

Autorità di Bacino del Fiume Arno

Modellistica idrologica per la gestione integrata delle risorse
idriche del bacino dell'ARNO e tutela dell'habitat fluviale in
relazione al Deflusso Minimo Vitale

Rapporto finale

Appendice A

**CALCOLO E REGIONALIZZAZIONE
DELL'INDICE DI DEFLUSSO DI BASE
(BFI)**

PROF. ING. LUCIO UBERTINI

Luglio, 2004

INDICE

1	IL BASE FLOW INDEX (BFI).....	1
2	IL CALCOLO DEL <i>BFI</i> DAI DATI DI PORTATA GIORNALIERI.....	2
3	CONSIDERAZIONI SULLA VARIABILITA' DEL <i>BFI</i>	5
4	POSSIBILI MODIFICHE DELLA PROCEDURA "LVOVITCH"	8
5	INFLUENZA DEL PARAMETRO <i>NGRUPPO</i> SUL CALCOLO DEL <i>BFI</i>	12
6	POSSIBILI DIPENDENZE TRA <i>BFI</i> E CARATTERISTICHE IDROGEOMORFOLOGICHE	16
7	LA DEFINIZIONE DEL LEGAME BFI - IDROGEOLOGIA.....	17
8	IL BFI COME INDICATORE DI MAGRA	20
9	SINTESI SUL CALCOLO E SULLE CARATTERISTICHE DEL BFI.....	21
10	L'INDICE DEL DEFLUSSO DI BASE NEL BACINO DEL FIUME ARNO	22
10.1	Il BFI nelle stazioni di misura.....	23
10.2	La cartografia geologica nel bacino del Fiume Arno e la sua applicazione ai bacini delle stazioni di misura.....	24
10.3	Il legame BFI-geologia nel bacino del Fiume Arno	26
10.4	Stima del BFI dalla geologia.....	27

1 IL BASE FLOW INDEX (BFI)

Le caratteristiche idrogeologiche di un bacino (intensità limite di infiltrazione, porosità efficace, permeabilità delle formazioni rocciose, ecc.) condizionano in modo determinante le portate di tempo asciutto di un corso d'acqua. Risulta pertanto di grande interesse stabilire una relazione quantitativa tra i deflussi di base e tali caratteristiche.

Purtroppo resta difficile sintetizzare in un unico parametro il complesso delle grandezze idrogeologiche appena citate, a meno di non assumere a misura di tali caratteristiche gli effetti da esse prodotti, ovvero gli stessi deflussi di base. In termini assoluti, però, i deflussi di base sono condizionati in modo non trascurabile anche dai deflussi totali, la cui variabilità può mascherare le reali influenze del bacino sui primi. Per attenuare quest'ultima dipendenza, di norma, i deflussi di base vengono espressi percentualmente rispetto ai deflussi totali (*indice di deflusso di base o BFI*). Tale indice infatti, in quanto adimensionale, dipende in modo meno diretto dal volume totale dei deflussi e può meglio evidenziare l'effetto "regolatore" operato dal bacino e dalle formazioni idrogeologiche in esso presenti. Infatti in bacini caratterizzati da deflussi sensibilmente costanti, cioè in presenza di consistenti deflussi anche in periodi non piovosi, tale indice sarà abbastanza elevato e prossimo all'unità. In bacini di caratteristiche opposte (scarsi deflussi profondi) tale indice sarà prossimo a zero.

In letteratura sono presenti diversi metodi per il calcolo di tale indice, in particolare due metodi sono di maggiore interesse.

Il primo esprime il *BFI* come rapporto tra la portata media Q_b del mese in cui si verifica la minima magra e la portata media annua Q_a .

$$BFI = 100 \frac{Q_b}{Q_a}$$

Il secondo esprime il *BFI* come rapporto tra il volume annuo di deflusso di base V_b e il deflusso totale V_a .

$$BFI = 100 \frac{V_b}{V_a}$$

Il primo metodo consente stime estremamente semplici del *BFI*, in quanto utilizza due soli dati di portata facilmente reperibili sugli Annali del S.I.I., ma è al pari impreciso in quanto i deflussi profondi annui solo in prima approssimazione possono essere rappresentati con i deflussi del mese di minima magra. Infatti isolate precipitazioni di forte intensità possono alterare sensibilmente il valore di Q_b (portata mensile), rendendo però sensibilmente prevalenti i deflussi superficiali su quelli base. Inoltre la portata Q_b , come singolo valore, può essere facilmente soggetta a significative alterazioni antropiche per prelievi irrigui estivi che sfuggono a qualsiasi procedura di ricostruzione delle portate naturali. Pertanto sia la portata media del mese di minima

magra, sia la Q_a , possono essere alterate da numerosi fattori esterni e quindi non essere idonee a rappresentare in maniera esaustiva i deflussi di base.

Per stimare il BFI con il secondo metodo bisogna, in primo luogo, disporre delle portate giornaliere di un anno e procedere al tracciamento della linea di deflusso di base con uno dei tanti metodi proposti in letteratura. Tra tutti è particolarmente significativo, per metodologia e risultati, quello proposto da Lvovitch (1972). Tale procedura, infatti, consente, in modo oggettivo ed automatico, di tracciare la curva dei deflussi profondi utilizzando il diagramma annuo delle portate medie giornaliere di un corso d'acqua.

2 IL CALCOLO DEL BFI DAI DATI DI PORTATA GIORNALIERI

Il metodo proposto da Lvovitch lavora sul dato cronologico di portata media giornaliera di un corso d'acqua, attraverso una procedura che può essere significativamente evidenziata sul corrispondente diagramma. Le fasi operative che consentono il calcolo del BFI su base annua sono le seguenti:

- i 365 dati di portata vengono suddivisi in gruppi contigui di dimensione $NGRUPPO$ (usualmente $NGRUPPO$ è assunto pari a 5 giorni);
- all'interno di ciascun gruppo viene individuata la portata minima Q_{min} che, insieme alle analoghe relative agli altri gruppi, costituisce una prima approssimazione dell'idrogramma di deflusso di base. Nel caso di $NGRUPPO = 5$ le Q_{min} sono esattamente 73 ed in generale saranno la parte intera di $365/NGRUPPO$;
- i valori di Q_{min} vengono quindi analizzati a gruppi di tre come segue:

$$\begin{array}{ccc}
 Q_{min(1)}, & Q_{min(2)}, & Q_{min(3)} \\
 \\
 Q_{min(2)}, & Q_{min(3)}, & Q_{min(4)} \\
 \\
 \dots\dots\dots \\
 \\
 Q_{min(N-2)}, & Q_{min(N-1)}, & Q_{min(N)}
 \end{array}$$

- il valore centrale di ciascun gruppo

$$Q_{min}(2), \quad Q_{min}(3), \quad \dots, \quad Q_{min}(N-1)$$

viene confrontato con i valori direttamente contigui. Se sono verificate le condizioni

$$Q_{min}(I) \leq 0.9 Q_{min}(I+1) \quad ; \quad Q_{min}(I) \leq 0.9 Q_{min}(I-1)$$

per $I=2, N-1$, allora Q_{min} è un *TURN POINT* ovvero un punto della curva di deflusso di base.

A titolo esemplificativo nelle figure A1, A2 e A3 sono riportati rispettivamente il diagramma delle portate giornaliere, delle Q_{min} e dei *TURN POINT* (curva dei deflussi di base). Nella figura A4 sono riuniti in uno stesso grafico i diagrammi di cui alle precedenti figure.

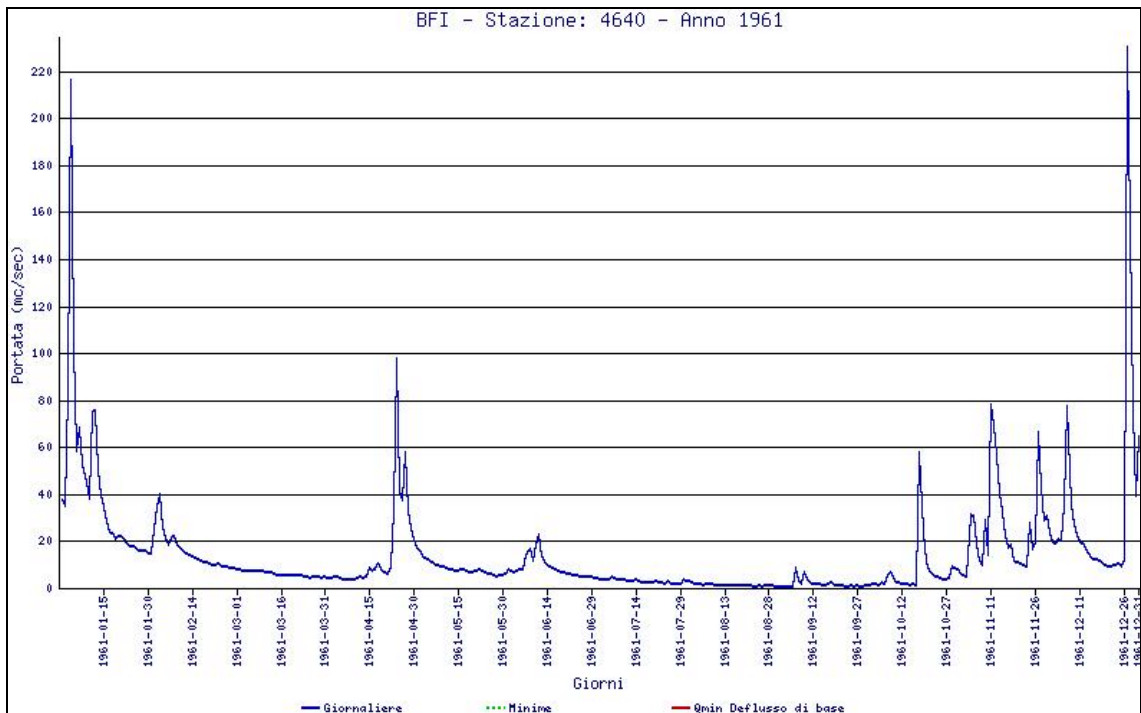


Figura A1: Andamento delle portate giornaliere alla stazione di Fornacina (anno 1961-misurate).

Tale metodo può essere parametrizzato in funzione della variabile *NGRUPPO*, alla quale possono attribuirsi valori variabili tra 3 ÷ 10. L'effetto di tale variabile è quello di rendere più o meno piatta la curva di deflusso di base. In alcuni casi, per ovviare alla non definizione, per uno o più steps, della curva dei *TURN POINTS* nel tratto iniziale e finale, è consigliabile correggere la procedura iniziando la scansione delle portate a partire dalla portata minima annua, come sarà esposto con maggiore dettaglio nei prossimi capitoli.

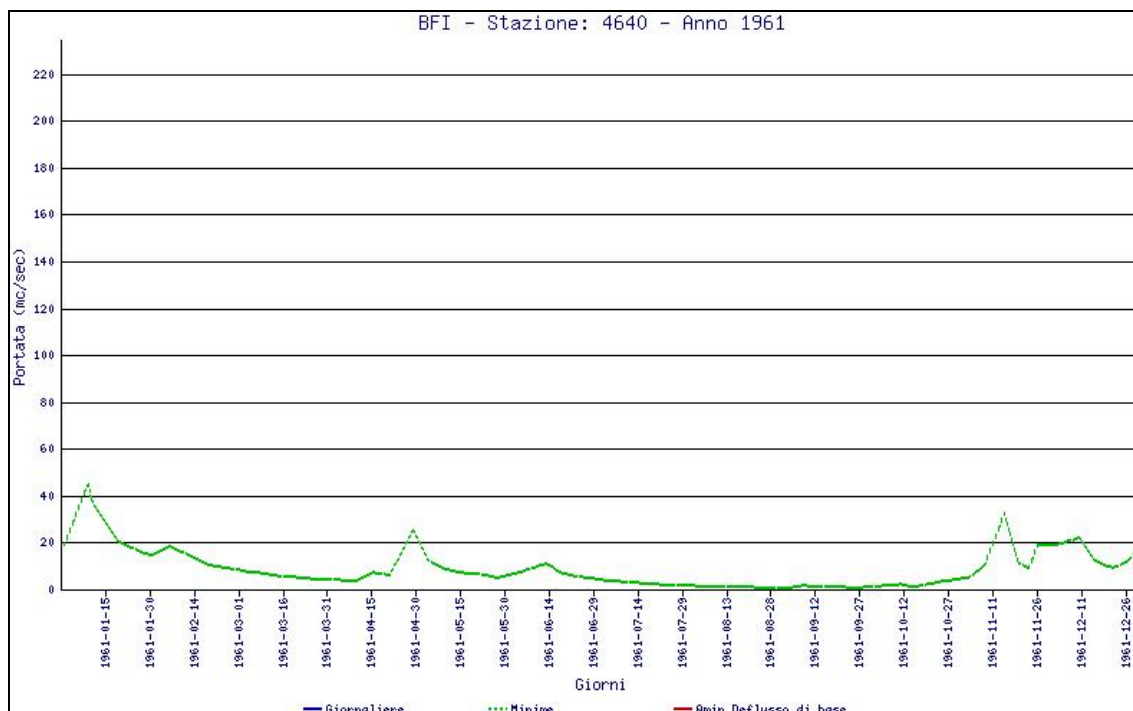


Figura A2: Andamento delle portate Qmin alla stazione di Fornacina (anno 1961-misurate).

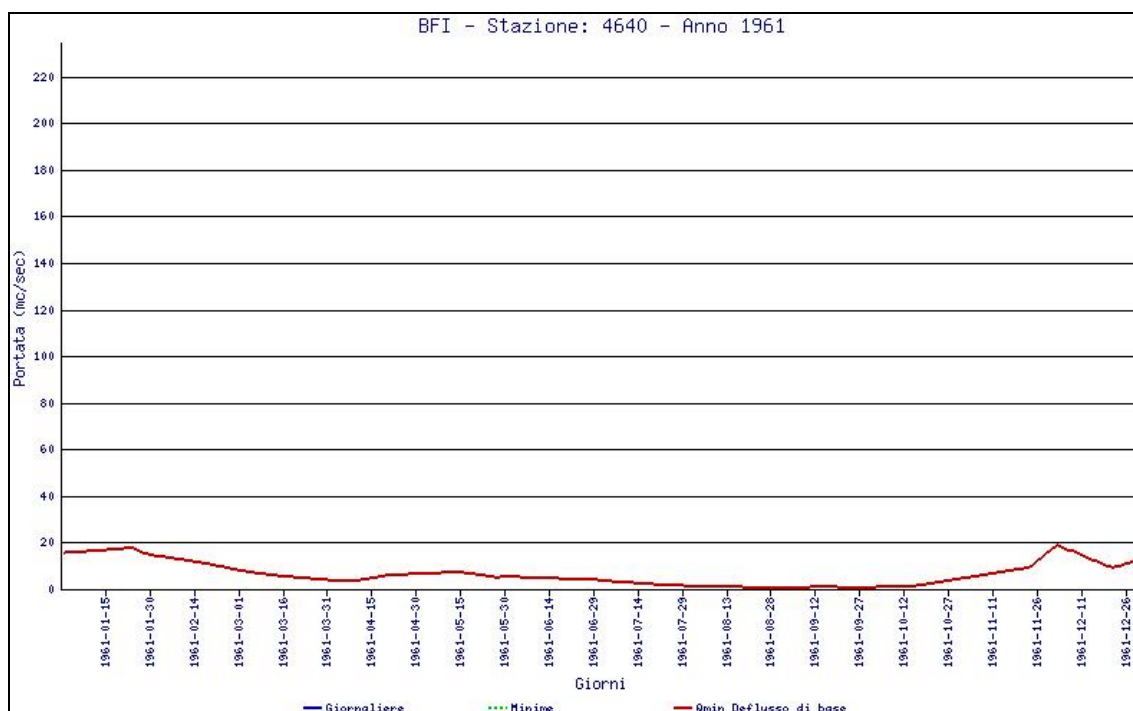


Figura A3: Andamento delle portate TURN POINT alla stazione di Fornacina (anno 1961-misurate).

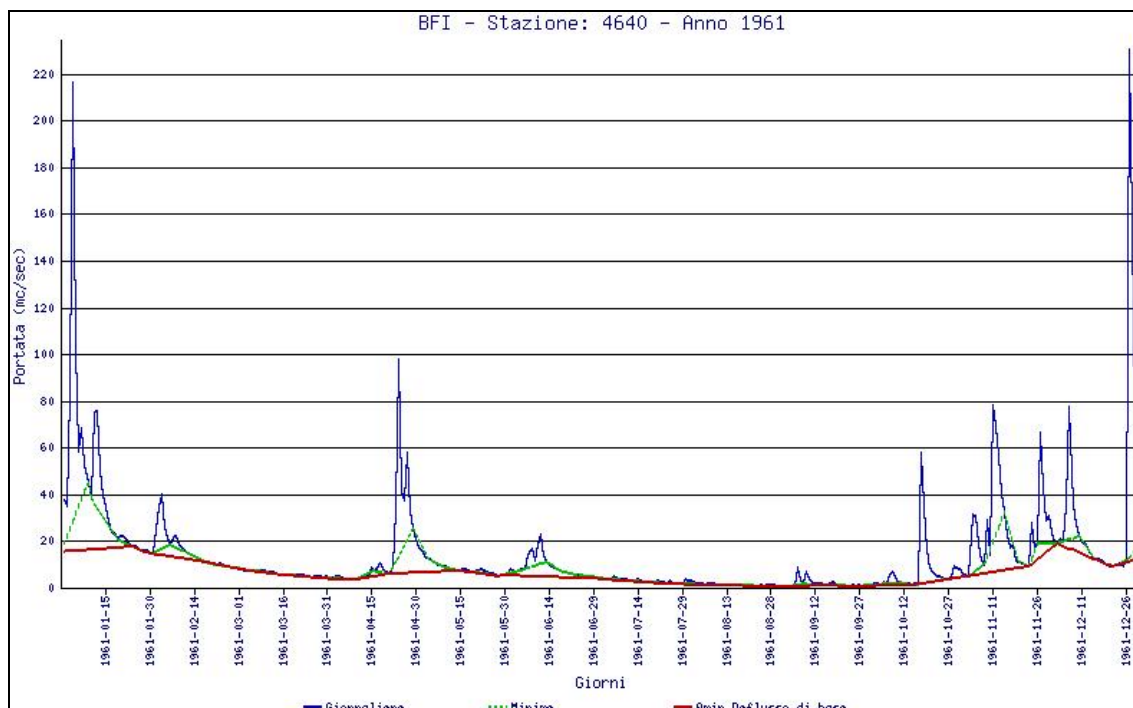


Figura A4: Esempio di delimitazione del deflusso di base alla stazione di Fornacina (anno 1961-misurate).

Benché il *BFI* possa essere calcolato con questo metodo solo quando siano disponibili i dati di portata, si anticipa fin d'ora che nelle sezioni non-strumentate sarà possibile una stima del *BFI* attraverso la conoscenza delle caratteristiche idrogeologiche del bacino imbrifero, in quanto il *BFI* risulterà strettamente dipendente da queste.

In generale, nello studio viene adottato il metodo di stima del *BFI* dalle caratteristiche idrogeologiche del bacino, metodo che consente di avere una maggiore indipendenza del *BFI* dalla variabilità aleatoria del clima nelle diverse annate idrologiche.

3 CONSIDERAZIONI SULLA VARIABILITA' DEL *BFI*

Come accennato nel precedente paragrafo, il *BFI* può ritenersi dipendente in modo prioritario dalle caratteristiche idrogeologiche del bacino. Infatti, avendo espresso il *BFI* come rapporto tra i deflussi profondi ed i deflussi totali, si sono drasticamente ridotte tutte le dipendenze funzionali con altri parametri quali la superficie del bacino e gli afflussi meteorici. Oltre a ciò, a meno di verifiche di dettaglio, può essere esclusa a priori l'esistenza di un legame statisticamente significativo tra il *BFI* ed alcune caratteristiche geomorfologiche quali la pendenza media del bacino e la densità di drenaggio.

Sotto tali ipotesi, vista la sostanziale invariabilità nel tempo delle caratteristiche idrogeologiche, conseguirebbe la costanza rigorosa del *BFI* per ogni anno idrologico inteso come ciclo chiuso. In realtà tale conclusione può ritenersi verificata con buona approssimazione ma non in modo rigorosamente esatto. Infatti tale indice è soggetto ad una certa variabilità annua evidenziata mediante semplici indici statistici (coefficiente di variazione) ed analisi di trend in media mobile di classe 5.

Ad esempio, nella figura A5 è riportato tale analisi per la stazione di Fornacina, sul Fiume Sieve, con un valore del *BFI* medio di circa 44 ed un coefficiente di variazione pari al 14%.

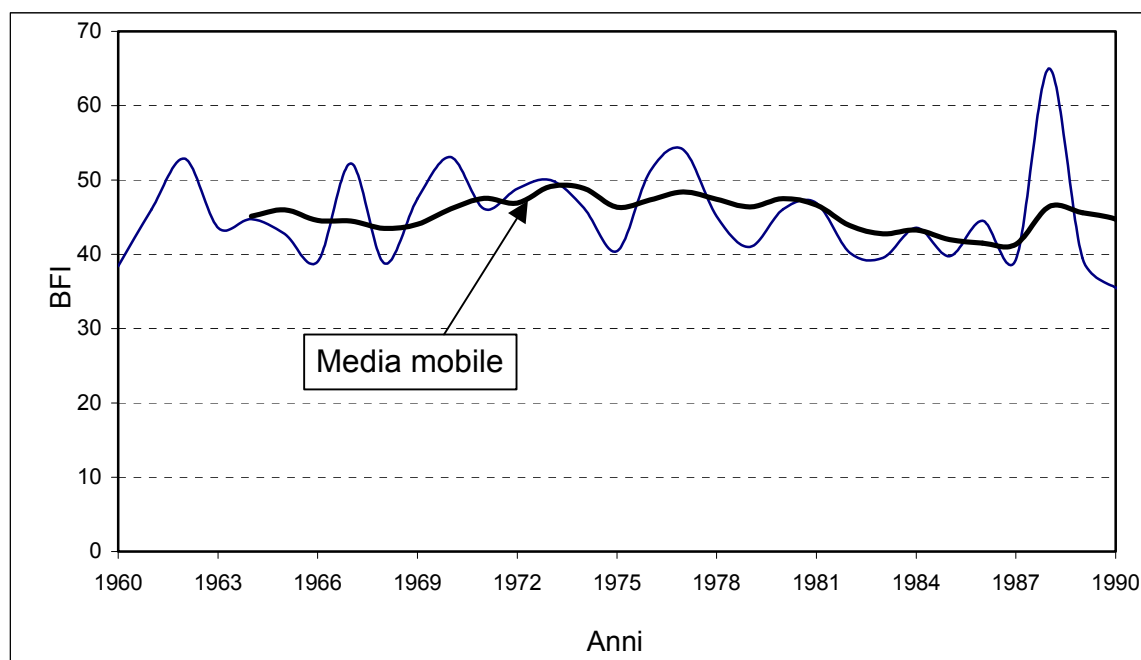


Figura A5: Analisi di trend del *BFI* annuale in media mobile di classe 5 per la stazione di Fornacina (dati elaborati sulle portate naturali).

Analoghe valutazioni sono state fatte per le stazioni di Subbiano ($BFI=43$ circa, $CV=16\%$), Nave di Rosano ($BFI=36$ circa, $CV=19\%$) e S. Giovanni alla Vena ($BFI=46$ circa, $CV=13\%$). Nelle figure A6, A7, A8 sono rappresentate le analisi di trend in media mobile di classe 5 anche per queste stazioni, ritenute tra le più significative. Si osserva che i dati elaborati sono relativi alle portate naturali, pertanto teoricamente non influenzati dei prelievi di monte, seppure con un quadro complessivo dei suddetti prelievi da considerarsi non completamente aggiornato, e comunque con ogni probabilità definito per difetto. Situazione che potrebbe portare ad un miglioramento nella tendenza complessiva alla stabilità del *BFI*.

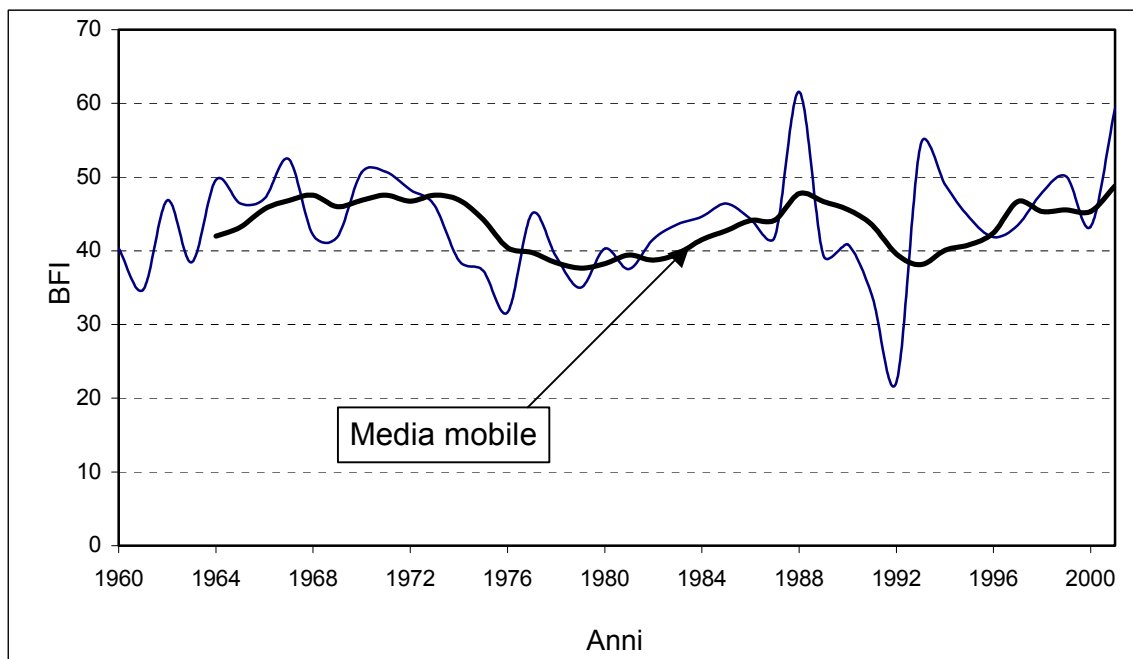


Figura A6: Analisi di trend del BFI annuale in media mobile di classe 5 per la stazione di Subbiano (dati elaborati sulle portate naturali).

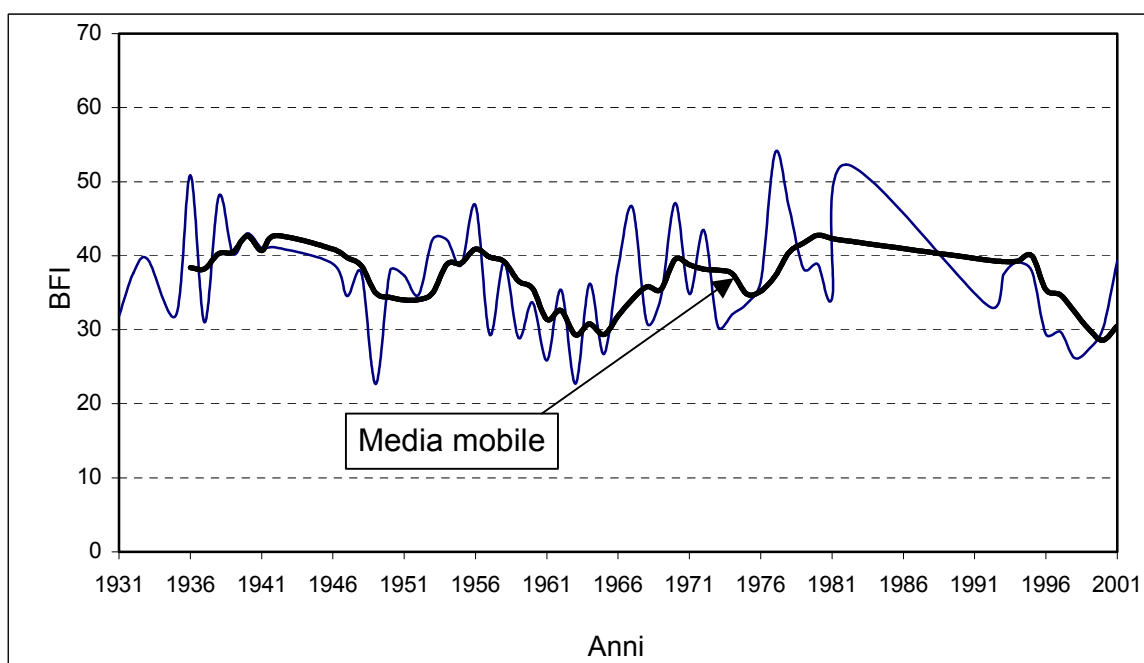


Figura A7: Analisi di trend del BFI annuale in media mobile di classe 5 per la stazione di Nave di Rosano (dati elaborati sulle portate naturali).

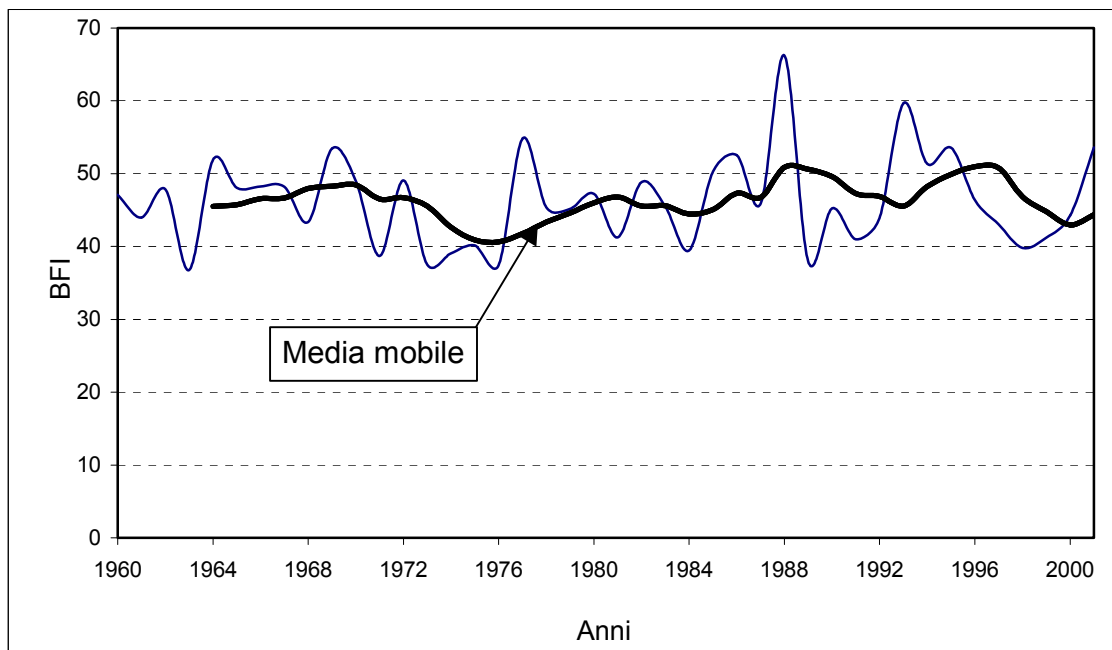


Figura A8: Analisi di trend del BFI annuale in media mobile di classe 5 per la stazione di S. Giovanni alla Vena (dati elaborati sulle portate naturali).

4 POSSIBILI MODIFICHE DELLA PROCEDURA "LVOVITCH"

La procedura di calcolo proposta da Lvovitch non è esente da possibili modifiche finalizzate ad una più corretta stima del *BFI*. Inoltre, come già osservato, la stima del *BFI* fatta con tale procedura è parametrica rispetto ad *NGRUPPO*.

In primo luogo il metodo di separazione dei deflussi proposto da Lvovitch non assicura che la linea dei deflussi di base inizi il primo giorno dell'anno e termini l'ultimo, anzi per definizione questo non avviene mai.

Infatti la individuazione dei *TURN POINTS*, come illustrato nel paragrafo precedente, avviene a partire dal secondo minimo di *NGRUPPO* giorni e procede arrestandosi al penultimo (*N-1*). Quindi i primi e gli ultimi *NGRUPPO* giorni sono per definizione esclusi dall'analisi del *BFI*. Ciò nonostante è possibile che altri gruppi di dati contigui al secondo e all'*N-1-esimo* vengano esclusi dal calcolo del *BFI*. Infatti il minimo del secondo e del penultimo gruppo, come quelli immediatamente contigui, non sempre verificano alle condizioni di appartenenza alla curva di Deflusso di Base.

Risulta pertanto evidente che solo una parte dei 365 giorni saranno presi in considerazione nel calcolo del *BFI*, in quanto la parte iniziale e finale del diagramma dei deflussi giornalieri non viene utilizzata per il calcolo del *BFI*, non essendo possibile definire in questi giorni la curva dei Deflussi di Base.

Si osserva inoltre che con il metodo proposto da Lvovitch, i giorni che si perdono sono quelli relativi all'inizio ed alla fine dell'anno, periodi nei quali il deflusso superficiale risulta prevalente sul deflusso profondo. Da ciò consegue una probabile stima per eccesso del valore del *BFI*, in quanto viene a mancare una componente non trascurabile dei deflussi totali che figurerebbe al denominatore nella relazione che definisce il valore del *BFI*.

Per chiarire quanto detto, la figura A9 mostra un esempio dell'idrogramma e della linea di separazione del deflusso di base. La linea dei deflussi di base inizia il 30-esimo giorno e termina al 350-esimo, si perdono quindi 45 giorni.

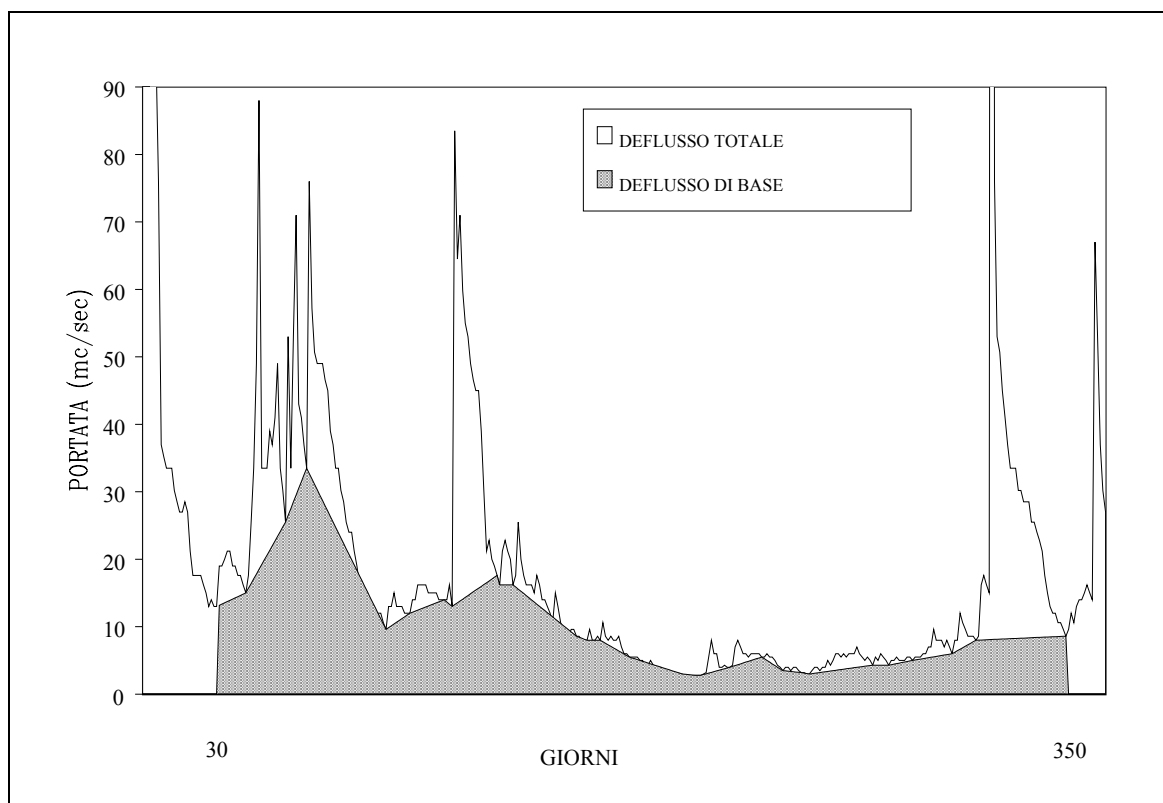


Figura A9: Disaggregazione dei deflussi a partire dal 1 Gennaio.

Per ovviare a tale inconveniente, è stata proposta una procedura alternativa che prevede di avviare la scansione delle portate in *NGRUPPO* giorni a partire dal giorno in cui si verifica la portata minima dell'anno. Questo valore di portata costituisce sicuramente un TURN POINT e quindi sarà il primo punto della linea separatrice dei deflussi. Tale procedura prevede che, raggiunta la fine cronologica dell'anno (31 dicembre), la scansione continui dal 1 Gennaio dello stesso anno fino a chiudersi in corrispondenza del giorno precedente a quello in cui è stata registrata la portata minima.

Ciò presuppone che si assumano come cronologicamente successive le portate del 31 Dicembre con quelle del 1° Gennaio dello stesso anno solare. Tale traslazione può assumersi lecita solo ipotizzando che l'andamento delle portate dell'anno successivo non siano statisticamente diverse da quelle dell'anno precedente.

Il risultato di questa operazione è di aumentare il numero di giorni su cui calcolare il *BFI* rispetto a quanto avviene nella procedura standard di Lvovitch. Per chiarire meglio come opera questa seconda procedura, si può fare riferimento sempre all'idrogramma della figura A9.

In particolare, il giorno in cui si ha la portata minima è il 31 Luglio ovvero il 212-esimo giorno dell'anno. Quindi l'idrogramma su cui si procede alla separazione dei deflussi è quello che va dal 31 Luglio (primo *TURN POINT* per definizione) al 31 Dicembre e dal 1 Gennaio al 26 Luglio (che risulta l'ultimo *TURN POINT*).

La procedura è mostrata in figura A10. I giorni su cui si calcola il BFI sono aumentati da 320, calcolati con il metodo "Lvovitch", a 360.

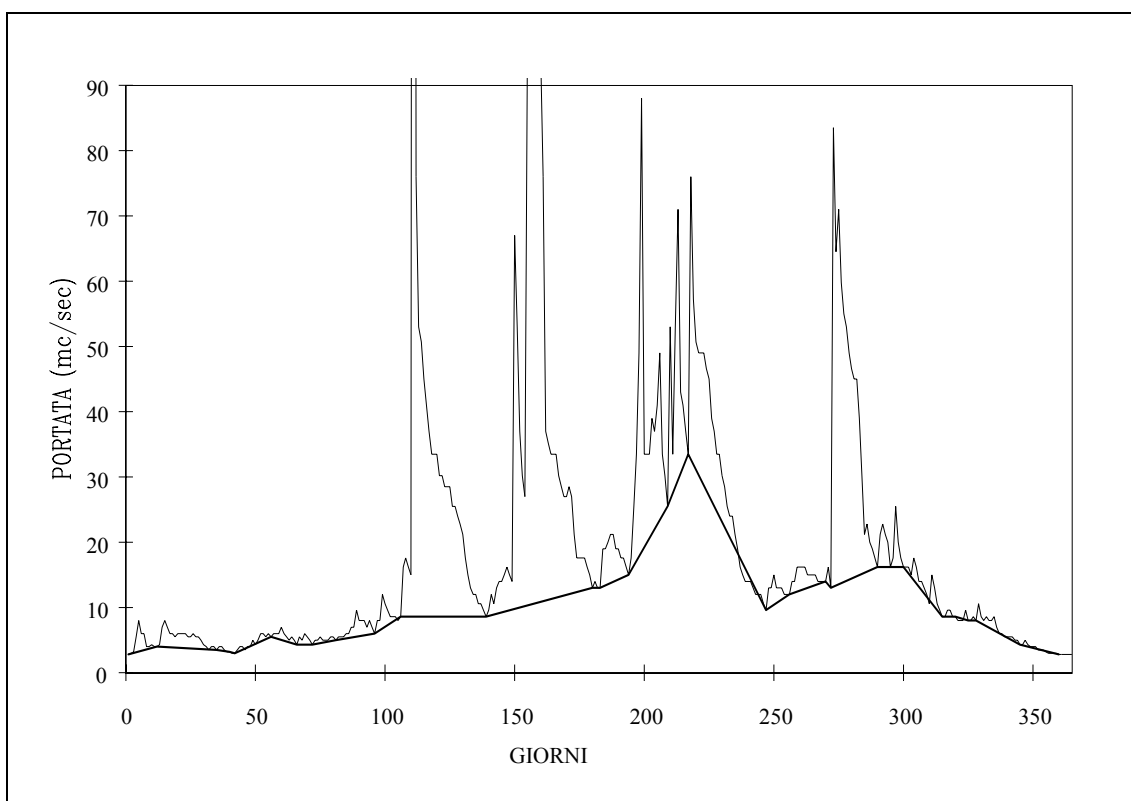


Figura A10: Disaggregazione dei deflussi a partire dalla portata minima annua.

Per effettuare un confronto tra le due procedure è stata sviluppato un algoritmo di calcolo che elimina gli inconvenienti sia della prima (perdita di informazione idrologica) sia della seconda (traslazione dell'idrogramma giornaliero dei deflussi).

In questo caso, l'intera serie storica di *N-annate*, è stata considerata come fosse un unico periodo ai fini del calcolo del *BFI* secondo le regole già illustrate nei precedenti paragrafi. Ciò consente di determinare in modo continuo, a meno del primo e dell'ultimo anno, la curva dei Deflussi di Base e quindi di stimare il *BFI*, per le annate intermedie, su tutti i 365 valori delle portate osservate.

I valori calcolati in tal modo non sono condizionati dalle limitazioni sopra esposte, possono assumersi quindi come termini di confronto per verificare in modo comparativo la validità della prima e della seconda procedura descritta.

Pertanto anche quest'ultimo modo di procedere non è esente da critiche, in quanto spesso le serie storiche non sempre sono continue e pertanto pongono, sia pure in minore misura, le stesse perplessità relative alla traslazione di parti dell'idrogramma. Inoltre, tale procedura, benché conduca ad una stima su base annua sicuramente più corretta, richiede tempi di elaborazione più lunghi ed un algoritmo più complesso di quanto non sia richiesto dalle prime due procedure.

Riassumendo si possono quindi definire tre metodi di calcolo del BFI. Ad essi si farà riferimento in seguito con la seguente simbologia:

- BF1: è il metodo Standard proposto da Lvovitch dove la scansione temporale delle portate ha inizio dal 1 Gennaio;
- BF2: è il metodo in cui la scansione delle portate ha inizio dal giorno in cui si è verificata la minima portata dell'anno;
- BF3: la procedura di Lvovitch viene applicata su tutto il periodo di N annate ed il *BFI* viene poi stimato separatamente anno per anno. Questo valore del *BFI* così trovato viene considerato il valore "vero" e pertanto usato come valore di confronto tra i due precedenti.

I valori del *BFI* calcolati con i tre metodi precedentemente descritti, relativamente ad alcuni bacini campione dell'Italia Centrale, permette di porre a confronto i BF1 e BF2 con il BF3. Con un approccio statistico molto semplice, si sono potuti calcolare la Deviazione Standard (DS) dei corrispondenti campioni annui del BF1 e BF2 relativamente al campione dell'ultima procedura BF3.

I risultati sono stati i seguenti:

- procedura BF1: $DS\%_{\text{medio}} = 2,34 \%$
- procedura BF2: $DS\%_{\text{medio}} = 0,5 \%$

Da ciò risulta che adottando la procedura BF2 si commetterebbe un errore medio circa 4 volte minore rispetto alla procedura BF1.

In ultima analisi la semplice modifica del punto iniziale di scansione dei dati, facendolo corrispondere con la minima portata dell'anno, già produrrebbe un effetto positivo sul calcolo del BFI, per alcuni bacini non trascurabile. Tuttavia, al fine di non perdere nessuno degli aspetti idrologicamente significativi, come la cronologia del dato, si è ritenuto più opportuno calcolare il BFI considerando l'intera serie storica di portate di ciascuna stazione (BF3). In tal modo si sono limitate al minimo sia le perdite di dati, presenti solo all'inizio del primo anno della serie storica ed alla fine dell'ultimo anno, sia le traslazioni di parti dell'idrogramma, presenti solo nel caso di annate mancanti nella serie storica elaborata.

5 INFLUENZA DEL PARAMETRO *NGRUPPO* SUL CALCOLO DEL *BFI*

La possibilità di calcolare il *BFI* sulla serie storica di dati, consente di limitare le ulteriori verifiche riguardanti l'algoritmo di calcolo alla sola scelta di *NGRUPPO*. In particolare, quando la serie storica è sufficientemente lunga, si sono potute effettuare delle semplici elaborazioni statistiche per testare la presunta indipendenza del *BFI* da *NGRUPPO*, o comunque per valutare il peso della scelta di *NGRUPPO* differenti.

A tal fine sono stati presi in considerazione i seguenti indici:

$$M = MEDIA = \frac{\sum X_i}{N}$$

$$DS = DEVIAZIONE STANDARD = \sqrt{\frac{\sum (M - X_i)^2}{N - 1}}$$

$$CV = COEFFICIENTE DI VARIAZIONE(\%) = \frac{DS}{M} 100$$

Il coefficiente di variazione *CV* è indipendente dall'ordine di grandezza e dall'unità di misura delle osservazioni ed è tanto minore quanto minore è la deviazione standard rispetto alla media, ossia quanto più limitate sono le variazioni dei termini della serie; per questo è anche chiamato precisione della serie.

Il valore del coefficiente di variazione non è sensibilmente influenzato dal numero dei termini della serie: in pratica la media di *m* coefficienti *CV* relativi ad *m* serie di *n* termini, per *n* sufficientemente grande, coincide con il *CV* dell'unica serie di *m*n* termini. In linea di larga massima con 20 ÷ 30 osservazioni si può sperare di avere un buon valore del *CV*, a meno di *CV* molto alti o di serie fortemente asimmetriche.

Per comprendere in modo più completo la dipendenza del *BFI* da un parametro apparentemente arbitrario come *NGRUPPO*, sono state effettuate una serie di elaborazioni con *NGRUPPO* = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 giorni.

I risultati, per elaborazioni condotte su alcuni bacini campione dell'Italia Centrale, mettono in evidenza alcuni aspetti fondamentali:

- al crescere di *NGRUPPO* il *BFI* diminuisce; ciò dipende dal progressivo appiattimento della curva di deflusso di base conseguente al minor numero di *TURN POINTS* selezionati. Tale comportamento è illustrato dalle figure A11, A12, A13 che rappresentano la costruzione delle curve di deflusso di base per *NGRUPPO* pari rispettivamente a 3, 5, 9 giorni.
- la deviazione standard *DS* cresce lievemente con *NGRUPPO*;
- il coefficiente di variazione *CV* del *BFI* cresce con *NGRUPPO* in modo più sensibile, esaltato dal parallelo aumento della deviazione standard e dalla diminuzione della media con *NGRUPPO*. Tale maggiore instabilità del *BFI* al

crescere di *NGRUPPO* è da attribuire alla progressiva diminuzione dell'area della curva di deflusso di base.

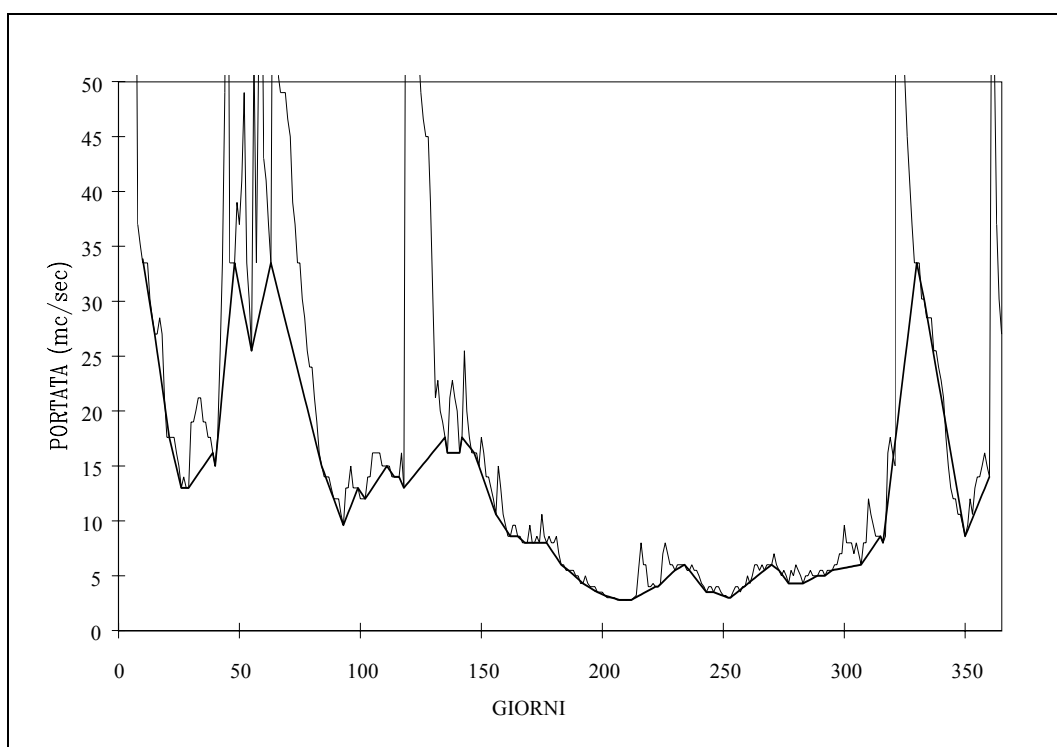


Figura A11: Curva di Deflusso di Base per *NGRUPPO* = 3 giorni .

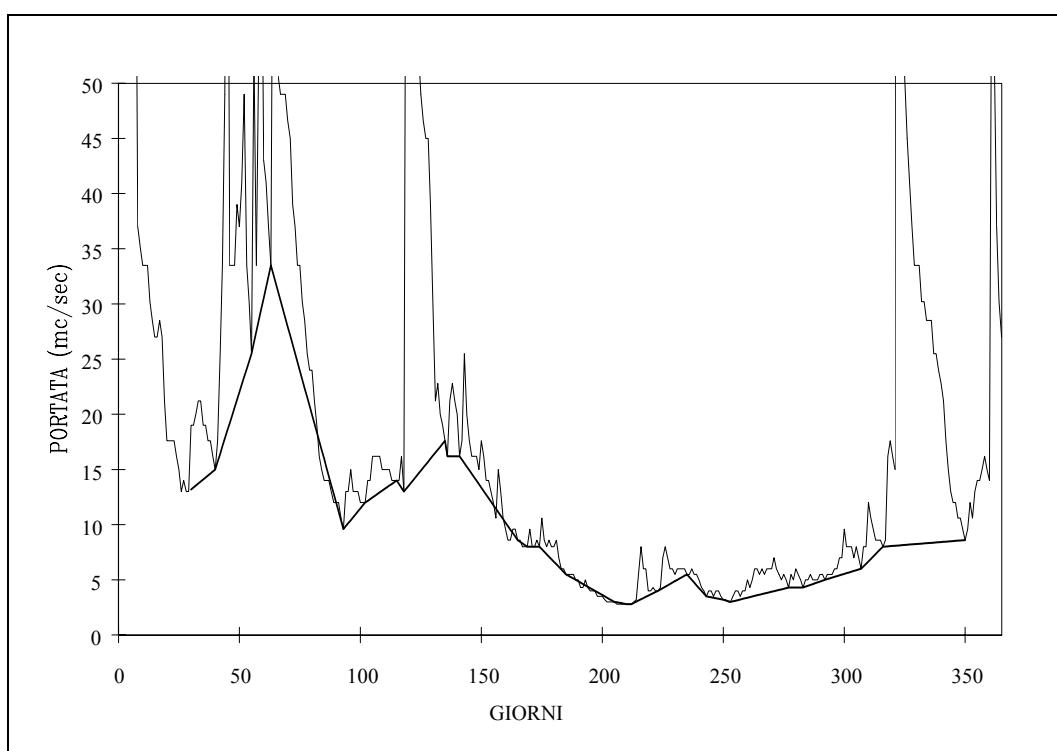


Figura A12: Curva di Deflusso di Base per *NGRUPPO* = 5 giorni .

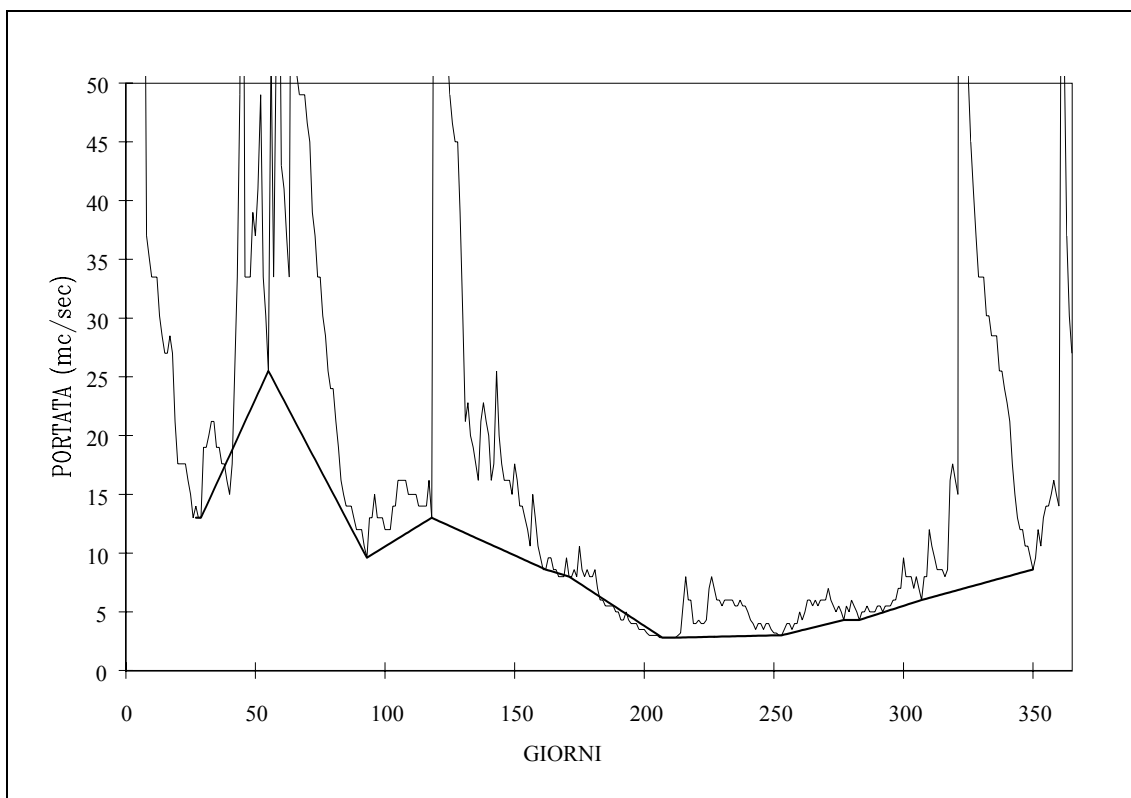


Figura A13: Curva di Deflusso di Base per $NGRUPPO = 9$ giorni .

Riguardo a eventuali tendenze evolutive sono stati tracciati i grafici del BFI in media mobile di classe 5 per $NGRUPPO$ variabile tra $4 \div 9$ (figura A14).

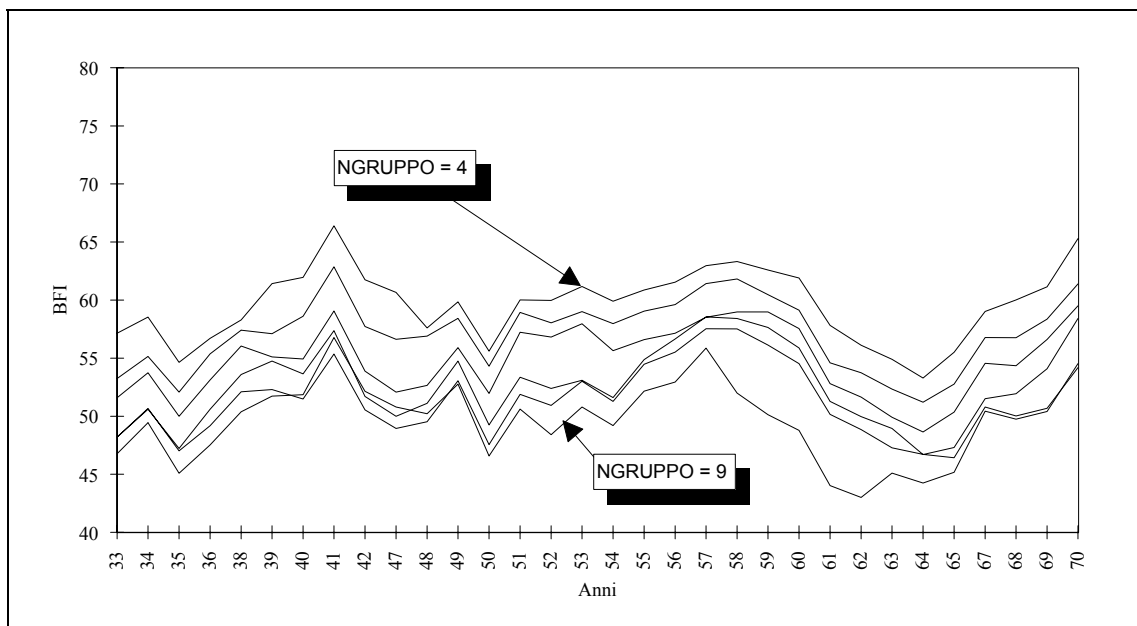


Figura A14: Variabilità del BFI , in media mobile di classe 5, con $NGRUPPO$.

L'esame di tali diagrammi evidenzia un aspetto di estremo interesse, cioè il sostanziale parallelismo delle curve medie al variare del *BFI*. Ciò fa ritenere che in linea generale il *BFI* sia indipendente, a meno di una costante, dalla scelta di *NGRUPPO*. Tra tutti i valori proposti quindi può essere adottato, per le sensibili semplificazioni numeriche che comporta, il valore di *NGRUPPO*=5, valore a cui si fa riferimento abitualmente anche in letteratura.

Tali elaborazioni hanno anche consentito di evidenziare, per taluni bacini campione, una variabilità del *BFI* nel tempo, secondo cicli relativamente ampi (10 anni), con un andamento lievemente crescente sul lungo periodo. All'interno di questo trend possono emergere delle oscillazioni stagionali la cui dipendenza potrebbe essere attribuita ad un'analogia variabilità degli afflussi.

Infatti ha fondamento ammettere che tale dipendenza esista, anche se mascherata da numerosi disturbi casuali, in quanto al crescere del volume totale di afflusso può associarsi un incremento più che proporzionale dei deflussi superficiali ed un incremento meno che proporzionale dei deflussi sotterranei.

In altre parole quando l'intensità di pioggia supera il limite di infiltrazione del suolo, il contributo di quest'ultima al rifornimento delle acque profonde rimane sostanzialmente costante, mentre aumenta significativamente il deflusso superficiale. Ne segue che, in linea generale, al crescere dell'afflusso meteorico debba diminuire il *BFI* in quanto nel rapporto

$$BFI = \frac{V_b}{V_a} 100$$

cresce più rapidamente il denominatore rispetto al numeratore.

Questa constatazione, che ha fondamento fisico, è stata riconosciuta, in alcuni casi in maniera piuttosto evidente, sovrapponendo alla curva dei *BFI* l'analogia curva in media mobile di classe 5 degli afflussi meteorici.

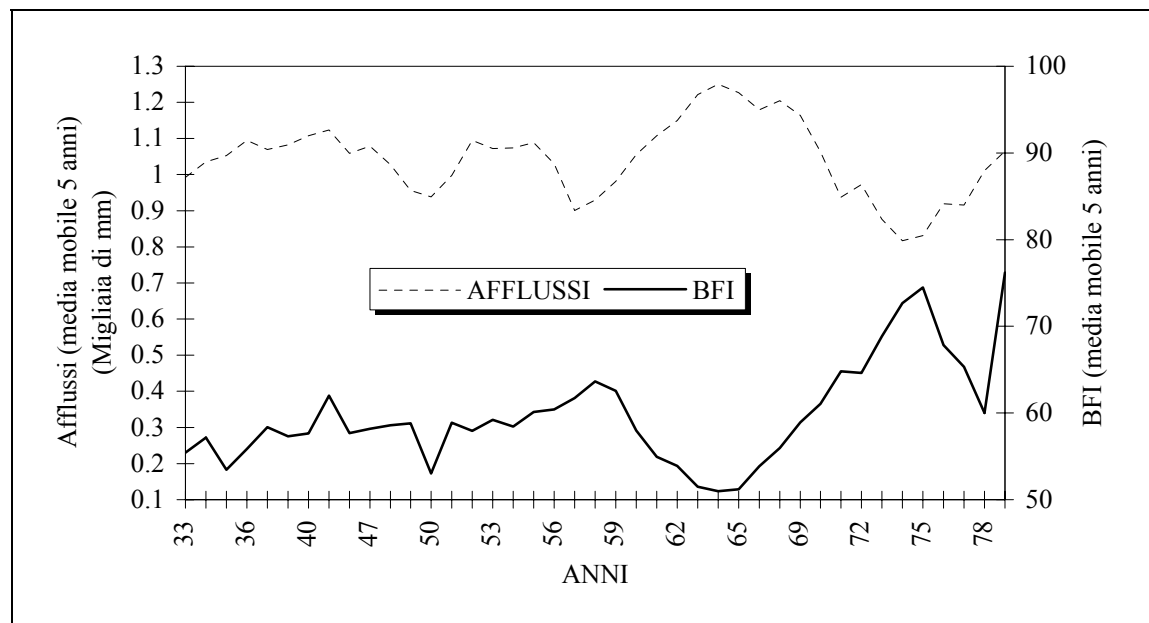


Figura A15: Confronto BFI – afflussi in media mobile di classe 5.

Si osserva che ove le piogge hanno un andamento crescente il *BFI* diminuisce e viceversa (figura A15).

Per verificare ulteriormente tale dipendenza si è ritenuto opportuno tentare una qualche correlazione tra le due grandezze pioggia e *BFI*. In prima ipotesi è stata provata una regressione di tipo lineare, che tuttavia ha evidenziato l'impossibilità operativa di correlare le due variabili.

Ciò nonostante, tale esperienza ha confermato la dipendenza inversa tra piogge e *BFI*, sia pure mascherata tra numerosissimi disturbi casuali, intuita sulla base delle considerazioni fisiche sul processo di infiltrazione appena esposte.

6 POSSIBILI DIPENDENZE TRA *BFI* E CARATTERISTICHE IDROGEOMORFOLOGICHE

Sulla base delle precedenti considerazioni, si può ritenere il *BFI* sostanzialmente indipendente dal parametro *NGRUPPO*, elemento strettamente legato alla tecnica di disaggregazione dei deflussi.

Inoltre si può anche non considerare la dipendenza tra il *BFI* e le piogge annuali, stante l'impossibilità analitica, verificata anche in bibliografia, di esplicitare una legge di dipendenza tra le due variabili.

Rimane, pertanto, da verificare l'eventuale dipendenza tra il *BFI* ed alcuni parametri geomorfologici ed idrogeologici.

In particolare, tra i numerosi parametri geomorfologici che possono essere presi in esame, sono stati considerati quelli che si ritiene possono influire più direttamente sul *BFI*:

- superficie del bacino
- pendenza media
- caratteristiche idrogeologiche del bacino.

A parità di complesso idrogeologico, l'aumento della superficie tende a far crescere lievemente il *BFI*. Infatti aumenta progressivamente la capacità di laminazione degli acquiferi legata direttamente al coefficiente di immagazzinamento, tale tendenza peraltro è spesso mascherata da numerose altre componenti.

Nella figura A16 sono rappresentati i risultati di una regressione *BFI – AREA* per circa 60 bacini sottesi da altrettante stazioni del Servizio Idrografico Italiano relativi agli Uffici di Roma, Bologna, Napoli, Pisa e Pescara. La figura non evidenzia alcuna dipendenza tra le due variabili, mantenendosi orizzontale la retta di regressione.

La pendenza media del bacino tende ad esaltare i deflussi superficiali in quanto fa crescere la velocità di ruscellamento riducendo i tempi di permanenza e quindi di infiltrazione dell'acqua nel terreno. Il *BFI* dovrebbe diminuire con tale indice

geomorfologico. Anche in questo caso però non sono state evidenziate particolari relazioni di dipendenza.

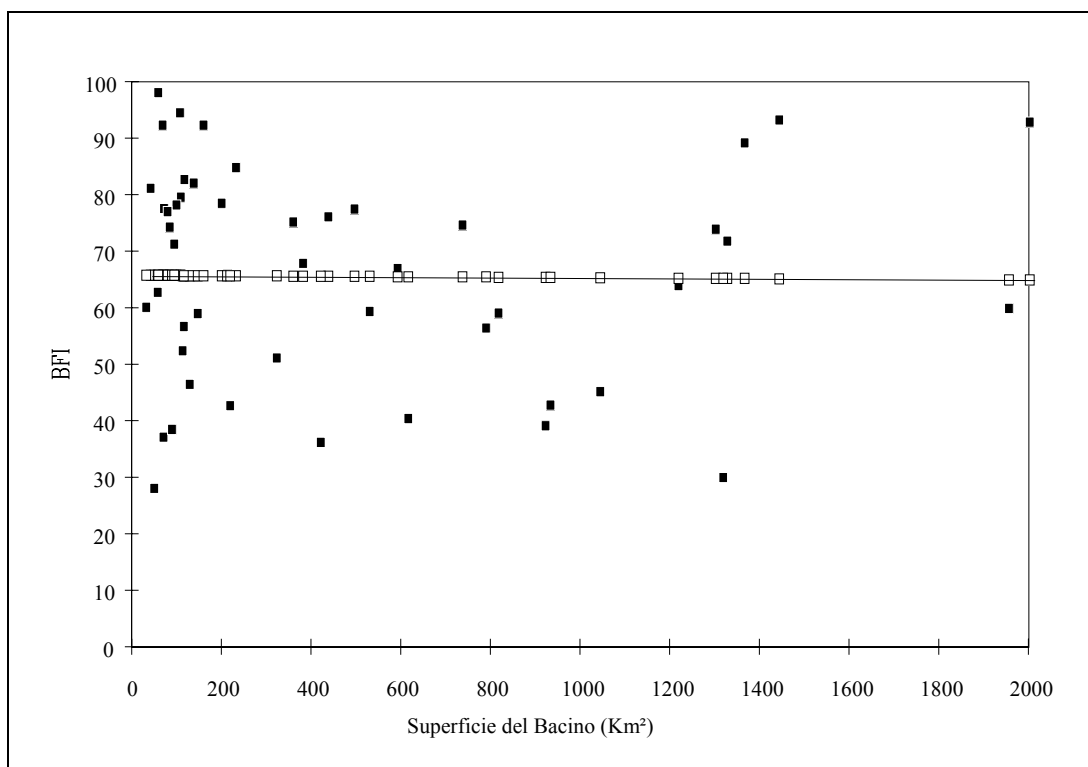


Figura A16: Regressione BFI – AREA.

Per quanto riguarda invece la dipendenza del *BFI* con le caratteristiche idrogeologiche di bacino, questa si è dimostrata molto stretta, come si vedrà in modo dettagliato nel prossimo paragrafo.

7 LA DEFINIZIONE DEL LEGAME BFI - IDROGEOLOGIA

La definizione del legame BFI-Idrogeologia prevede la sovrapposizione di due strati di informazioni, il primo il valore del BFI calcolato sulla serie storica delle portate naturali ricostruite nelle sezioni di misura idrometrica (informazione puntuale), il secondo la caratterizzazione idrogeologica del corrispondente bacino idrografico (informazione areale). In particolare questo secondo dato prevede di conoscere la suddivisione dell'intera area del bacino tra le varie formazioni presenti o comunque tra quelle ritenute significative, operazione che richiede la preventiva delimitazione del bacino idrografico e la successiva sovrapposizione del dato geologico o idrogeologico.

Tale procedura può essere condotta su tutti i bacini, operando preferibilmente con le portate naturali e tenendo comunque presente nell'interpretazione dei dati i seguenti criteri:

- il numero di annate disponibili sia almeno di 6, affinché si possa calcolare un valore medio del *BFI* che sia sufficientemente aderente alla realtà, cioè che non risenta di annate con deflussi particolari; inoltre, nei limiti del possibile, si cerca di evitare i bacini con serie storiche molto discontinue;
- le principali formazioni idrogeologiche caratteristiche dell'area studiata siano rappresentate, con incidenze percentuali variabili, in tutti i bacini strumentati;
- il regime di deflusso non sia stato influenzato da invasi importanti o da altre opere idrauliche nel corso della registrazione dei dati idrometrici;
- i bacini siano poco antropizzati, in modo che i deflussi ricostruiti siano quanto più possibile vicini a quelli naturali.

Lo scopo finale dell'analisi di questo tipo di informazioni è quello di risalire al legame *BFI*-Idrogeologia, legame che si deve esplicitare attraverso la definizione di un valore, o meglio di un campo di variazione di valori, del *BFI* per ogni formazione geologica o idrogeologica presente nell'area o comunque ritenuta significativa.

In pratica, la possibilità di stabilire delle corrispondenze biunivoche tra *BFI* e caratteristiche idrogeologiche presuppone che ad ogni formazione omogenea corrisponda un valore di *BFI* contenuto in un campo di variazione sufficientemente limitato. Tale problema può essere impostato da un punto di vista matematico in forma matriciale, sfruttando in questo modo le potenzialità di risoluzione degli usuali strumenti di calcolo presenti nei fogli elettronici o comunque in software di facile reperimento ed utilizzo.

Ciò premesso, considerando n bacini ed m formazioni geologiche, si pone:

$$BFI_{est,j} = \frac{A_{j,1}}{A_{tot,j}} BFI_{frm,1} + \frac{A_{j,2}}{A_{tot,j}} BFI_{frm,2} + \dots + \frac{A_{j,m}}{A_{tot,j}} BFI_{frm,m} \quad (j = 1,2,\dots,n)$$

ed indicato con

$$a_{j,i} = \frac{A_{j,i}}{A_{tot,j}} \quad (i = 1,\dots,m)$$

si ottiene

$$BFI_{est,j} = a_{j,1} BFI_{frm,1} + a_{j,2} BFI_{frm,2} + \dots + a_{j,m} BFI_{frm,m} = \sum_{i=1}^m a_{j,i} BFI_{frm,i} \quad (j = 1,2,\dots,n)$$

Definita con A la matrice dei coefficienti ($a_{j,i}$ = j -esima area percentuale della i -esima formazione)

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,m} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n,1} & \dots & a_{n,m} \end{pmatrix}$$

e definito con V il vettore colonna delle incognite ($BFI_{frm,i}$ = i -esimo BFI di formazione)

$$V = \begin{pmatrix} BFI_{frm,1} \\ \dots \\ \dots \\ BFI_{frm,m} \end{pmatrix}$$

il prodotto delle matrici $A * V$ fornisce il vettore colonna degli n BFI_{est}

$$A * V = \begin{pmatrix} a_{1,1}BFI_{frm,1} + a_{1,2}BFI_{frm,2} + \dots + a_{1,m}BFI_{frm,m} \\ \dots \\ \dots \\ a_{n,1}BFI_{frm,1} + a_{n,2}BFI_{frm,2} + \dots + a_{n,m}BFI_{frm,m} \end{pmatrix}$$

Sia infine Y il vettore colonna dei termini noti ($BFI_{obs,j}$ = j -esimo BFI osservato)

$$Y = \begin{pmatrix} BFI_{obs,1} \\ \dots \\ \dots \\ BFI_{obs,n} \end{pmatrix}$$

il vettore colonna degli scarti sarà dato dalla matrice:

$$S = Y - A * V = \begin{pmatrix} BFI_{obs,1} - BFI_{est,1} \\ \dots \\ \dots \\ BFI_{obs,n} - BFI_{obs,n} \end{pmatrix}$$

La soluzione in termini di V è stata ottenuta minimizzando la somma dei quadrati degli scarti tra i valori stimati e quelli osservati del BFI .

I valori così ottenuti rappresentano i BFI di formazione, considerati come valori medi, in quanto alcuni fattori peculiari di ciascun bacino influenzano il valore del BFI di formazione, che perciò potrà variare all'interno di un certo intervallo. Per tale ragione ha poco significato associare un valore unico del BFI ad un determinato complesso idrogeologico.

L'ampiezza di tale intervallo dipende dalla precisione della stima dei BFI di formazione. Questa può essere valutata mediante una regressione lineare multipla tra i valori dei BFI osservati ed i valori delle aree percentuali delle formazioni, nella quale i coefficienti di regressione rappresentano proprio i BFI_{frm} di formazione incogniti:

$$BFI_{obs,j} = a_{1,j} BFI_{frm,1} + a_{2,j} BFI_{frm,2} + \dots + a_{m,j} BFI_{frm,m} \quad (j = 1, \dots, n)$$

Il valore dei coefficienti di correlazione $BFI_{frm,i}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) ed i valori della deviazione standard nella stima di ogni coefficiente danno una indicazione delle precisione delle stima effettuata.

In conclusione l'intervallo di variazione di ogni BFI di formazione è dato dal valore trovato con l'ottimizzazione più o meno l'errore standard associato al coefficiente della regressione.

La precisione della stima del BFI sulla base della formazioni geologiche o idrogeologiche è in genere molto buona. In particolare esperienze condotte su bacini campione dell'Italia Centrale, calcolando lo scarto percentuale medio sulle stime del BFI per circa 60 bacini strumentati ha dato come risultato un valore pari al 10,3 %.

8 IL BFI COME INDICATORE DI MAGRA

Il problema della stima degli indicatori di magra nelle sezioni non-strumentate è già stato affrontato dall'Istituto di Idrologia, Crowmarsh Gifford, di Wallingford nel 1980 e nel successivo aggiornamento del 2000, il quale, nel rapporto Low Flow Studies, ha proposto una serie di relazioni per la stima dei principali indici di magra, basate sulle caratteristiche idro-geomorfologiche di bacino.

Tra i molti indicatori particolare rilievo riveste il $Q_{95}(10)$ che rappresenta la portata media di 10 giorni con durata pari al 95% ed il $Q_{7,10}$ che rappresenta la portata di 7 giorni con tempo di ritorno di 10 anni. Ciascuno di tali indici ed in particolare il $Q_{7,10}$ può essere condizionato dalle seguenti grandezze:

Area del bacino: il parametro principale per caratterizzare la morfologia di un bacino è costituito dall'area ($AREA$). A parità di tutti gli altri fattori, quanto più è grande il bacino tanto più è grande il Deflusso di Base. Tuttavia poiché gli indici di magra sono di norma standardizzati, dividendoli per il deflusso medio nel periodo (ADF), l'influenza dell'area del bacino sul deflusso di base non è molto evidente. Oltre all'area può essere assunta la lunghezza dell'asta principale L per caratterizzare le dimensioni del bacino. Il suo impiego è peraltro secondario perché spesso la lunghezza L è ben correlata alla superficie di bacino.

Clima del Bacino: gli unici indicatori del clima facilmente reperibili sono le precipitazioni. In prima ipotesi è stato suggerito l'uso di un indice di siccità, tuttavia i risultati ottenuti sono stati praticamente identici a quelli ricavati considerando semplicemente il valore medio delle precipitazioni annuali. Pertanto

si è preferito l'uso di quest'ultimo, che viene indicato con *SAAR* (ovvero Standard Annual Average Rainfall, con notazione anglosassone).

Pendenza del bacino: L'influenza della pendenza sulle magre non è ben delineata. In alcuni studi è stato evidenziato che il suo effetto si confonde con quello di altre variabili.

Densità di drenaggio: La densità di drenaggio è misurata come il numero di confluenze per chilometro quadrato. E' noto che una elevata densità di drenaggio incrementa la velocità di risposta tra afflussi e deflussi, pertanto ad essa può corrispondere una riduzione del deflusso di base. Al contrario, si potrebbe argomentare che una elevata densità di drenaggio incrementa il drenaggio effettivo e quindi incrementa il deflusso di base.

Uso del terreno: La percentuale di area urbana può modificare i deflussi; tale influenza può essere attenuata escludendo i bacini densamente urbanizzati dal campione utilizzato nelle procedure di stima. Infatti, la presenza di una città riduce l'infiltrazione negli strati profondi del terreno.

Geologia: Per quanto riguarda la geologia del bacino appare chiaro che durante i periodi di magra il deflusso è condizionato dalla presenza nel bacino di rocce permeabili, materiali detritici ed in generale di materiali con un alto grado di accumulo di acqua; tale proprietà può essere descritta quantitativamente attraverso l'indice di deflusso di base, *BFI*, che sinteticamente può essere pensato come la misura di quella parte di deflusso che proviene dalle falde sotterranee. I dettagli riguardo al calcolo del *BFI* ed al suo significato sono già stati analizzati nei precedenti paragrafi ai quali si rimanda.

Alcune semplici elaborazioni hanno dimostrato la stretta correlazione tra gli indicatori di magra citati ed il *BFI*, aspetto che sarà approfondito in tutte le procedure di regionalizzazione. Tale legame, tuttavia, consente già di interpretare lo stesso *BFI* come un indicatore di magra, in quanto in presenza di bacini con bassi valori di *BFI* (≤ 40 circa) si devono prevedere sensibili riduzioni di portata in condizioni di assenza prolungata di precipitazioni, al contrario elevati valori di *BFI* (≥ 80 circa) danno nel complesso garanzia di buone portate anche in condizioni di magra.

9 SINTESI SUL CALCOLO E SULLE CARATTERISTICHE DEL *BFI*

Il calcolo e le proprietà dell'Indice di Deflusso di Base (*BFI*) possono essere riassunti nei seguenti punti:

- il *BFI* può essere calcolato su base idrologica, disaggregando i deflussi profondi da quelli totali, secondo la procedura di Lvovitch, per la quale sono stati tuttavia adottate delle modifiche originali che consentono una migliore aderenza della procedura stessa con gli aspetti fisici del fenomeno;

- il *BFI* così calcolato si è dimostrato essere sensibilmente costante nel tempo, tanto da poter essere assunto come caratteristica invariante di bacino;
- è stata evidenziata una corrispondenza diretta tra formazioni geologiche o idrogeologiche omogenee e *BFI*;
- stante tale corrispondenza è stata riconosciuta la possibilità di stimare il *BFI* anche in sezioni non-strumentate, tale stima richiede semplicemente il calcolo della media ponderata rispetto alle aree dei *BFI* delle formazioni costituenti il bacino;
- il *BFI* può essere considerato un indice di magra, infatti al crescere del *BFI* aumenta la regolarità dei deflussi e si attenuano gli eventi di magra;
- in conseguenza di quanto sopra è chiaramente possibile considerare il *BFI* come strettamente correlato con i più noti indicatori di magra, pertanto il *BFI* contribuirà a definire, nel processo di regionalizzazione, un'efficace criterio di stima degli indicatori di magra nei bacini non-strumentati.

10 L'INDICE DEL DEFLUSSO DI BASE NEL BACINO DEL FIUME ARNO

La metodologia precedentemente descritta è stata applicata alle stazioni presenti nel bacino del Fiume Arno, procedendo inizialmente al calcolo del *BFI* sia sulle serie storiche delle portate misurate, sia sulle corrispondenti serie storiche delle portate naturali ricostruite.

Successivamente, la procedura di stima del *BFI* è basata sulla conoscenza delle caratteristiche geologiche o idrogeologiche del bacino in esame, caratteristiche che debbono essere note in termini di rappresentazione cartografica. Infatti solo in tal modo sarà possibile sovrapporre il bacino idrografico chiuso alla sezione di interesse con le formazioni geologiche presenti, al fine di utilizzare la stima del legame *BFI*-geologia per la stima dello specifico parametro *BFI*.

Pertanto le fasi operative richieste possono essere riassunte nei seguenti punti:

- calcolo del *BFI* sulle serie storiche;
- studio della cartografia tematica geologica o idrogeologica;
- calcolo della ripartizione delle varie formazioni geologiche nell'ambito dei bacini idrografici strumentati di cui è noto il *BFI*;
- conseguente studio del legame *BFI*-geologia;
- stima del *BFI* dalla geologia.

10.1 Il BFI nelle stazioni di misura

L'elaborazione del BFI con le serie storiche delle stazioni di misura idrometrica, secondo il metodo di Lvovitch modificato, ha permesso di avere un quadro dei valori dell'indice del deflusso di base sull'intero bacino del Fiume Arno. Al momento l'elaborazione è stata condotta per tutte le stazioni, senza alcun limite riferito all'ampiezza della serie storica ed all'attendibilità dei valori di portata, soprattutto nel caso di alcune stazioni in automatico. A tale proposito si ricorda che l'archiviazione del dato di portata misurata è stata condotta scegliendo di non introdurre le annate incomplete, mentre sono stati inseriti i dati definiti come ricostruiti.

Il quadro che ne segue appare già significativo (figura A17), in particolare il confronto tra BFI misurati e BFI naturali evidenzia delle differenze nel complesso irrilevanti. Tale aspetto potrebbe essere dovuto o ad un archivio dei prelievi non particolarmente dettagliato, oppure ad un peso effettivo degli stessi piuttosto relativo.

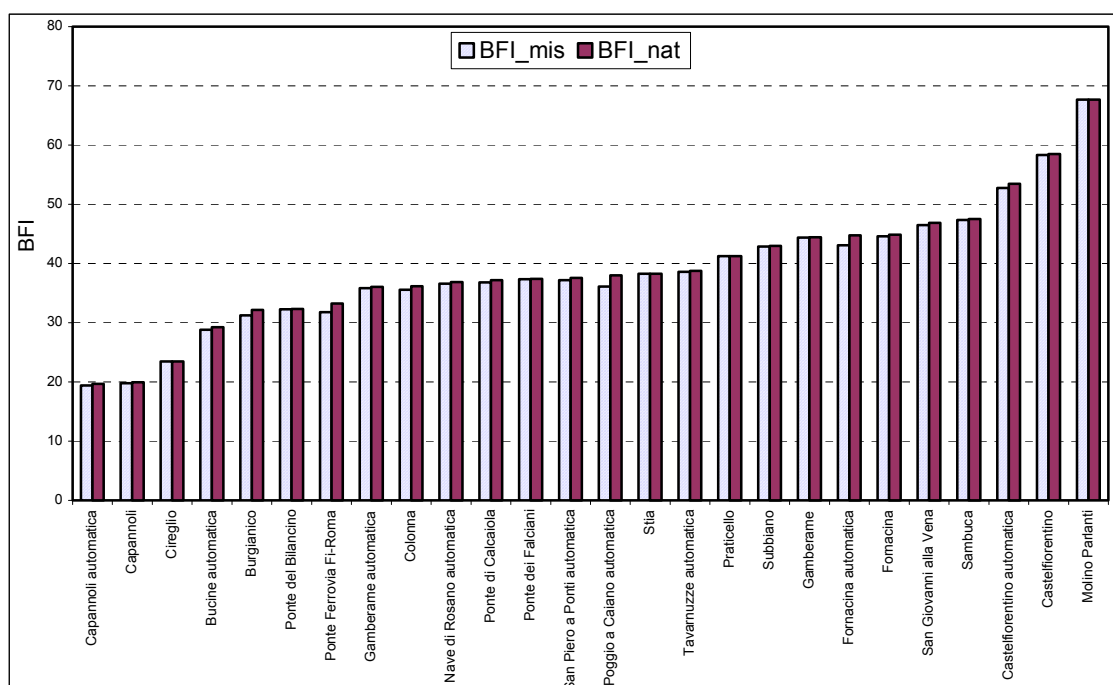


Figura A17: Valori del BFI calcolato nelle stazioni di misura del Bacino dell'Arno.

A fronte di un quadro dei prelievi che risulta sicuramente sottostimato, si ritiene tuttavia che, alla luce dei risultati e delle caratteristiche di deflusso di base dei corsi d'acqua esaminati, la procedura proposta per il calcolo del BFI risente in maniera abbastanza relativa della trasformazione in portate naturali, in ragione soprattutto della modesta entità del deflusso di base. Caratteristica, quest'ultima, che emerge in maniera certa indipendentemente dalla tipologia di portate elaborate.

Infatti, esaminando in maniera più dettagliata i valori di BFI elaborati, si può osservare come il dato sia in genere compreso nel range 30÷50%, con l'eccezione delle stazioni di Cireglio sul Vincio e Capannoli sull'Era, che presentano valori significativamente più bassi, mentre le stazioni di Molino Parlanti sul Candalla e Castelfiorentino sull'Elsa si distinguono per valori significativamente più elevati.

Tuttavia, in quest'ultimo caso si nota come l'elaborazione dei dati più recenti della stazione in automatico riporta ad un valore di BFI più vicino alla norma, anche se con una serie storica di elaborazione più corta ma comunque già significativa.

Nel complesso circa il 60% delle stazioni di misura presentano un $BFI < 40\%$, mentre alla stazione di San Giovanni della Vena, che si può considerare di chiusura, si osserva un $BFI = 46\%$, con un valore medio di tutte le serie storiche elaborate che si attesta a $BFI = 39\%$. Valori che sintetizzano in maniera chiara le caratteristiche idrogeologiche generali del bacino, che appaiono in sintonia con quanto scritto nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, laddove si parla di "Lineamenti di idrogeologia".

Infine, un'analisi della situazione sulle stazioni della sola asta principale del Fiume Arno (figura A18) conferma nel complesso le considerazioni fatte in precedenza, soprattutto in relazione al range di variazione ed alla differenza tra valori misurati e naturali, in questo caso anche in relazione all'incremento del bacino idrografico. Mentre, al momento, non si evidenzia alcuna tendenza particolare del BFI con l'aumentare del bacino scolante, elemento che confermerebbe la prevalente dipendenza dell'indice di deflusso di base dalla geologia.

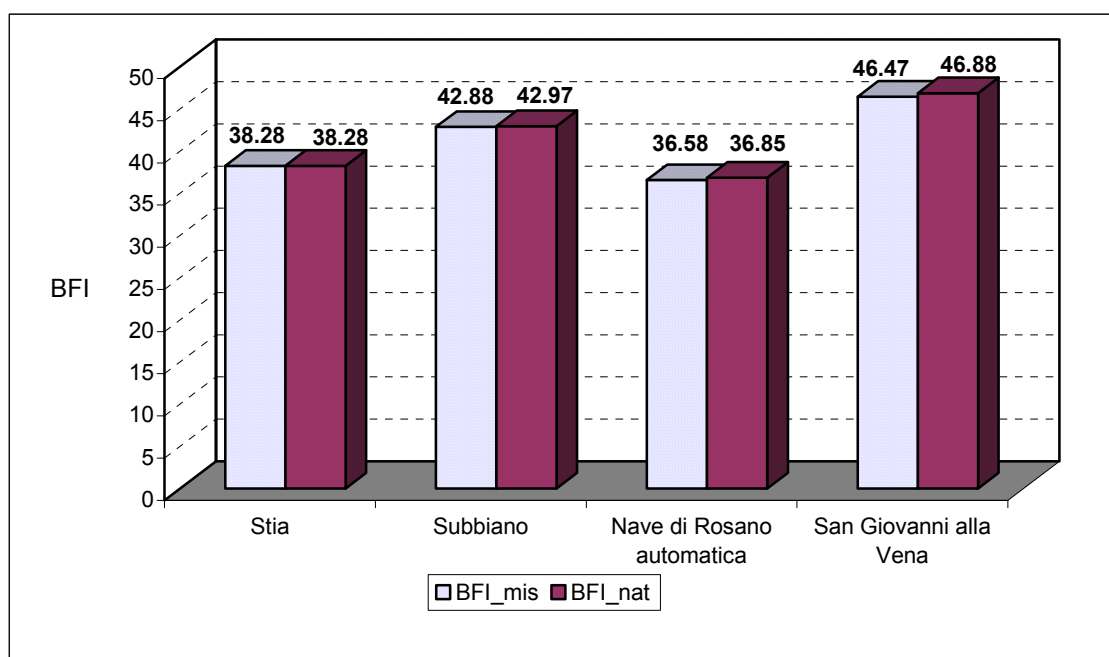


Figura A18: Valori del BFI nelle stazioni di misura sul Fiume Arno.

10.2 La cartografia geologica nel bacino del Fiume Arno e la sua applicazione ai bacini delle stazioni di misura

La base cartografica di riferimento è rappresentata dai fogli in scala 1:100.000 realizzati dal Servizio Geologico Nazionale, con una omogeneizzazione dei tematismi sull'intero bacino dell'Arno.

La cartografia tematica, fornita in formato digitale dall'Autorità di Bacino, è stata sovrapposta alla cartografia del reticolo idrografico con gli strati informativi presenti nel Hydro-Data-Model, in particolare il layer "CATCHMENT", unitamente alla georeferenziazione delle stazioni di misura del Servizio Idrografico.

Tale procedura ha permesso di quantificare la distribuzione delle varie formazioni geologiche nell'ambito dei vari bacini idrografici relativi alle stazioni di misura (allegato A2).

In particolare, a fronte di una legenda della cartografia tematica in cui erano presenti 119 tipi di descrizione delle varie formazioni geologiche (allegato A1), si è osservato che 19 di queste non risultano presenti nel bacino, mentre ben 48 sono presenti con percentuali massime minori del 1%, quindi quasi il 60% delle formazioni in legenda hanno un peso quasi insignificante nella caratterizzazione geologica dei bacini.

Il rimanente 40% circa delle formazioni risulta comunque abbastanza distribuito sulle superfici, infatti solo per le stazioni di Praticello sul Bisenzio, Cireglio sul Vinci e Colonna sul Nievole è possibile individuare una formazione che potremmo definire dominante (area > 60%). Tale situazione, che è possibile esaminare in dettaglio nell'allegato A2, non ha certo facilitato il successivo studio del legame BFI-geologia.

Si osserva, infine, che la fase di sovrapposizione della cartografia tematica con il layer "CATCHMENT" ha portato al calcolo della superficie dei bacini idrografici chiusi ad ogni stazione di misura attraverso l'uso della cartografia propria del "Sistema delle Acque Superficiali". Nella tabella A1 è riportato un confronto tra la superficie dichiarata dal Servizio Idrografico Italiano e quella di calcolo.

Ricordando che la delimitazione del catchment di ogni tronco è stata realizzata automaticamente sfruttando probabilmente l'informazione derivante da un DEM, nel complesso le differenze non appaiono così rilevanti. In particolare, gli scostamenti non superano mai un valore percentuale del 7.7 %, con l'unica eccezione della stazione di Molino Parlanti sul Candalla, che tuttavia rientra tra quelle che sono state ubicate in fase di studio non essendo nota la georeferenziazione (vedasi Allegato 2 alla relazione generale), pertanto è probabile che i due siti siano effettivamente posizionati diversamente. Inoltre nel 65% circa delle stazioni la superficie calcolata sovrastima quella del S.I.I., anche se alla stazione finale di S. Giovanni alla Vena si ha una sottostima di 24.83 Km², pari allo 0.30 %.

Tale procedura di calcolo delle superfici verrà largamente utilizzata nella fase di stima delle caratteristiche di tutte le aste (vedasi cartella ASTE della pagina web), tuttavia in tale ambito l'omogeneità di calcolo per tutti i tronchi, siano essi provvisti di stazione di misura o meno, rende di fatto influente l'eventuale errore sulla superficie calcolata o su eventuali parametri derivati.

Tabella A1: confronto tra le superfici dei bacini idrografici delle stazioni di misura.

Nome stazione	Fiume	Superficie S.I.I.	Calcolata
		[Km ²]	[Km ²]
Bucine automatica	Ambra	<i>N.D.</i>	160.11
Nave di Rosano automatica	Arno	4124.98	4090.43
San Giovanni alla Vena	Arno	8202.94	8178.11
Stia	Arno	60.2	61.10
Subbiano	Arno	704.62	751.62
Gamberame	Bisenzio	150.83	151.83
Gamberame automatica	Bisenzio	150.83	151.83
Praticello	Bisenzio	59.62	57.90
San Piero a Ponti automatica	Bisenzio	<i>N.D.</i>	253.64
Burgianico	Brana	13	12.64
Ponte Ferrovia FI-Roma	Canale della Chiana	1285.18	1274.74
Molino Parlanti	Candalla	0.61	2.65
Castelfiorentino	Elsa	798.31	780.24
Castelfiorentino automatica	Elsa	798.31	780.24
Capannoli	Era	335.31	337.15
Capannoli automatica	Era	335.31	337.15
Ponte dei Falciani	Greve	116.06	119.94
Tavernuzze automatica	Greve	<i>N.D.</i>	135.23
Colonna	Nievole	39.34	37.84
Poggio a Caiano automatica	Ombrone	<i>N.D.</i>	443.45
Ponte di Calcaiola	Ombrone	31	31.15
Sambuca	Pesa	113.28	119.23
Fornacina	Sieve	809.13	823.82
Fornacina automatica	Sieve	809.13	823.82
Ponte del Bilancino	Sieve	150.42	150.78
Cireglio	Vincio	1.44	1.55

10.3 Il legame BFI-geologia nel bacino del Fiume Arno

Una volta noti i valori del BFI calcolato nelle stazioni di misura e l'incidenza superficiale delle varie formazioni geologiche presenti nell'area del bacino, si è passati a studiare il legame BFI-geologia, con l'obiettivo di attribuire a ciascuna formazione geologica un valore caratteristico di BFI ed un corrispondente range di valori possibili.

Da un punto di vista teorico l'approccio al problema è stato esaminato nel paragrafo 7, tuttavia l'elevato numero di formazioni geologiche presenti, la difficoltà nel ricercare possibili aggregazioni in funzione delle indicazioni qualitative sulla permeabilità (solo quattro classi, alta, medio alta, media, bassa), la conseguente estrema frammentazione nella suddivisione delle aree tra le varie formazioni (solo in quattro bacini il numero di formazioni presenti è ≤ 5), ha portato a dover fare una attenta

valutazione del risultato strettamente matematico, con la necessità di riformulare varie volte il problema, imponendo dei vincoli in relazione a risultati inattendibile per dei valori di BFI attribuiti a specifiche formazioni (valori troppo alti per formazioni a bassa permeabilità e viceversa).

Nel complesso la metodologia proposta ha mostrato una certa instabilità nella ricerca del risultato, problema che può essere risolto con l'imposizione di un numero sempre maggiori di vincoli sul campo di variabilità del BFI da attribuire a certe formazioni, oppure proponendo una riduzione del numero di formazioni geologiche presenti, sulla base di aggregazioni per affinità geologiche, idrogeologiche o semplicemente eliminando le formazioni ritenute meno significative.

Al momento si è preferito adottare il primo criterio mantenendo inalterata la legenda complessiva della geologia, legenda riportata nell'allegato A3 con i relativi valori di BFI, sia in termini di valore di BFI di formazione utilizzato nel calcolo del BFI stimato, sia in termini di range di possibile variazione dello stesso BFI di formazione, quest'ultimo scaturito proprio dalle varie riformulazioni matematiche del problema. Nella seconda parte dello stesso allegato A3 le formazioni sono state ordinate per valori di BFI crescenti, in modo tale da rendere più semplice un confronto con le classi di permeabilità. Quest'ultima indicazione, infatti, rappresenta l'informazione più esplicita con la quale si è tentato di imporre dei vincoli alle varie riformulazioni del processo di ottimizzazione.

In sintesi, il risultato ottenuto oscilla tra formazioni di tipo argilloso, con $BFI=15\%$ come valore minimo e range $14 < BFI < 20$, e formazioni di tipo calcareo, con $BFI=70\%$ come valore massimo e range $65 < BFI < 75$. Il tutto può essere anche riassunto in tre grandi classi che risultano sostanzialmente congruenti con la suddivisione in permeabilità bassa, media ed alta fornita nella cartografia geologica del Bacino del Fiume Arno (tabella A2).

Tabella A2: Relazione tra classi di permeabilità e BFI.

Classe permeabilità	BFI	Note
Bassa	$BFI < 35$	Gran parte delle formazioni a bassa permeabilità con alcune a permeabilità media
Media	$35 \leq BFI < 50$	Gran parte delle formazioni a media permeabilità con alcune a permeabilità bassa ed una a permeabilità alta.
Alta	$BFI \geq 50$	Gran parte delle formazioni ad alta permeabilità con alcune a permeabilità media ed una a permeabilità medio-alta.

10.4 Stima del BFI dalla geologia

L'ultima fase è rappresentata dalla stima dei valori del BFI, per tutti i 26 bacini rappresentati dalle stazioni di misura, utilizzando la ripartizione della superficie del bacino tra le varie formazioni geologiche ed i valori di BFI caratteristici per le varie formazioni.

In pratica l'applicazione delle seguente relazione

$$BFI_{est,j} = \frac{A_{j,1}}{A_{tot,j}} \cdot BFI_{frm,1} + \frac{A_{j,2}}{A_{tot,j}} \cdot BFI_{frm,2} + \dots + \frac{A_{j,119}}{A_{tot,j}} \cdot BFI_{frm,119} \quad (j = 1,2,\dots,26)$$

permette di stimare i valori di BFI, valori riportati nella tabella A3 e confrontati con i corrispondenti valori derivanti dal calcolo sulle portate misurate e sulle portate naturali.

Tabella A3: Confronto BFI calcolati (misurati e naturali) e BFI stimati.

Stazione	Fiume	BFI_mis	BFI_nat	BFI_stim	Scarto %
Bucine automatica	Ambra	28.80	29.23	31.76	8.7
Stia	Arno	38.28	38.28	36.72	4.1
Subbiano	Arno	42.88	42.97	38.66	10.0
Nave di Rosano automatica	Arno	36.58	36.85	39.78	8.0
San Giovanni alla Vena	Arno	46.47	46.88	42.01	10.4
Praticello	Bisenzio	41.26	41.26	37.03	10.3
Gamberame	Bisenzio	44.39	44.45	39.07	12.1
Gamberame automatica	Bisenzio	35.84	36.03	39.07	8.4
San Piero a Ponti automatica	Bisenzio	37.17	37.57	43.35	15.4
Burgianico	Brana	31.23	32.17	39.11	21.6
Ponte Ferrovia Fi-Roma	Canale della Chiana	31.76	33.25	40.90	23.0
Molino Parlanti	Candalla	67.69	67.69	50.10	26.0
Castelfiorentino	Elsa	58.34	58.48	49.69	15.0
Castelfiorentino automatica	Elsa	52.73	53.48	49.69	7.1
Capannoli	Era	19.79	19.96	32.01	60.4
Capannoli automatica	Era	19.42	19.66	32.01	62.8
Ponte dei Falciani	Greve	37.37	37.43	35.62	4.8
Tavarnuzze automatica	Greve	38.61	38.76	35.79	7.7
Colonna	Nievole	35.57	36.15	32.92	8.9
Poggio a Caiano automatica	Ombrone	36.11	38.01	44.76	17.8
Ponte di Calcaiola	Ombrone Pistoiese	36.80	37.20	39.11	5.1
Sambuca	Pesa	47.37	47.52	40.66	14.4
Ponte del Bilancino	Sieve	32.26	32.32	37.03	14.6
Fornacina	Sieve	44.60	44.85	40.40	9.9
Fornacina automatica	Sieve	43.08	44.75	40.40	9.7
Cireglio	Vincio	23.47	23.47	27.30	16.3

Da questi risultati si può osservare che solo in quattro stazioni l'errore percentuale supera il 20%, di cui solo nel caso delle due stazioni di Capannoli l'errore si presenta in maniera rilevante, mentre nelle rimanenti stazioni (85% circa del campione) l'errore si contiene ampiamente al di sotto del 20%, con una media del 15.86% che scende al 12.1% senza i due valori di Capannoli. Per quanto riguarda la variabilità complessiva del BFI nel bacino del Fiume Arno (tabella A4) i valori stimati riducono l'ampiezza del range di variazione, sia nel valore minimo (dovuto comunque alla stazione di

Capannoli), sia nel valore massimo, mantenendo invece praticamente invariato il valore medio.

Tabella A4: Dati di sintesi sul confronto BFI calcolati e BFI stimati.

	BFI_mis	BFI_nat	BFI_stim
Minimo	19.42	19.66	27.30
Massimo	67.69	67.69	50.10
Medio	38.76	39.18	39.04

Nel complesso si può ritenere che la procedura di stima del BFI sia ampiamente attendibile, in considerazione dell'ampiezza del campione di formazioni geologiche prese in considerazione e delle limitate informazioni sull'idrogeologia, che sono circoscritte ad una indicazione di massima sulla classe di permeabilità.

Per quanto riguarda la stazione di Capannoli l'esame delle formazioni geologiche presenti nel bacino conferma una prevalenza di formazioni argillose (circa il 51%), che in parte viene compensata da formazioni alluvionali e detritiche (circa il 23%). La presenza di queste ultime formazioni è piuttosto frequente e richiederebbe delle valutazioni specifiche, caso per caso, sul loro peso, in virtù di una indicazione della classe di permeabilità di tipo medio alta, a cui corrispondono dei BFI caratteristici compresi nel range 40-60.

Nello stesso tempo il valore di BFI calcolato alla stazione di Capannoli sul Fiume Era ($BFI_{nat}=19.96\%$) risulta il minimo dell'intero bacino del Fiume Arno, contrastando apparentemente con valori di corsi d'acqua limitrofi sempre affluenti in sinistra dell'Arno (Castelfiorentino sul Fiume Elsa $BFI_{nat}=58.48\%$, Sambuca sul Fiume Pesa $BFI_{nat}=47.52\%$). Queste ultime osservazioni potrebbero anche far supporre una possibile alterazione dei deflussi non registrata sotto forma di prelievo nel corrispondente archivio delle concessioni, quindi non ricostruita in termini di portate naturali.