delle rocce del bacino dell'Arno, si può ritenere che la portata di base sia nettamente inferiore al 50% di quella totale, cioè al valore che deriverebbe dalla curva dei minimi sopra descritta.

Per ottenere una separazione più valida delle componenti del deflusso, è stato utilizzato il *metodo delle portate mensili caratteristiche* (Boni e al., 1993), applicato per la prima volta ai bacini del Lazio. Secondo gli autori questo metodo fornisce una valutazione del ruscellamento e del deflusso di base attendibile, come risulta dal confronto con altri elemen-

ti ed in particolare con la portata complessiva delle sorgenti.

Il metodo consiste nel selezionare e mettere a confronto, in ogni mese, due valori medi e due valori estremi di portata, desunti dai dati giornalieri rilevati in una stazione di misura che abbia operato per diversi anni, anche in modo non continuo. I dati di precipitazione non sono necessari.

I dati da rilevare e da rappresentare in un diagramma (Fig. 10), sono:

- la media delle portate mensili del periodo considerato (linea A)
- la media delle portate giornaliere minime di ciascun mese (linea B)
- la minima delle portate mensili del periodo (linea C)
- la minima delle portate giornaliere osservate nel periodo per ciascun mese (linea D).

La linea superiore A del diagramma (media delle portate mensili) corrisponde alla somma di tutte e tre le componenti del deflusso.

La linea B è espressione significativa del

flusso di base nei periodi di scarse precipitazioni, quando il ruscellamento superficiale è ridotto a valori trascurabili. La portata giornaliera minima può essere invece sensibilmente influenzata dal ruscellamento nelle stagioni piovose, quando l'intervallo tra due piogge significative è generalmente inferiore al tempo di corrvazione. La portata giornaliera minima di alcuni corsi d'acqua può anche aumentare sensibilmente nei mesi primaverili a causa dello scioglimento delle nevi.

Il campo compreso fra le linee A e B può essere comunque attribuito al ruscellamento superficiale nei periodi aridi e ne fornisce una valutazione per difetto nei periodi piovosi.

La linea C (minima delle portate mensili) può essere considerata rappresentativa del flusso di base perché presumibilmente rilevato in un periodo durante il quale il corso d'acqua non è stato alimentato da ruscellamento. Si assume infatti che, su un periodo di osservazione sufficientemente lungo (almeno 14 anni secondo Boni e al., 1993), si sia sempre verifi-

cato almeno un caso di aridità superiore a 30-45 giorni che precede la fine di ogni mese. Questa linea delimita quindi il campo di portata che il metodo considera come valore attendibile del flusso di base.

Tra la linea B e la linea C si individua un "campo indeterminato", che il metodo di scomposizione non attribuisce né al ruscellamento né al deflusso di base. Esso comprende il deflusso ipodermico, più un'aliquota imprecisata di ruscellamento nei mesi più piovosi e un'aliquota del deflusso di base nei mesi più aridi.

La curva D (minime delle portate giornaliere) può essere considerata corrispondente al flusso di base nelle condizioni di aridità estrema del periodo; sempre che tali portate non siano alterate da regimazioni artificiali (dighe) o da prelievi.

La figura 11 mostra la separazione delle componenti del deflusso, mese per mese, in percentuale rispetto a deflusso totale.

La validità del metodo è stata verificata

Figura 10 - Applicazione del metodo delle "portate mensili caratteristiche" per la scomposizione dell'idrogramma medio: Elsa a Castelfiorentino (Periodo: 1950-61; 1963-71; 1973-77; 1981; 1983)

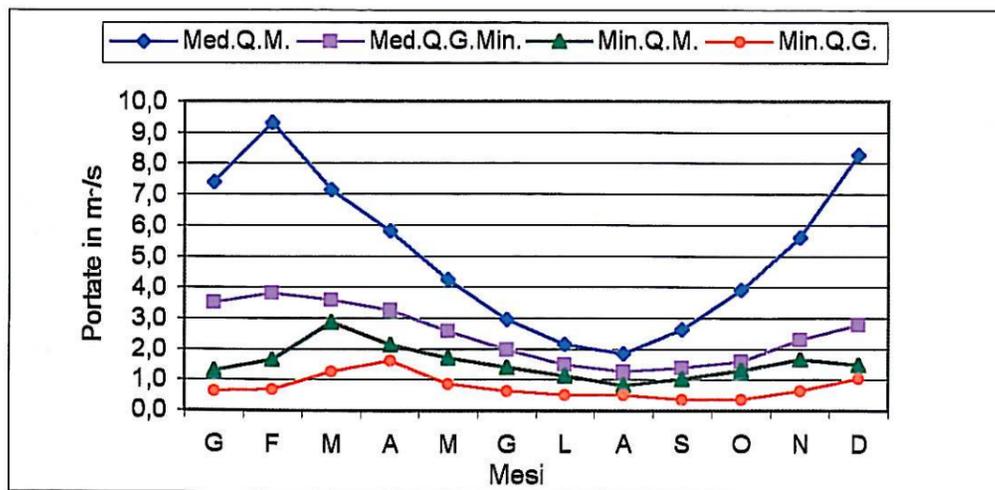
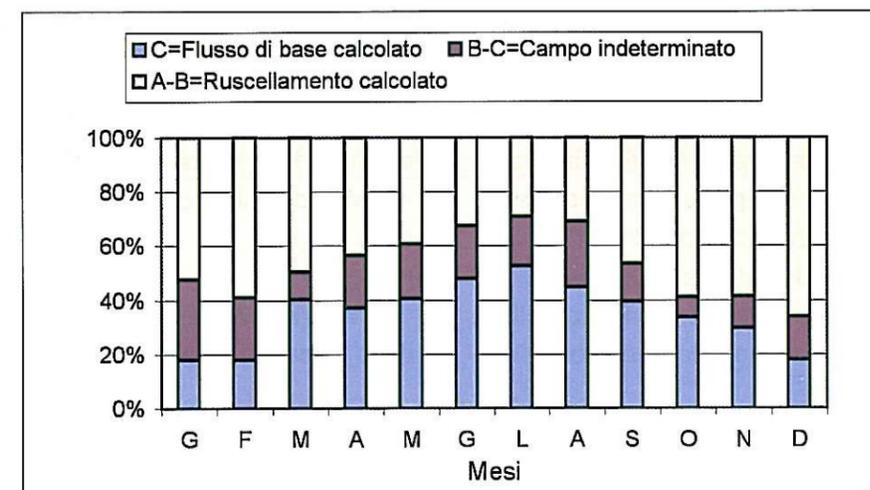


Fig. 11 - Scomposizione percentuale delle componenti del deflusso: Elsa a Castelfiorentino



per il bacino dell'Elsa. In particolare il deflusso di base medio annuo è stato confrontato con i valori ottenuti con altri due metodi (Gala e Pranzini, 1999):

1. l'applicazione dei coefficienti di infiltrazione efficace;
2. la portata complessiva delle sorgenti, in base alle misure eseguite nell'anno 1997.

Il primo metodo consiste nell'applicare alle varie formazioni geologiche affioranti nel bacino un coefficiente di infiltrazione efficace (Cie), corrispondente al rapporto fra l'infiltrazione e la disponibilità di acqua P - Er. Vari autori (Boni e Bono, 1982; Celico, 1988; Pranzini, 1992) hanno calcolato questi coefficienti per formazioni geologiche diverse, di solito sulla base della portata complessiva delle sorgenti oppure sul deflusso di base dei corsi d'acqua che scorrono su un bacino litologicamente omogeneo.

Applicando questi coefficienti alle formazioni geologiche presenti nel bacino dell'Elsa e tenendo conto della loro distribuzione percentuale, si è ottenuta una media ponderata pari al 45% di P-Er. Questo dato, applicato al valore medio di P - Er del periodo (187,5 mm), corrisponde ad una portata media annua del flusso di base pari a 2,15 mc/s.

Il secondo metodo parte dalla considerazione che la portata complessiva annua delle sorgenti di un bacino corrisponde all'acqua d'infiltrazione e quindi al deflusso di base.

Mediante due campagne di misura della portata delle sorgenti, una nel maggio 1997

(situazione di portata alta) e una in settembre 1997 (portata bassa) è stata calcolata la portata media complessiva annua, supposta uguale alla media aritmetica dei due valori.

In maggio la portata complessiva risultò di 0,93 mc/s, in settembre di 0,81 mc/s. Si deve osservare che la maggior parte di questa portata deriva dalle Vene degli Onci (0,747 mc/s e 0,691 mc/ nelle due misure) che dà origine all'Elsa a monte di Colle Val d'Elsa.

Come portata media complessiva delle sorgenti è stata assunta la media aritmetica, pari a 0,86 mc/s.

Se vogliamo confrontare la portata complessiva delle sorgenti con il deflusso di base ottenuto con gli altri due metodi, dobbiamo considerare la differenza di afflussi meteorici fra il 1997 (681,7 mm) e il periodo considerato per i bilanci (800,3 mm).

Se, in maniera certamente approssimativa, consideriamo la portata delle sorgenti direttamente proporzionale alle precipitazioni, il dato 0,86 mc/s del 1997 sale a 1,01 mc/s per il periodo.

In sintesi i valori calcolati del deflusso di base sono:

- la Metodo delle portate mensili caratteristiche: 1,58 mc/s
- la Metodo dei coefficienti di infiltrazione efficace: 1,81 "
- la Metodo della portata delle sorgenti: 1,01 "

Il terzo valore è quello più basso, ma si deve osservare che la portata complessiva

delle sorgenti, anche se ottenuta tramite una ricerca capillare delle sorgenti e la misura accurata della loro portata, non fornisce mai il totale dell'acqua che riemerge dal sottosuolo. Questo perché buona parte riemerge in forma diffusa, quindi non misurabile, o occulta, alimentando i corsi d'acqua nel loro subalveo.

Possiamo concludere che il metodo delle portate mensili caratteristiche, adottato per il bilancio idrogeologico dei bacini studiati, fornisce un valore della portata di base confrontabile con quello che si ottiene con altri metodi, i quali, per altro, sono a loro volta approssimativi.

3.3.2 Componenti del deflusso alle stazioni idrometriche (bacini della serie A)

La Tabella 19 contiene l'elenco delle stazioni idrometriche e degli anni i cui valori di portata sono stati utilizzati per applicare il metodo delle portate caratteristiche.

Tabella 19 - Elenco delle stazioni idrometriche e degli anni i cui valori di portata sono stati utilizzati per applicare il metodo delle portate caratteristiche.

Stazioni Idrometriche	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	Anni	
Arno a Stia	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24	
Arno a Subbiano												x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	37
Can.M.della Chiana				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	20	
Sieve a Ponte del Bilancino																																							18	
Sieve a Fornacina												x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	32	
Arno a Nave di Rosano	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	33	
Greve a Ponte dei Falciani																																							17	
Bisenzio a Praticello												x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	17	
Bisenzio a Gamberame											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24	
Pesa a Sambuca																																							17	
Vincio a Creglio																																							7	
Elsa a Castelfiorentino	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	28		
Nievole a Colonna				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	27		
Era a Capannoli																																							19	
Arno a S.Giov. alla Vena												x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	32		

Nell'Appendice 5 è riportata la scomposizione delle componenti del deflusso mensile alle sezioni idrografiche (bacini della serie A), in tabelle e diagrammi.

La tabella 20 e la figura 12 contengono invece la scomposizione del deflusso totale annuo.

Tabella 20 - Scomposizione delle componenti del deflusso medio annuo alle sezioni idrografiche (serie A) A-B = Ruscellamento. C = Flusso di base. B-C = campo indeterminato.

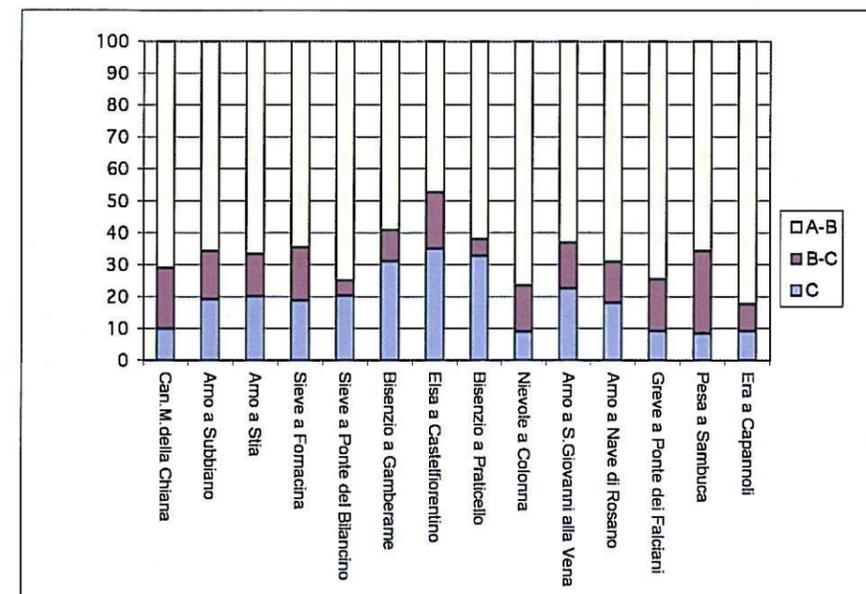
Componenti del deflusso in %				
	A	C	B-C	A-B
A - Canale Maestro della Chiana al ponte della ferrovia	100	9,84	18,95	71,21
B - Arno a Subbiano	100	18,98	15,09	65,93
C - Arno a Stia	100	19,88	13,22	66,9
D - Sieve a Fornacina	100	18,58	16,73	64,69
E - Sieve a Ponte di Bilancino	100	20,11	4,66	75,23
F - Bisenzio a Gamberame	100	30,96	9,75	59,29
G - Elsa a Castelfiorentino	100	34,88	17,75	47,37
H - Bisenzio a Praticello	100	32,56	5,26	62,18
I - Nievole a Colonna	100	8,92	14,46	76,62
L - Arno a San Giovanni alla Vena	100	22,42	14,24	63,34
M - Arno a Nave di Rosano	100	17,88	12,9	69,22
N - Greve al ponte dei Falciani	100	9,05	16,11	74,84
O - Pesa a Sambuca	100	8,22	25,87	65,91
P - Era a Capannoli	100	9,00	8,43	82,57
Q - Vincio a Cireglio	100	28,42	-8,85	80,43

Si osserva che, per le stazioni che sottendono bacini con invasi artificiali di grandi dimensioni - Canale Maestro della Chiana, Arno a Nave di Rosano, Arno a S. Giovanni alla Vena - è probabile che il deflusso di base dei mesi estivi risulti superiore a quello "naturale" (a causa del rilascio dei volumi invasati), mentre quello dei mesi piovosi sia inferiore

(per la captazione di parte dei deflussi).

Per il Vincio a Cireglio i dati sono inattendibili, come dimostra il fatto che la curva C risulta mediamente più alta della B; questo dipende sia dai pochi anni di registrazione (sette) sia dalle piccolissime dimensioni del bacino.

Fig. 12 - Scomposizione delle componenti del deflusso medio annuo alle sezioni idrografiche del bacino dell'Arno (serie A) (A-B = ruscellamento calcolato - B-C = campo indeterminato - C = flusso di base calcolato)



La tabella 21 contiene il deflusso di base in milioni di mc e in percentuale del deflusso medio annuo, in mm di lama d'acqua defluita, totale.

Tabella 21 - Deflusso di base medio annuo alle sezioni idrografiche (serie A).

Bacino	Afflussi Mm ³ /anno	Deflusso totale Mm ³ /anno	Deflusso di base Mm ³ /anno	Deflusso di base % del deflusso totale
A Canale M° della Chiana al ponte ferr. Fi-Ro	1004,62	246,29	24,23	9,84
B Arno a Subbiano	856,64	542,04	102,88	18,98
C Arno a Stia	72,88	47,43	9,43	19,88
D Sieve a Fornacina	917,82	446,44	82,95	18,58
E Sieve a Ponte del Bilancino	190,48	92,84	18,67	20,11
F Bisenzio a Gamberame	213,84	117,78	36,46	30,96
G Elsa a Castelfiorentino	667,37	164,43	57,35	34,88
H Bisenzio a Praticello	95,73	51,47	16,76	32,56
I Nievole a Colonna	52,38	18,40	1,64	8,92
L Arno a S. Giovanni alla Vena	7954,18	2573,84	577,05	22,42
M Arno a Nave di Rosano	4006,87	1724,86	308,41	17,88
N Greve a Ponte dei Falciani	98,84	25,01	2,26	9,05
O Pesa a Sambuca	99,62	38,13	3,13	8,22
P Era a Capannoli	296,92	107,56	9,68	9,00
Q Vincio a Cireglio	2,50	1,80	0,51	28,42

Possiamo osservare che il bacino dell'Elsa a Castelfiorentino ha il più alto valore percentuale del deflusso di base (34,88%): questo è fornito per la quasi totalità dalla sorgente di Vene degli Onci, che ha una portata media di circa 0,9 mc/s e come zona di ricarica gli affioramenti di Calcare Cavernoso della Montagna Senese, del Poggio del Comune e del Monte Maggio.

Fra i sottobacini maggiori, il valore più basso si registra per il Canale Maestro della Chiana: 9,84%. In questo caso incidono, oltre alla bassa permeabilità delle rocce, anche l'elevata evapotraspirazione rispetto agli afflussi meteorici.

3.3.3 Deflusso di base dei bacini idrografici (bacini della serie B)

Per i 18 bacini idrografici della serie B (Tabella 5) mancando le misure dei deflussi non è possibile applicare il metodo delle portate caratteristiche. Le portate medie mensili ottenute con il metodo illustrato al par. 4.3.1 infatti non possono essere scomposte nelle tre componenti del deflusso.

Tuttavia si è cercato di calcolare il deflusso di base annuo, con il metodo delle regressioni multiple per valutare le riserve idriche sotterranee dei bacini.

Il modello di regressione multipla che si intendeva individuare, sulla base dei valori del deflusso di base calcolati alle sezioni idrome-

triche (bacini della serie A), in questa situazione è dato da:

Deflusso di base annuo $Db = f$ (uso del suolo, permeabilità, precipitazioni, temperatura, pendenza)

Non è stata considerata la Nievole, in quanto i valori di deflusso non rispecchiano le portate climatiche a causa dei prelievi dei pozzi in fregio al torrente.

L'equazione ottenuta è la seguente:

$$Db = 27.89 \text{ (uso del suolo)} + 10.44 \text{ (permeabilità)} + 0.35 \text{ (pioggia)} - 23.906 \text{ (temperatura)} - 3.5114 \text{ (pendenza) [equazione 3]}$$

Il coefficiente di confidenza R^2 è risultato di 0.99485

I coefficienti numerici relativi a ciascun parametro risultano i seguenti:

Uso del suolo	0.093414
Permeabilità	0.125593
Pioggia	1.867348
Temperatura	-1.074975
Pendenza	-0.167509

Com'era da attendersi, nell'equazione del deflusso di base prevalgono ancora la pioggia e la temperatura, ma, rispetto all'equazione del deflusso totale, acquistano importanza anche la permeabilità e l'uso del suolo.

I residui sono i seguenti:

Bacino	Valore residuo
Arno a Stia	-14.18
Arno a Sabbiano	-37.99
Canale Maestro della Chiana	7.70
Sieve a Ponte di Bilancino	-35.56
Sieve a Fornacina	-38.38
Arno a Nave di Rosano	9.02
Greve a Ponte dei Falciani	-8.52
Bisenzio a Fraticello	-7.78
Bisenzio a Gamberame	22.63
Pesa a Sambuca	-9.54
Vincio a Cireglio	59.19
Elsa a Castelfiorentino	31.79
Era a Capannoni	15.88
Arno a S. Giovanni alla Vena	-4.77

Il residuo maggiore e quindi il minore adattamento al modello, si ha per il Vincio a Cireglio (il modello sottostima il dato reale): le piccole dimensioni del bacino e i pochi anni di osservazione (sette) rendono male applicabile il metodo delle portate caratteristiche con il

quale è stato calcolato il deflusso di base.

Applicando l'equazione 3 del deflusso di base ai 18 bacini idrografici si ottengono i risultati della tabella 22.

Tabella 22 - Deflusso di base annuo dei corsi d'acqua dei bacini idrografici (serie B).

	Area in Km ²	Afflussi Mm ³ /anno	Deflusso totale naturale Mm ³ /anno	Deflusso di base Mm ³ /anno	Deflusso di base % del deflusso totale
1	Padule di Bientina (Canale Navarecchio)	308,58	348,94	171,29	50,36
2	Padule di Fucecchio (Canale Usciana)	489,70	575,48	312,09	82,80
3	Ombrone	484,31	595,13	338,20	89,08
4	Bisenzio	308,04	371,75	208,53	54,74
5	Sieve	837,93	949,19	468,34	86,17
6	Mugnone	71,74	67,49	28,12	2,46
7	Casentino (Arno)	877,41	1027,11	647,63	86,85
8	Chiana	1370,55	1077,65	268,67	26,57
9	Valdarno Superiore	1018,55	942,89	278,76	46,83
10	Greve	290,42	244,97	64,75	6,47
11	Pesa	336,23	285,71	109,25	5,52
12	Orme	56,37	47,74	11,71	2,79
13	Elsa	865,12	722,34	174,07	50,27
14	Egola	114,29	98,53	24,61	1,77
15	Era	595,48	521,42	188,95	18,06
16	Tora	105,64	99,15	39,03	5,62
17	Fiume Morto	119,91	122,22	52,49	14,19
18	Pianura di Pisa	430,26	377,87	137,95	22,67

Questi dati vanno presi con molto senso critico, non solo perché ricavati con un metodo che fornisce valori approssimativi, ma anche perché i corsi d'acqua di alcuni dei bacini considerati hanno caratteristiche diverse da quelli della serie A: in particolare i bacini del Fiume Morto e della Pianura di Pisa hanno una definizione geografica più che idrografica, nel

senso che le acque di precipitazione finiscono in una rete di canali che corrisponde all'infiltrazione efficace piuttosto che al deflusso di base dei corsi d'acqua: questa infiltrazione, trattandosi di aree di pianura, va ad alimentare falde che non alimentano la rete idrica, ma vengono sfruttate mediante i pozzi.

3.4 PORTATE DI MAGRA

Ai fini del bilancio idrico, cioè del confronto fra la disponibilità d'acqua e le richieste per i diversi usi, è di massima importanza definire le portate di magra, o le portate minime, del corso d'acqua principale e dei suoi affluenti maggiori. Infatti, dati il regime climatico e idrologico del bacino dell'Arno, è proprio nel periodo delle portate di magra che si registrano le maggiori richieste d'acqua: ai prelievi costanti (per uso acquedottistico e industriale) si aggiungono quelli ad uso irriguo.

Per questo è importante giungere ad una valutazione attendibile delle portate minime che un corso d'acqua raggiunge in un anno medio, nonché delle portate minime che saranno prevedibilmente raggiunte in un certo numero di anni.

Ancora una volta gli unici dati di partenza per calcolare le portate di magra sono le misure del deflusso eseguite in corrispondenza delle sezioni idrometriche. Purtroppo non sempre si tratta di dati completamente affidabili; infatti sulle portate minime incidono maggiormente le approssimazioni insite nella metodologia usata dall'Ufficio Idrografico: quando il livello idrico (dalla cui registrazione partono i calcoli di portata) si trova presso lo zero idrometrico, la curva livelli - portate può portare ad errori percentualmente importanti, soprattutto nelle sezioni non regolarizzate, che sono la maggioranza.

Inoltre si deve ricordare che le portate misurate sono quelle *effettive*, cioè quelle che risultano dai prelievi e dagli scarichi. E' eviden-

te che sulle portate di magra tali prelievi e scarichi incidono in maniera maggiore (in molti casi, come vedremo, incidono più dei deflussi naturali); pertanto eventuali errori nel loro calcolo porta ad errori importanti nella valutazione dei deflussi di magra naturali.

3.4.1 La portata minima vitale

Le portate di magra naturali sono un dato di partenza essenziale per la definizione del *minimo deflusso vitale (MDV)*, definito come la minima quantità d'acqua che deve essere presente in un corso d'acqua per garantire la sopravvivenza e la conservazione dell'ecosistema fluviale. E' un valore che varia in funzione delle caratteristiche fisiche del corso d'acqua interessato e delle caratteristiche dell'ecosistema interessato.

Il concetto di deflusso minimo vitale è stato introdotto nella legislazione nazionale con la legge n.183 del 18 maggio 1989 - *Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo* - La lettera i del punto 1 dell'art. 3, relativo alle attività di pianificazione, di programmazione e di attuazione dei Piani di Bacino, indica tra queste *"la razionale utilizzazione delle risorse idriche superficiali e profonde, con una efficiente rete idraulica, irrigua ed idrica, garantendo, comunque, che l'insieme delle derivazioni non pregiudichi il minimo deflusso costante vitale negli alvei sottesi, nonché la polizia delle acque"*.

La legge n. 36 del 5 gennaio 1994 - *Norme per l'equilibrio del bilancio idrico ed il razionale utilizzo delle acque di superficie* - al punto 3 dell'art. 3 prevede che *"nei bacini idro-*

grafici caratterizzati da consistenti prelievi o da trasferimenti, sia a valle che oltre la linea di dispiuvio, le derivazioni sono regolate in modo da garantire il livello di deflusso necessario alla vita negli alvei sottesi e tale da non danneggiare gli equilibri degli ecosistemi interessati".

Nel d. lgs. n. 152/99 il minimo deflusso vitale è menzionato quale obiettivo specifico dei Piani di Tutela. Lo stesso decreto al comma 4 dell'art. 22, prevede che il Ministero dei Lavori Pubblici emani le "linee guida per la predisposizione del bilancio idrico, comprensive dei criteri per il censimento delle utilizzazioni in atto e per la definizione del minimo deflusso vitale". Alla data di redazione di questo Quaderno (novembre 2001) il Ministero non ha ancora ottemperato a questo impegno.

La normativa di cui sopra pone l'attenzione sui molteplici interessi relativi alla risorsa idrica, sottolineando da un lato la necessità di conservazione degli ecosistemi acquatici, dall'altro di non pregiudicare gli utilizzi futuri della risorsa. Sostanzialmente sono due problemi diversi tra loro collegati alla quantità d'acqua e che quindi dovrebbero essere affrontati in maniera contestuale dal gestore della risorsa. A questo, per i corsi d'acqua a regime torrentizio quali Arno e affluenti, c'è da aggiungere che spesso i quantitativi di portata naturale in alveo sono tali da garantire né vita acquatica né utilizzi esterni. Nell'Arno la portata climatica a Firenze scende frequentemente al di sotto di 3-4 mc/s, valori del tutto insufficienti per le necessità dell'acquedotto dell'Anconella (in media 3 mc/s), per la diluizione degli scarichi e in generale per l'aspetto del fiume nel tratto cittadino.

Tale problema viene superato artificialmente grazie ai contributi degli invasi ubicati a monte delle prese dell'acquedotto, contributi che nel passato non sempre sono risultati sufficienti. Ad esempio, nel 1985, le scarse piogge invernali e primaverili impedirono l'invaso nelle dighe di Levane e La Penna di volumi sufficienti a garantire i fabbisogni idropotabili dell'acquedotto fiorentino, tanto che il comune di Firenze tamponò la conseguente crisi idrica tramite il temporaneo sfruttamento delle acque dei laghetti di Signa, portate al potabilizzatore tramite una tubazione realizzata con fondi provenienti dalla protezione civile.

E' proprio in considerazione dei fabbisogni idrici della comunità che, in prima approssimazione ed in attesa di studi più specifici, l'Autorità di Bacino del Fiume Arno ha stabilito in 8 mc/s la "portata minima vitale" per l'Arno all'altezza di Firenze (Autorità di Bacino del Fiume Arno, 1999). Tale portata, ben superiore alla minima naturale, ed ottenibile grazie ai rilasci della diga di Bilancino, è il valore risultante applicando un contributo unitario per superficie di bacino sottesa pari 1,6 l/s Kmq.

In attesa delle linee guida del Ministero per la definizione del DMV e quindi nell'individuazione di criteri e metodologie più precise, per i corsi d'acqua qui studiati sono state confrontate due ipotesi di calcolo: quella che si basa sul contributo unitario dell'area sottesa e quella che fa riferimento alla portata $Q_{7,10}$, definita come la *minima portata media settimanale (media mobile su setti giorni consecutivi) con tempo di ritorno 10 anni, considerata, anche a livello internazionale, come un buon indicatore del deflusso minimo vitale.*

Il criterio del coefficiente unitario è molto semplice da applicare perché necessita solo della superficie sottesa alla sezione di interesse. E' peraltro chiaro che questo criterio non può essere esteso automaticamente a tutti i sottobacini e alle diverse aste fluviali, senza confrontare il valore risultante dalla formula con le effettive portate naturali: infatti in Toscana ci sono diversi corsi d'acqua non perenni, per i quali il DMV così determinato dovrebbe essere superiore al deflusso minimo naturale.

Il calcolo delle portate di magra alle stazioni idrometriche è stato basato sui valori di portata media giornaliera calcolati dall'Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa per Arno e Affluenti.

Per fornire un valore di portata minima statisticamente valido, per ogni sezione fluviale con stazione di misura delle portate è stato calcolato il $Q_{7,10}$.

Nella tabella 23 le portate $Q_{7,10}$ misurate sono state confrontate con quelle naturali, che si avrebbero in assenza di prelievi, restituzioni e scarichi. Considerato che i deflussi minimi si registrano nel periodo estivo, i prelievi ad uso irriguo sono stati considerati quelli massimi calcolati (95% del valore concesso, vedi par.

3.4.2 Le portate di magra naturali

Tabella 23 - Portate (mc/s) minime settimanali con tempo di ritorno 10 anni, misurate e "naturali", alle sezioni idrografiche (bacini della serie A) e confronto col deflusso minimo vitale calcolato in base al coefficiente unitario.

	numero di anni considerati	$Q_{7,10}$ dalle misure	Prelievi meno restituzioni e scarichi	$Q_{7,10}$ naturali	deflusso = 1,6 l/s.Kmq
A - Canale Maestro della Chiana	13	0,082	0,955	1,037	2,056
B - Arno a Subbiano	37	0,376	0,902	1,278	1,199
C - Arno a Stia	14	0,044	0,000	0,044	0,096
D - Sieve a Fornacina	32	0,370	0,983	1,353	1,295
E - Sieve a Bilancino	18	0,019	0,141	0,160	0,241
F - Bisenzio a Gamberame	22	0,233	0,773	1,006	0,241
G - Elsa a Castelfiorentino	32	0,758	0,109	0,867	1,277
H - Bisenzio a Praticello	17	0,085	-0,006	0,079	0,095
I - Nievole a Colonna	23	0,000	0,092	0,092	0,063
L - Arno a S. Giovanni alla Vena	32	3,682	3,496	7,178	13,125
M - Arno alla Nave di Rosano	23	2,099	2,634	4,733	6,600
N - Greve a Ponte dei Falciani	17	0,000	0,052	0,052	0,186
O - Pesa a Sambuca	17	0,008	0,050	0,058	0,181
P - Era a Capannoli	19	0,012	0,081	0,093	0,537
Q - Vincio a Cireglio	7	0,001	0,000	0,001	0,002