

4. Il deflusso minimo vitale e il bilancio delle acque superficiali

Criteria per il calcolo del deflusso minimo vitale (DMV)

Osservazioni sulla definizione e approccio di elezione

La definizione del DMV attraverso tre componenti concorrenti

Conviene ricordare il DM 28 luglio 2004 “Linee guida per la predisposizione del bilancio idrico di bacino” ove il DMV è definito come “la portata istantanea da determinare in ogni tratto omogeneo del corso d’acqua”, che deve garantire la salvaguardia:

- delle caratteristiche fisiche del corpo idrico;
- delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque;
- il mantenimento delle biocenosi tipiche delle condizioni naturali locali.

Nello spirito del decreto è una ricognizione del peso relativo delle condizioni appena accennate in modo da dirigere adeguatamente le tecniche verso il criterio dominante nell’individuazione del valore da adottare.

Per salvaguardia delle caratteristiche fisiche del corso d’acqua si intende il mantenimento delle tendenze evolutive naturali morfologiche ed idrologiche. Questo significa, in sintesi, che il DMV deve garantire un regime idrologico tale da consentire una sufficiente capacità di trasporto solido nel corso dell’anno. Questo aspetto, nel bacino dell’Arno, non costituisce il vincolo più critico. Il carattere aspramente torrentizio dell’asta principale e degli affluenti, è testimoniato da curve di durata annue che interessano sovente quattro decadi logaritmiche (dalle centinaia di litri al secondo delle durate più lunghe, fino alle migliaia di metri cubi al secondo per le basse durate). La maggior parte del trasporto solido è dunque collegata agli eventi di piena e di morbida.

Analisi condotte sulla sezione di Subbiano ad esempio, ove il fiume mostra ancora una morfodinamica relativamente naturale, indicano come la portata dominante corrisponda a durate tra i cento e centocinquanta giorni. Valori dunque ben lontani da quelli di interesse per la stima del DMV.

Per “salvaguardia delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque” si intende il mantenimento, nel tempo, dello stato di qualità, in linea con il perseguimento degli “obiettivi di qualità” e della naturale capacità di autodepurazione del corso d’acqua. Per questo vincolo, è da segnalare il progressivo affermarsi di programmi di depurazione dei reflui civili e industriali nell’ambito del bacino, oltre allo sforzo nei confronti dell’adozione di tecnologie viepiù spinte sul riuso delle acque. È peraltro da ricordare che una parte significativa del sostegno ai deflussi di magra, soprattutto nell’asta principale, è dato proprio dalla restituzione di acque depurate. Vista la specifica competenza che i Piani di Tutela delle acque rivestono su questo aspetto, si rimanda ogni eventuale misura di ulteriore sostegno a tali strumenti. Le misure di Piano prevedono una specifica indicazione in tal senso.

Per salvaguardia delle biocenosi tipiche delle condizioni naturali è da intendersi il mantenimento nel tempo, dell’insieme di più popolazioni appartenenti alla stessa specie, proprie dell’area di riferimento. In tal senso si richiede di prendere in considerazione diversi stadi vitali di ciascuna specie.

Il mantenimento delle biocenosi come criterio guida

Conviene discutere brevemente questo criterio che appare particolarmente complesso. Gli spunti che vale la pena di sottolineare sono la necessità della continuità temporale, la preservazione estesa alle comunità “proprie dell’area di riferimento” e la considerazione esplicita dei “diversi stadi vitali”.

Il concetto di continuità temporale offre la duplice esegesi della

- continuità “annuale” che consenta alla popolazione locale di non migrare, se questo non costituisce un processo naturale proprio della specie, verso altri tronchi fluviali per esperire alcune delle funzioni vitali;
- continuità “strategica” che garantisca l’efficacia dei calcoli svolti per l’intero periodo di azione del Piano. Questo vincolo è particolarmente orientato ai processi di cambiamento climatico in atto.

Il concetto di comunità “propria dell’area di riferimento” porta sullo sfondo il problema della “definizione degli autoctoni” in ambienti fluviali che mostrano una dinamica particolarmente accelerata, oltreché dai cambiamenti climatici, dalla continua e sciagurata immissione di specie aliene da parte dei soggetti più disparati. Un esempio curioso, tra tanti che si potrebbero fare, è la imponente colonizzazione dell’invaso di Bilancino da parte di una cospicua comunità di *Dreysena Polimorpha*, mollusco bivalve detto “cozza zebrata”, tipico dei gradi laghi nel nord Europa. Da un punto di vista strettamente pragmatico il criterio richiede di

- individuare la base di conoscenza disponibile, sia nella letteratura scientifica che presso le Amministrazioni locali, in particolare quelle titolari della regolazione della pesca;
- operare una adeguata ricerca sperimentale con campionamento di biomassa;
- determinare e applicare opportuni criteri di regionalizzazione dell’informazione.

Il cenno agli “stadi vitali”, una volta individuata una specie di riferimento, è fortemente collegato a quanto già discusso a proposito della continuità temporale su base annuale. Ogni analisi relativa alla portata minima, deve estendersi all’inviluppo delle diverse fasi di vita della comunità per le quali, dunque, devono essere chiaramente individuate le condizioni di idoneità rispetto agli stati d’acqua e alla cinematica della corrente.

È evidente il collegamento che il “criterio sul mantenimento delle biocenosi” appena discusso, presenta con la qualità complessiva del corpo idrico. Una estesa letteratura recente stigmatizza, tra l’altro, il rapporto tra idoneità a livello di microhabitat e parametri quali, solo per segnalarne alcuni, l’ossigeno disciolto o la temperatura. Questo fatto, al di là dei criteri di carattere normativo insiti negli obiettivi di qualità, coglie, per così dire, la sostanza del problema. Il *target* sul mantenimento delle biocenosi assume dunque una valenza vasta e diffusa che ne indica decisamente, in assenza di ulteriori condizioni particolari, la funzione prioritaria nella definizione del DMV.

Alcune osservazioni di carattere generale

Relazioni tra biocenosi locali e regime delle portate

I sistemi ambientali fluviali e ripari presentano caratteristiche proprie alle diverse scale, macroscale, mesoscale e microscale. La dinamica annuale o interannuale che li caratterizza è condizionata dall’interazione tra clima e bacino idrografico. Il concetto stesso di DMV, come si è appena osservato, richiede di porre in relazione questi ecosistemi con il regime delle portate.

L’analisi del regime, nella fattispecie, richiede specifici approfondimenti sull’andamento stagionale e la definizione di specifici indicatori di *stress*. Nel nostro lavoro, vista la letteratura e la prassi tecnica, si è optato per il riferimento alle specie ittiche che, nello specifico del bacino, costituiscono il vertice della catena ecosistemica.

Si è detto che ogni criterio di “mantenimento delle biocenosi”, vista anche la definizione di DMV, richiede che la criticità biologica del tratto considerato sia esprimibile

attraverso un parametro indice che vari significativamente in funzione della portata. Questo approccio presenta due elementi di incertezza, indecisione o *fuzziness*, costituiti

- dalla capacità di adattamento locale della specie in occasioni di crisi prolungate;
- dalla mobilità che, se sussiste la continuità longitudinale del corso d'acqua, consente ai pesci di spostarsi alla scala del *mesohabitat*, alla ricerca di situazioni locali più favorevoli.

È dunque evidente che criteri "soglia" di carattere strettamente deterministico, soprattutto se riferiti alla microscala o al singolo tronco fluviale, si mostrano intrinsecamente deboli rispetto a elementi di complessità così accentuati. Se è lecito ricorrere ad un semplice esempio, sarebbe come determinare il rischio idraulico associato a un edificio montato su ruote e la cui vulnerabilità sia una funzione fortemente non lineare del tempo di sommersione.

Dati locali e regionali nella complessità dell'ecosistema fluviale

Il Piano in esame implica una conoscenza del DMV potenzialmente diffusa all'intero "sistema delle acque" riferito alla cartografia tecnica in scala 1:10.000. Si tratta di circa 22.500 Km di estensione su oltre 9.000 km² di territorio. Il problema è dunque di compenetrare una conoscenza intrinsecamente localizzata, quale quella indispensabile all'applicazione dei metodi biologici, con una estensione alla scala di area vasta.

La mobilità della specie, tanto per fare un esempio, è uno dei tanti elementi che contribuiscono ad indebolire metodologie portate validate alla scala locale, limitata ad estensioni dell'ordine di una decina di larghezze dell'alveo. Questo tipo di approccio fornisce difatti risultati validi appunto localmente, come se i pesci stessero dentro una sorta di perfetto "acquario naturale" nel quale quote e velocità fossero mantenute artificialmente. La nozione di "sito" o di "stazione di osservazione" richiede una discussione più ampia, la cui complessità non è da trascurarsi.

Il concetto di *stress*, a sua volta, comporta che si vada a considerare la permanenza di più giorni consecutivi nei quali la portata è al disotto di un assegnato valore di soglia. Occorre approfondire la questione tornando ancora al concetto di "regime". La stessa esistenza di un ecosistema fluviale, ad esempio, mostra come le diverse biocenosi siano sostanzialmente allenate alla variabilità intrinseca delle portate. Il sistema, come una trave cementata da carichi crescenti, risponde al protrarsi della sollecitazione con assetti tesi a reclutare ed ottimizzare progressivamente la resistenza residua, fino al definitivo collasso. Accade peraltro, fuor di metafora, che l'ecosistema, al termine della crisi, possa comunque ricostruire in tempi più o meno lunghi, un nuovo assetto prossimo a quello originale.

La nozione di *stress* aggiunge dunque una dimensione al problema, quella del tempo, richiamando con forza l'importanza dello spettro di frequenza della persistenza delle basse portate. Quello di "mobilità" indirizza invece a criteri "geomorfoclimatici" con i quali il fiume definisce gli assetti locali in termini di morfologia dell'alveo e dunque di disponibilità di habitat. Ambedue i punti introducono con forza l'importanza del regime fluviale, e in particolare quello delle magre.

Caratteri regionali del regime delle portate

Il regime, inteso come andamento medio annuo delle portate su di un periodo di riferimento, ha caratteristiche che ben si prestano alla regionalizzazione del dato puntuale, come testimonia una estesa letteratura che riguarda anche e soprattutto le piene. I fattori fenomenologici che determinano il regime sono difatti intrinsecamente "regionali". Tra questi il clima, la permeabilità dei bacini, gli usi del suolo prevalenti.

In questo senso, a partire dalle serie storiche di osservazioni puntuali, anche se relativamente disperse sul territorio, è possibile addivenire a risultati affidabili a scala di bacino. Nel caso delle medie giornaliere, considerando il quadro dei prelievi, si può inoltre ricostruire il regime “naturale” del fiume cui, viste le scale temporali di riferimento, è ascrivibile l’assetto morfologico in atto.

In accordo con la letteratura e la prassi tecnica, è possibile (e sensato) associare la condizione di *stress* al non superamento di una soglia predefinita di portata per un numero assegnato di giorni consecutivi. Attraverso la ricostruzione di un numero significativo di anni, è altrettanto possibile individuare la frequenza di successioni di minimi annuali (in termini ad esempio di media mobile) e associare a tali sequenze una adeguata distribuzione di probabilità.

Individuata dunque una soglia di riferimento, ad esempio in termini di tempo di ritorno, si può ottenere un indicatore ragionevolmente efficiente. Questo difatti, oltre a sottolineare il ruolo della persistenza delle basse portate, ha valenza quantomeno alla mesoscala, garantendo una analisi che, per metodi e dati di base, trascende il mero intorno della sezione di interesse.

Caratteri regionali delle biocenosi di riferimento

È bene sottolineare che, ogni costruzione basata esclusivamente su criteri idrologici, perde di significato in assenza di una conoscenza degli ecosistemi di riferimento che possa consentirne la calibrazione e la verifica. La persistenza delle magre resta difatti un dato astratto se non è contestualizzato adeguatamente con una analisi quantitativa locale sulle specie e la biomassa di riferimento. È difatti vero che l’indagine del micro e del mesohabitat, anche se coi limiti più sopra accennati costituisce un riferimento locale scientificamente validato. Conviene allora discutere alcune peculiarità dei metodi cosiddetti sperimentali e, in particolare del metodo dei microhabitat che, nell’ambito del presente lavoro, ha costituito l’indispensabile elemento di taratura e validazione dei criteri di ordine idrologico.

La metodologia, è bene ricordarlo, è basata sul preliminare campionamento locale delle specie, e sull’individuazione di una o più *target* di riferimento con conseguente quantificazione della biomassa assoluta e relativa. È interessante sottolineare che i risultati dei campionamenti “localizzati” relativi a questa fase di attività, come testimonia la produzione scientifica, sono ben suscettibili di una adeguata spazializzazione, portando alla efficace definizione di diverse specie di riferimento per assegnate regioni geografiche nell’ambito del bacino. Questo lavoro, applicando metodologie di regionalizzazione di letteratura, è stato effettivamente svolto sull’intero territorio dell’Arno, consentendo la redazione di una carta delle specie di riferimento. Questo fatto, a sua volta, si traduce in curve di idoneità “regionali” per le diverse fasi, ad esempio avannotto, adulto, riproduttivo, in modo da addivenire a curve involucro critiche per le varie specie.

Carattere locale del contesto dei microhabitat

Il passo successivo del metodo dei microhabitat riguarda la definizione della topografia del fondo del tronco interessato e della successiva caratterizzazione idrodinamica, attraverso la ricostruzione del campo cinematico, per un adeguato numero di portate. Su questo punto è necessaria una ulteriore riflessione.

Si tratta, difatti, di dati prettamente legati alla topografia fine dell’alveo e alle condizioni idrauliche al contorno per le diverse portate. Sono dunque dati difficilmente suscettibili di estensione su tronchi diversi, anche adiacenti. È questo l’aspetto che sottolinea il carattere dell’analisi che è e resta, a tutti gli effetti, puntuale. Ogni applicazione del metodo costituisce dunque soltanto la singola realizzazione di un processo stocastico. L’unica possibile forma di regionalizzazione è quella conseguente di addivenire a molte

realizzazioni che sempre e comunque forniranno una immagine indiretta e frammentata della realtà.

A queste considerazioni se ne aggiunge una ulteriore. La letteratura, soprattutto nei riferimenti al metodo *IFIM* si riferisce ad una analisi idraulica prettamente monodimensionale, articolata per sezioni o “transetti”.

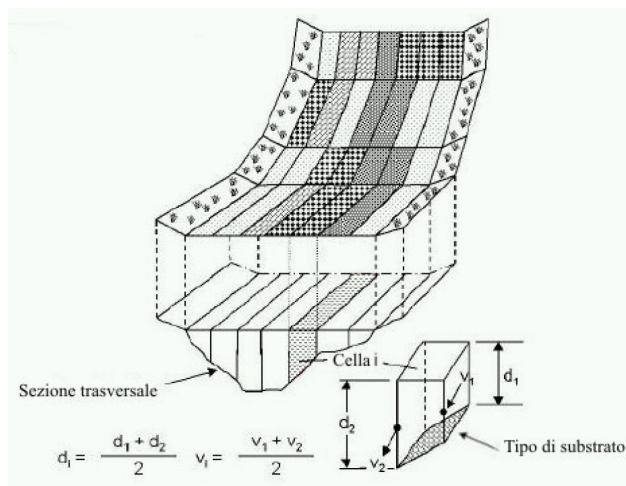


Figura 116 - Classico schema del metodo IFIM

Tale impostazione, come è noto a tutti, è comunemente adottata per la simulazione del deflusso in schemi ove sia applicabile uno schema di corrente, e dunque ove le traiettorie siano sostanzialmente rettilinee e parallele tra loro. Le stesse ipotesi, andando a considerare la simulazione delle magre e il relativo mosaico degli habitat, danno adito a qualche perplessità. Prevale difatti il carattere tridimensionale della struttura del campo di quote e velocità come si può apprezzare nella figura che segue. L'immagine mostra i risultati del calcolo del campo di velocità in un tronco dell'alveo presso la stazione idrometrica di Subbiano. La topografia del fondo è stata acquisita attraverso un rilievo GPS. Su di essa è stato costruito un modello ad elementi finiti con il quale si è simulato il moto di portate crescenti fino a 10 m³/s in modo da coprire per intero il campo delle curve di idoneità per la specie autoctona *barbus tyberinus*.

Nelle prime tre immagini sono riportati, nell'ordine, il campo di quota e di velocità, la idoneità sulla profondità e l'idoneità sulla velocità. I calcoli sono relativi alla portata intermedia di 5 m³/s, corrispondenti ad una durata di circa 200 giorni. L'ultima immagine a destra riporta l'area disponibile ponderata o *WUA* (*weighted useable area*). È interessante osservare, tra le altre cose

- la significativa variabilità del campo di moto che è sostanzialmente lontana da uno schema unidimensionale, mostrando velocità anche elevate con direzione non parallela all'asse geometrico del tronco;
- la ben riconoscibile sequenza degli habitat con l'alternarsi di “raschi” e zone di calma;
- la distribuzione delle aree a diversa idoneità, tanto per la quota che per la velocità, che da luogo ad una forte variabilità spaziale della disponibilità di habitat.

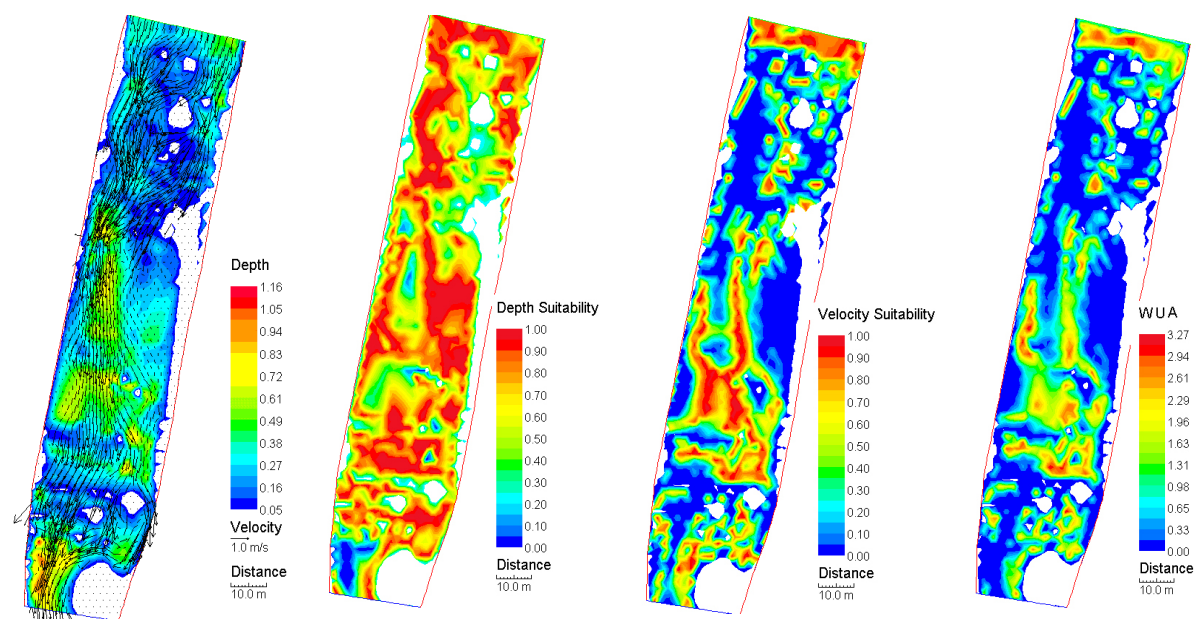


Figura 117 - Applicazione del metodo IFIM attraverso uno schema tridimensionale ad elementi finiti

La discussione sul confronto tra i due schemi di calcolo esula dal contesto di queste note. Resta tuttavia viepiù evidente l'importanza del carattere prettamente puntuale del metodo che si presta ad analisi la cui validità è circoscritta all'ambito locale di indagine.

L'integrazione di due metodi

La filosofia introdotta dall'Autorità di bacino dell'Arno, per queste ragioni, si basa sulla sinergia di metodologie diverse che, stando alle definizioni delle "Linee guida", si collocano nell'ambito dei "metodi con variabili statistiche" e "metodi sperimentali complessi".

Il primo passo, come si è accennato, si svolge alla scala regionale. È a questo livello che si caratterizza il regime delle portate attraverso la definizione delle curve di durata annuali e stagionali e si calcolano, per ogni singolo tronco, gli indicatori di stress per assegnato tempo di ritorno. In particolare, per quanto attiene a questi ultimi, si tratta della ricostruzione della portata $Q_{7,2}$ "naturale", ottenuta con tecniche di regionalizzazione di serie storiche di deflussi adeguatamente depurate dei prelievi. Sempre alla scala regionale si caratterizzano le specie bersaglio e i relativi parametri di idoneità. Questa fase ha comportato, tra l'altro, una estesa campagna di campionamento della biomassa.

Proprio questo insieme di dati viene a creare il tessuto connettivo che fornisce l'indispensabile continuità spaziale all'informazione sulle soglie di magra. Su questo tessuto che, si articola sull'intero bacino dell'Arno, si appoggia la nuvola dei punti di verifica con il metodo dei microhabitat.

Non si tratta, appunto, di una "rete" ove le connessioni tra i singoli noti abbiano una forte valenza consequenziale, ma di punti "sparsi", sostanzialmente indipendenti l'uno dall'altro. Sono le 18 realizzazioni del processo stocastico che compone le diverse probabilità della presenza di una assegnata sequenza topografica del fondo, delle caratteristiche del substrato, delle condizioni al contorno di monte e di valle per ciascuna delle portate considerate e di assegnate curve di idoneità.

Nel seguito di questa relazione si darà dettagliatamente conto del confronto effettuato considerando i valori della $Q_{7,2}$ e della portata "biologica" derivante dalla metodologia IFIM. Conviene ricordare ancora che il dato idrologico considera la persistenza della portata media di sette giorni consecutivi con assegnata frequenza. Il tempo di ritorno

considerato, due anni, si riferisce ad eventi tutt'altro che estremi. La successione di questi deflussi minimi ha difatti, almeno in termini medi, ben oltre il 95% di probabilità di essere osservata nell'arco di cinque anni. Questo costituisce una garanzia di forte cautela nei confronti delle biocenosi.

Ricordiamo inoltre che la statistica è compiuta su serie che ricostruiscono la naturale dinamica del regime fluviale, al lordo dei prelievi effettivamente in atto. Le serie storiche considerate non sono state filtrate dal depauperamento dovuto al cambiamento climatico, per considerare al meglio gli elementi dei processi fisici che, sulla scala temporale delle molte decadi, hanno determinato l'ecosistema in atto. Questo fattore caratterizza positivamente l'approccio seguito. L'indicatore del DMV prescinde difatti dalla antropizzazione subita dal regime fluviale per riferirsi effettivamente al regime naturale.

Il confronto tra dato idrologico e biologico è stato effettuato ovunque possibile, omettendo quelle realtà particolari, Canale scolmatore d'Arno, colatori di bonifica, tratti di rigurgito fortemente artificializzati, ove la metodologia dei microhabitat era al di fuori del proprio campo di applicazione. Il dato biologico, come più sopra accennato, è stato riferito all'inviluppo inferiore dei diversi stadi vitali.

È stato ritenuto opportuno riferire la soglia idrologica determinata dalla $Q_{7,2}$ ad un valore del 30% di area disponibile ponderata normalizzata. Tale soglia costituisce difatti il limite inferiore delle condizioni per la sopravvivenza della specie. Il metodo *IFIM* d'altro canto, implica una immagine locale, statica e istantanea, seppur stagionale, delle condizioni locali. Tale approccio trascura necessariamente tanto le capacità di adattamento quanto la mobilità delle specie. Queste capacità, come abbiamo dianzi ricordato, vengono ordinariamente attivate dall'ittiofauna in corrispondenza di condizioni di stress sicché disponiamo spesso di esempi di tronchi ordinariamente ricchi di pesce anche se sporadicamente oggetto di quasi totale siccità dell'alveo. La portata media di sette giorni consecutivi introduce, in questo contesto, l'indispensabile elemento di continuità temporale del regime di magra estrema. I termini del confronto, alla luce di queste considerazioni, ci paiono estremamente appropriati.

L'analisi del regime idrologico

Modellistica numerica per la regionalizzazione dei deflussi

Il regime idrologico del bacino è caratterizzato da indicatori estesi alla scala regionale attraverso apposite procedure di regionalizzazione dei dati di portate osservate e ricostruite, al netto dei prelievi in atto, in maniera da riprodurre condizioni naturali.

L'obiettivo è stato mirato sulla definizione di una portata di riferimento individuata nella portata minima di sette giorni consecutivi avente un tempo di ritorno di 10 anni ($Q_{7,10}$). Successive valutazioni hanno condotto a ridefinire la portata di riferimento con uno stesso approccio ma assumendo un tempo di ritorno pari a due anni ($Q_{7,2}$).

Stima delle portate naturali nelle sezioni strumentate

Per ciascuna stazione strumentata, la stima delle portate naturali è stata effettuata combinando, in sequenza cronologica, le portate misurate nelle stazioni idrografiche con i prelievi operati a monte.

In particolare la procedura di ricostruzione della serie storica delle portate naturali ha previsto i seguenti passaggi:

- verifica, attraverso la georeferenziazione delle stazioni di misura e delle concessioni, di tutti i prelievi situati nel reticolo idrografico a monte delle stazioni di misura, distinguendo quelli con asta di restituzione diversa dall'asta di presa per i quali è necessario verificare anche la posizione della restituzione rispetto alla stazione di misura;

- controllo dell'anno di elaborazione del dato di portata con l'anno di attivazione e scadenza del dato di prelievo, verificando quindi che il prelievo sia in corso ossia compreso tra i due anni di attivazione e scadenza;
- verifica per le concessioni scadute o prive di data di scadenza della situazione d'uso, considerando attive quelle in condizioni di sanatoria, istruttoria o rinnovo, a meno di specifiche indicazioni per il singolo prelievo;
- verifica del coefficiente di efficienza da utilizzare nella legge d'uso;
- applicazione della legge d'uso attribuita al prelievo.

La procedura ha quindi previsto l'aggiornamento delle portate misurate con i valori giornalieri dei prelievi, caso per caso, in modo da ottenere la serie delle portate giornaliere naturali.

Stima delle portate naturali nelle sezioni non strumentate

La stima delle portate naturali nelle sezioni non strumentate non ha seguito la logica cronologica della serie storica, per ovvi motivi di complessità, ma ha visto l'applicazione di una tecnica di regionalizzazione alle curve di durata.

In sintesi, il criterio logico che ha condotto ad una scelta in tal senso è basato essenzialmente sulla possibilità di avere una modellistica dipendente da dati di input di facile reperibilità. In particolare: un numero sufficiente di sezioni idrometriche strumentate con una serie storica affidabile, su cui eseguire una taratura del modello; un'informazione sufficientemente ampia sui prelievi; infine la conoscenza di alcuni parametri caratteristici dei bacini idrografici di facile interpretazione, quali area del bacino e conformazione geologica.

Regionalizzazione dei deflussi

La regionalizzazione dell'informazione idrologica a scala di bacino rappresenta uno degli aspetti tecnico-scientifici di maggiore interesse, in quanto a fronte dello studio di metodologie di approccio al problema vi è un'indubbia utilità pratica dei risultati. Risulta inoltre di primaria importanza per la fase di regionalizzazione della portata minima di riferimento di cui ai successivi paragrafi.

La stima delle portate defluenti in una assegnata sezione del reticolo idrografico richiederebbe la conoscenza, a scala di bacino, del bilancio idrologico globale, i cui termini sono:

- l'afflusso meteorico
- il deflusso superficiale e profondo
- le variazioni di invaso nel suolo, nelle falde e nei serbatoi
- gli impieghi dissipativi
- le diversioni e/o immissioni locali o extra bacino.

La soluzione di tale problema risulta purtroppo spesso difficile, sia per la complessità delle interazioni tra le varie componenti, sia soprattutto per la frammentarietà e limitatezza dei dati disponibili. Tra questi, quelli più utili per ampiezza del periodo di osservazione e possibilità di impiego sono le osservazioni idrometriche giornaliere e le corrispondenti portate medie del Servizio Idrografico. Tali dati infatti costituiscono un patrimonio irrinunciabile, nonostante alcune incertezze conseguenti ad una non sempre facile taratura delle scale di deflusso.

La difficoltà oggettiva che in genere si riscontra nel disporre di dati omogenei, che consentano di costruire un bilancio che dia delle risposte utilizzabili alla scala di bacino (soprattutto in termini di deflussi con un'informazione diffusa), ha suggerito un

approccio che rappresenta i deflussi in modo sintetico mediante le corrispondenti curve di durata relative all'intero periodo di osservazione, ponendo particolare attenzione nel caso di serie storiche molto brevi (minori di 9-10 anni), situazione in cui le curve si potrebbero presentare instabili.

Tale scelta è stata fatta anche in un'ottica specifica di regionalizzazione dell'informazione. Infatti l'ormai intensa utilizzazione del territorio rende insufficiente la densità dei punti di misura a rappresentare la reale distribuzione areale delle risorse. Tale problema, che si pone ogni qualvolta debba valutarsi la disponibilità idrica in una sezione non strumentata, può essere adeguatamente superato proprio mediante tecniche di regionalizzazione, ricorrendo ai numerosi modelli idrologici proposti in letteratura, a volte peraltro complessi o basati su troppi parametri di difficile stima.

In alternativa a questi, le curve di durata permettono di utilizzare una procedura di regionalizzazione basata sulla sola conoscenza di due parametri quali l'indice del deflusso di base (BFI) e la superficie drenata (AREA), parametri nel complesso di facile valutazione.

Infatti per la stima del BFI, anche in sezioni non strumentate, è possibile ricorrere a corrispondenze numeriche tra BFI e caratteristiche idrogeologiche di bacino, mentre per la stima dell'area (AREA) sottesa da una sezione è sufficiente un'operazione di semplice misura planimetrica, facilitata dalle ormai diffuse tecniche di gestione numerica della cartografia.

Le distribuzioni di frequenza delle portate giornaliere

Una volta ottenuta la regionalizzazione dell'indice del deflusso di base, si passa ad esaminare nello specifico il dato di portata, per poi pervenire ad una utilizzazione unificata dei risultati attraverso la regionalizzazione anche di quest'ultimo sotto forma di curve di durata.

Per la rappresentazione del fenomeno delle portate giornaliere può essere utilizzata una distribuzione di probabilità la cui variabile casuale è definita solo per valori non negativi, in quanto la portata minima non può essere che maggiore o uguale a zero, mentre la massima teoricamente può essere illimitata. Nel caso specifico (valutazione delle risorse), non essendo di interesse i fenomeni di piena, è indifferente considerare una funzione di probabilità che sia o no limitata superiormente. Maggiore interesse riveste invece la definizione dell'estremo inferiore della distribuzione che rappresenta la portata di magra assoluta del corso d'acqua. Tale valore infatti, a meno di corsi d'acqua a carattere spiccatamente torrentizio, è sempre diverso da zero ed assume spesso valori percentualmente non trascurabili rispetto alla portata media.

Tipicamente la distribuzione di frequenza delle portate di un corso d'acqua, oltre ad essere spesso unimodale, ha una netta asimmetria a sinistra. In altre parole effettuando una misura di portata si ha un'alta probabilità che questa sia minore della media piuttosto che maggiore.

Ciò premesso, supposta nota la funzione densità di probabilità $f(x)$, nella quale x rappresenta la portata media giornaliera e noti gli estremi inferiore e superiore della distribuzione x_1 ed x_2

$$F(x) = \int_x^{x_2} f(x) dx$$

rappresenta la durata di x ovvero la probabilità che la variabile causale sia compresa tra un generico valore x e l'estremo superiore x_2 . La $F(x)$, per ogni x , più usualmente è chiamata curva di durata dei deflussi, e viene di solito rappresentata invertendo gli assi, riportando cioè in ordinate le portate o più spesso i loro logaritmi ed in ascisse le

durate espresse in giorni da 1 a 365. Ad ogni portata Q della curva di durata corrisponde quindi un tempo di t giorni in cui tale portata è stata superata o al massimo eguagliata. Nell'intervallo di tempo complementare $365-t$ ovviamente le portate saranno sempre minori di Q .

Le distribuzioni di frequenza più spesso utilizzate per regolarizzare le serie storiche delle portate giornaliere sono la Log-Normale, la legge di Gumbel, le leggi di Pearson.

Tra tutte è stata scelta per gli scopi del presente lavoro la distribuzione Log-Normale, ai cui parametri può essere data una particolare interpretazione fisica.

Indici idrologici di magra

L'analisi delle serie storiche dei deflussi e la regionalizzazione del regime idrologico e idrico medio annuo anche per le sezioni non strumentate, consente il calcolo degli indici statistici di riferimento per la definizione quantitativa delle portate minime annue a cui si lega la definizione del Deflusso Minimo Vitale.

La caratterizzazione del regime delle magre si è concretizzata nella individuazione di indici idrologici che, ampiamente diffusi nella letteratura tecnico-scientifica di settore, potessero risultare rappresentativi di una condizione di magra ordinaria. A tal fine si sono utilizzate la portata minima di 7 giorni consecutivi con 10 anni di tempo di ritorno ($Q_{7,10}$) e la portata minima di 7 giorni consecutivi con 2 anni di tempo di ritorno ($Q_{7,2}$). Alla luce di ciò e a seguito delle opportune analisi critiche con i regimi annui nel loro complesso, è stato assunto quale indicatore sintetico di riferimento la $Q_{7,2}$.

La regionalizzazione della $Q_{7,10}$

Il processo di regionalizzazione della portata minima di 7 giorni con tempo di ritorno 10 anni ha seguito uno sviluppo molto simile a quello delle curve di durata naturali. L'approccio utilizzato ha condotto alla definizione di una relazione polinomiale generale i cui coefficienti si assumono costanti per la gran parte delle sezioni di chiusura dell'Arno e degli affluenti mentre variano per i bacini del Fiume Bisenzio e Ombrone Pistoiese. Risultano un'eccezione a questa regola i bacini di Chiana, Greve, Pesa ed Era chiusi alla sezione immediatamente a monte della confluenza in Arno per i quali la peculiarità idrologiche e geo-morfologiche hanno imposto una definizione degli indici idrologici di magra per mezzo di un contributo specifico unitario di seguito illustrato.

Per quanto concerne la relazione polinomiale generale essa è del tipo:

$$\frac{Q_{7,10_{nat}}}{Area} = a_1 \cdot BFI^2 + a_2 \cdot BFI + a_3$$

per la quale si hanno i seguenti coefficienti:

$$a_1 = 4.62214 \text{ E-07}$$

$$a_2 = - 6.67244 \text{ E-06}$$

$$a_3 = 2.35804 \text{ E-05}$$

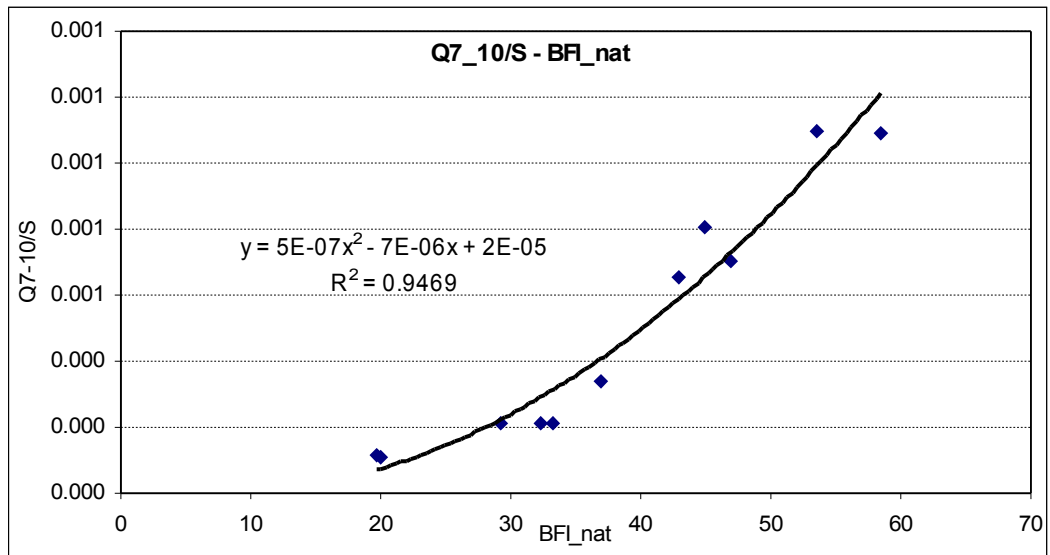


Figura 118 - Curva interpolare $Q_{7,10}/Area - BFI_{nat}$

Quanto ai bacini dei Fiumi Bisenzio e Ombrone Pistoiese la taratura eseguita ha condotto ai seguenti coefficienti:

$$a_1 = 5.13544 \text{ E-}07$$

$$a_2 = 8.0246 \text{ E-}06$$

$$a_3 = 0.00021$$

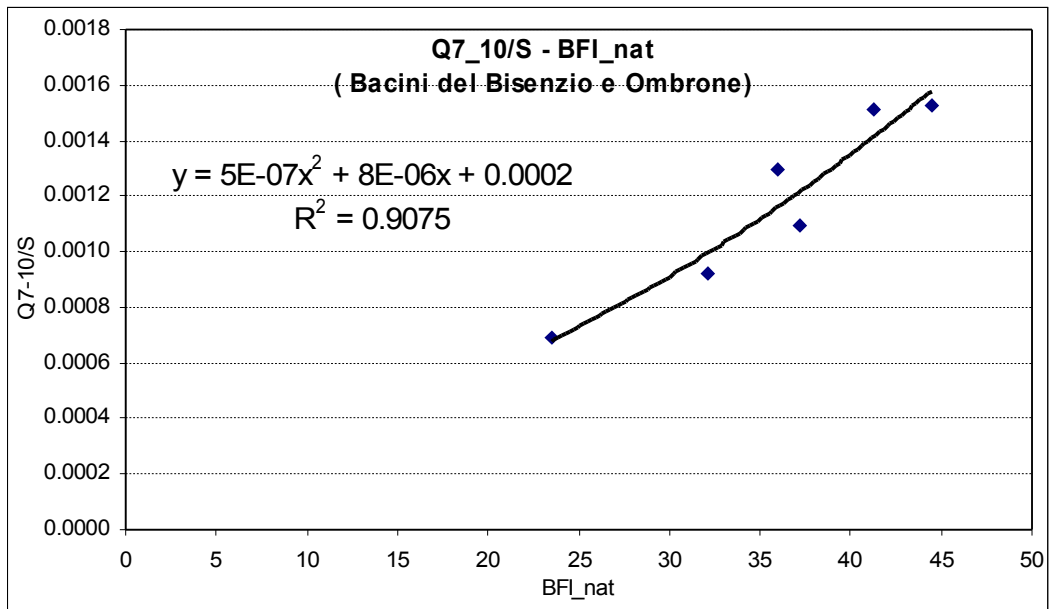


Figura 119 - Bacini dei Fiumi Bisenzio e Ombrone, curva interpolare $Q_{7,10}/Area - BFI_{nat}$

Il calcolo della $Q_{7,2}$

In completa analogia alla metodologia utilizzata per la regionalizzazione della $Q_{7,10}$ si è valutato l'indice idrologico per 2 anni di tempo di ritorno, $Q_{7,2}$.

L'analisi di correlazione tra i dati di $Q_{7,10}$ e $Q_{7,2}$ per diverse sezioni dell'intero bacino dell'Arno evidenziano un legame pressoché lineare tra i due indici. Considerando la $Q_{7,10}$ quale variabile indipendente il rapporto lineare è caratterizzato da un coefficiente di correlazione pari a 1.5833. Per cui risulta

$$Q_{7,2} = 1.5833 Q_{7,10}$$

Per i bacini dei Chiana, Greve, Pesa ed Era l'aggiornamento del quadro conoscitivo delle concessioni di attingimento da acque superficiali e di subalveo ha messo in luce una netta differenza tra i volumi complessivi attinti allo stato attuale e quelli che definivano il quadro conoscitivo alla data dello studio di regionalizzazione dei deflussi per il reticolo idrografico dell'intero bacino dell'Arno. Tali differenze, la cui entità non si riscontra sui bacini afferenti alle altre sezioni significative hanno imposto una rimodulazione degli indici idrologici riferiti agli affluenti in questione.

Per i Fiumi Greve e Pesa (già regionalizzati solo in base al contributo specifico sull'area) i valori ottenuti mediante regionalizzazione, seppur in linea con quelli effettivamente misurati, sono pesantemente affetti da errore dovuti ai prelievi di subalveo non considerati nella stessa modellazione di regionalizzazione dei regimi di deflusso.

Viene pertanto adottato un valore di $Q_{7,2}$ funzione di area drenata e di contributo specifico di $Q_{7,2}$. Quest'ultimo contributo è calcolato a partire dalle serie di portata alle stazioni idrometriche disponibili sul bacino di Greve e Pesa, opportunamente corretti con i prelievi di subalveo. Ne risulta un contributo specifico ($cs_{Q_{7,2}}$) pari a 0,47 l/s/kmq.

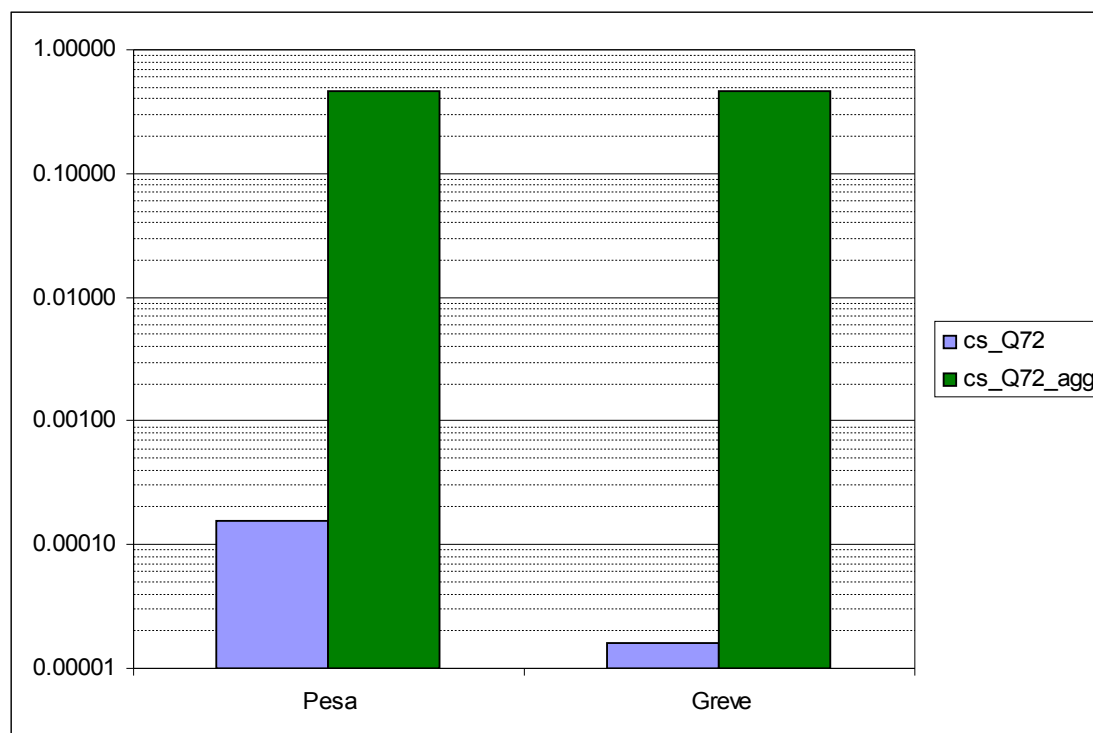


Figura 120 - Pesa e Greve. Confronto tra il contributo specifico di $Q_{7,2}$ di regionalizzazione e il valore aggiornato con i prelievi di subalveo

Per Chiana ed Era i valori regionalizzati presentano una grave difformità da quelli misurati nei punti di controllo (stazioni idrometriche); questa evidenza era palese già nello studio di regionalizzazione del regime delle portate.

In relazione a ciò si adotta una $Q_{7,2}$ quale funzione di area e di contributo specifico di $Q_{7,2}$. Tale contributo è calcolato a partire dalle serie delle portate misurate alle stazioni idrometriche disponibili. Ne risulta un contributo specifico ($cs_{Q_{7,2}}$) pari a 0,34 e 0,30 l/sec/kmq per Chiana ed Era rispettivamente.

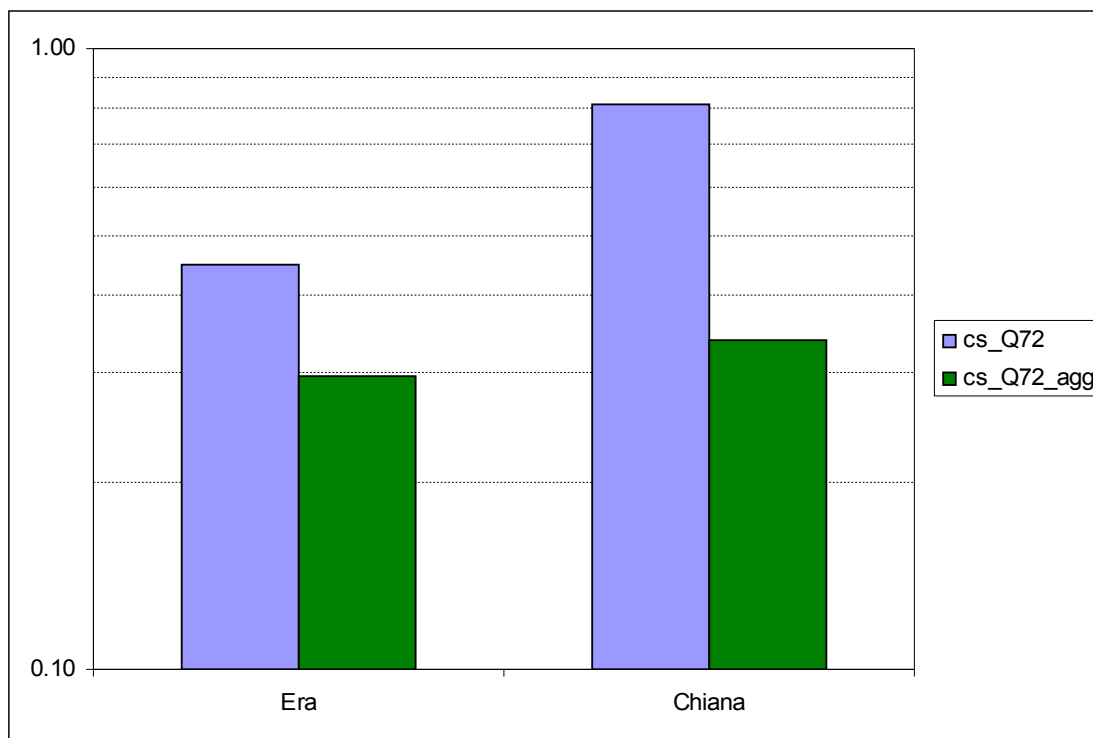


Figura 121 - Era e Chiana. Confronto tra il contributo specifico di $Q_{7,2}$ di regionalizzazione e il valore aggiornato con i prelievi di subalveo

A margine di tutto ciò, c'è da segnalare che, da un'ulteriore verifica sul Bisenzio, si nota che per la sovrastima del modello di regionalizzazione della $Q_{7,10}$ (e quindi $Q_{7,2}$) riscontrata per la stazione di San Piero a Ponti ($Q_{7,10} = 0.386$ l/s) assume coerenza se, nella naturalizzazione delle portate si prendono in considerazione anche i prelievi di subalveo.

A seguito della rimodulazione dei valori di $Q_{7,2}$ per Chiana, Greve, Pesa ed Era si presenta, per coerenza, la necessità di una correzione dell'indice $Q_{7,2}$ sul tratto dell'Arno a valle delle confluenze dei 4 affluenti. Essendo infatti tale indice ottenuto mediante una funzione di BFI (definita in precedenza) e avendo come ipotesi di base l'invarianza del BFI, la modifica dei valori sugli affluenti ha un effetto analogo alla modifica dei coefficienti di correlazione. La dipendenza lineare tra $Q_{7,10}/\text{Area}$ e coefficienti di correlazione (con BFI costante) avalla la necessità di correggere il valore in Arno a valle delle confluenze con Chiana, Greve, Pesa ed Era. Nello specifico le variazioni risultanti alla chiusura dei suddetti bacini immediatamente a monte della confluenza in Arno sono:

- Chiana: $\text{diff}_{Q_{7,2}} = -0.661$ mc/s
- Greve: $\text{diff}_{Q_{7,2}} = +0.126$ mc/s

- Pesa: $\text{diff}_{Q_{7,2}} = +0.091 \text{ mc/s}$
- Era: $\text{diff}_{Q_{7,2}} = -0.241 \text{ mc/s}$

Per ogni sezione le grandezze (BFI; coefficienti di correlazione) dipendono da fattori distribuiti o associati al bacino sotteso. L'indice idrologico calcolato presenta pertanto una marcata correlazione in termini medi con l'area.

Il Deflusso Minimo Vitale

Riprendendo le considerazioni espresse nella prima parte di questo capitolo, il regime di deflusso in una data sezione di chiusura è la risultante di ciò che all'interno del bacino viene determinato dalle caratteristiche morfologiche, dalla litologia, dalla struttura del reticolo idraulico, dall'interazione tra le acque superficiali e quelle sotterranee nonché dalla presenza di eventuali fasce sorgive. Inoltre il regime medio su una scala pluridecennale è l'*input* che ha consentito un certo assetto dell'ecosistema che, ad oggi, può essere preso come riferimento per la rappresentazione dello stato naturale del bacino stesso.

Con l'assunzione che il Deflusso Minimo Vitale su base idrologica sia la portata $Q_{7,2}$ si assume, nella sostanza, l'adattamento dell'ecosistema, considerato in maniera complessiva, ad un regime dei deflussi per cui sia tale da non sopportare portate di magra $Q_{7,2}$ per periodi più lunghi di 7 giorni.

Con tali premesse è stato individuato il Deflusso Minimo Vitale nel valore di $Q_{7,2}$.

Aspetti biologici per la determinazione del Deflusso Minimo Vitale

A supporto della definizione del Deflusso Minimo Vitale quale indicatore idrologico è stata eseguita una campagna di indagini e di studi modellistici aventi come obiettivo la valutazione degli aspetti biologici connessi al regime dei deflussi.

Questa attività ha contemplato due fasi che hanno previsto, rispettivamente, la regionalizzazione su base statistica della vocazione ittica del reticolo idraulico alla scala di bacino e la valutazione della portata biologica ottimale per la garanzia di un fissato livello di svolgimento delle funzioni vitali della specie ittica di riferimento. Le campagne di misura per la messa a punto della seconda fase sono state integrate (su altre sezioni di chiusura) da una serie di valutazioni sintetiche ottenute mediante l'implementazione di una procedura modellistica, validata in corrispondenza delle campagne sperimentali, che ha legato l'analisi idraulica e il modello di adattamento delle specie ittiche.

L'insieme dei dati ottenuti ha consentito di effettuare le opportune valutazioni per la validazione del Deflusso Minimo Vitale così come definito su base idrologica.

Regionalizzazione della vocazione ittica

La base di dati utilizzata per la messa a punto del modello statistico di regionalizzazione della vocazione ittica è costituita dai dati messi a disposizione dalle Amministrazioni Provinciali integrata dalle informazioni reperite durante le campagne di misura.

Per la formulazione dei modelli, al fine di estendere le vocazioni ittiche a tutto il bacino del Fiume Arno, è stato utilizzata la *regressione logistica politomica*. Questa nasce come uno strumento per la stima della probabilità di un evento (nel caso specifico, la classe di vocazione ittica) sulla base di un insieme di variabili predittive che caratterizzano ciascuna unità statistica (le Unità Campione, che coincidono con i tratti fluviali) secondo il seguente modello:

$$p(x) = \frac{e^{b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_i x_i}}{1 + e^{b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_i x_i}}$$

dove $p(x)$ = probabilità che l'evento (idoneità) accada. x_i = i -esima variabile indipendente (caratteristica ambientale) b_i =coefficiente parziale di variazione unitario come si può notare, una trasformazione denominata logit data dal logaritmo naturale del rapporto tra la probabilità che l'evento accada e il suo complementare (questo rapporto è definito odds) e indicata con $g(x)$ può essere rappresentata da un'equazione analoga al modello lineare:

$$g(x) = \ln \frac{P(Y = 1|x)}{P(Y = 0|x)} = B_{k0} + B_{k1}x_1 + \dots + B_{kp}x_p$$

La selezione delle variabili ambientali da inserire nel modello è stata effettuata mediante una procedura di selezione stepwise basata sulla una procedura di massimizzazione della funzione di verosimiglianza (likelihood). Il modello di regressione logistica è stato esteso al caso specifico formulando una serie di equazioni (Analisi di Regressione Logistica Politomica) il cui confronto permette di classificare ciascun caso come appartenente a una classe di una variabile dipendente politomica (con più di 2 classi/vocazioni ittiche, Bohrnstedt e Knoke 1998, Massolo e Meriggi 1998). Questa procedura consente di stimare i coefficienti del modello di regressione logistica, e quindi, una volta misurati i parametri ambientali (le variabili indipendenti, x_i), permette di stimare le probabilità di appartenenza a ciascuna classe per ciascun tratto fluviale. I modelli sono stati successivamente verificati statisticamente utilizzando test di confronto di verosimiglianza (likelihood), mentre le variabili selezionate e inserite nel modello sono state verificate mediante test basati sul rapporto fra valore stimato e errore standard della stima (t test), o mediante rapporti di varianze (statistica di Wald o F di Fisher). I modelli formulati sono stati poi confrontati sulla base della loro capacità di classificare correttamente i casi originari e in seguito il modello selezionato è stato applicato a ogni tratto fluviale presente nel bacino idrico. A ciascun tratto è stato attribuito quindi un valore di probabilità di appartenenza a una delle classi di vocazione ittica.

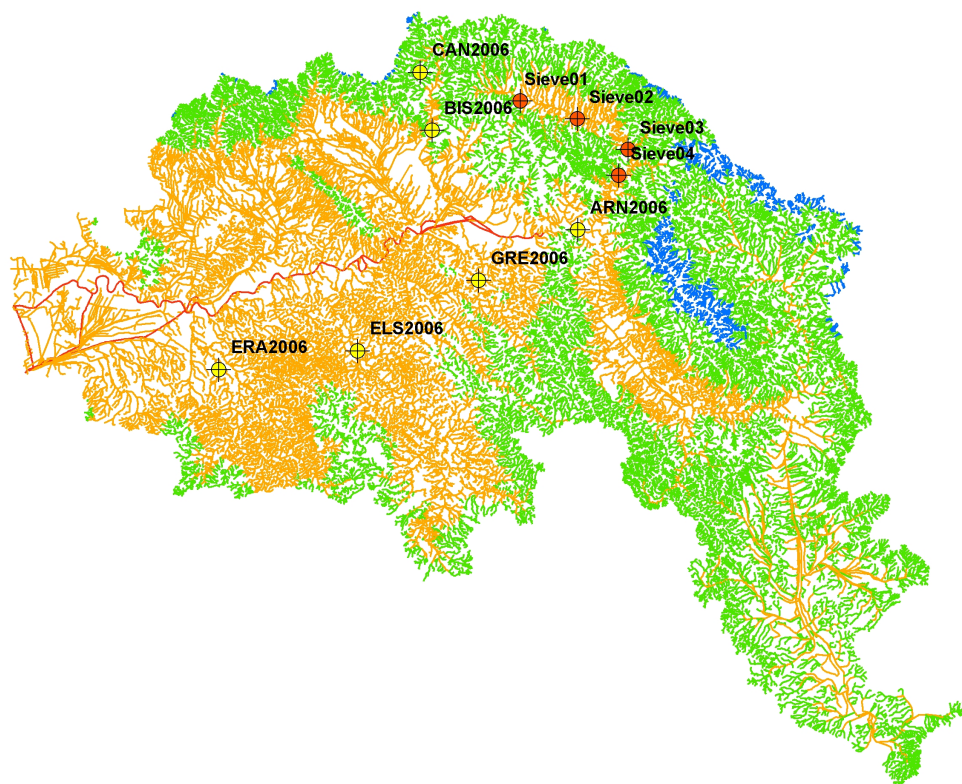


Figura 122 - Carta della vocazione ittica su base statistica e stazioni di campionamento eseguite per l'applicazione del metodo IFIM per via sperimentale

L'applicazione del metodo del Microhabitat (IFIM)

IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) è nato come risposta alle problematiche ambientali legate alla gestione ed allo sfruttamento della risorsa idrica. E' stato sviluppato da una équipe interdisciplinare di esperti sotto la responsabilità di United States Fish & Wild-Life Service (Department of the Interior).

IFIM è una complessa struttura analitica e concettuale, creata allo scopo di comprendere e gestire problematiche legate alla variazione indotta dei regimi fluviali provocate da azione antropica, con particolare riferimento alle portate dei corsi d'acqua (Stalnaker *et al.*, 1995). IFIM deve essere quindi considerato come un mezzo per dare una risposta ai problemi legati alla distribuzione della risorsa idrica in relazione agli organismi appartenenti all'ecosistema acquatico (Bovee *et al.*, 1998). La scelta dell'habitat quale variabile decisionale sullo stato di sopravvivenza degli organismi acquatici, con particolare riferimento alle specie ittiche, è dovuta al fatto che IFIM è stato appositamente creato per quantificare gli impatti sull'ambiente e che le modificazioni dell'habitat sono senza dubbio le più evidenti manifestazioni di tali variazioni di portata, sicuramente le più facilmente misurabili.

Le quattro componenti fondamentali di un sistema fluviale che determinano la produttività di organismi acquatici sono: il regime di portata; la struttura fisica dell'habitat (forma del letto fluviale e distribuzione del substrato); la qualità dell'acqua (ossigeno disciolto, temperatura); l'apporto di nutrienti e materia organica dal bacino idrografico del corso d'acqua preso in esame. La complessa interazione di queste componenti determina la produzione primaria, quella secondaria e lo stato ecologico delle popolazioni ittiche nell'ambito del sistema fluviale.

Mediante l'analisi combinata di più variabili ambientali IFIM riesce a predire con buona approssimazione la modificazione subita da un habitat al variare delle condizioni

idrauliche di un corso d'acqua. Per una corretta applicazione di IFIM è stato necessario creare una classificazione gerarchica dell'intero habitat fluviale: si possono distinguere infatti tre livelli di habitat principali, Macro, Meso e Microhabitat.

Si parla di *Macrohabitat* in relazione a porzioni longitudinali del corso d'acqua all'interno delle quali le condizioni chimiche o fisiche influenzano l'idoneità dell'intero segmento di fiume per tutti gli organismi acquatici. Al *Macrohabitat* appartengono i bacini di drenaggio, i sottobacini e le sezioni che sono le più piccole unità usate in IFIM. Il *Mesohabitat* invece è una discreta porzione di fiume definita dalla geometria del letto fluviale con caratteristiche simili, quali pendenza, larghezza, profondità, substrato. Tali unità geomorfologiche del corso d'acqua sono comunemente definite dai termini *pool*, *run*, *riffle*. Con il termine *pool* viene definita una zona con profondità variabile ($> 0,50$ m), velocità di corrente ridotta, priva di onde o increspature superficiali; velocità inferiore a $0,3$ m/s; *run* identifica una porzione fluviale nella quale si ha profondità media, poca o nulla turbolenza superficiale, velocità elevata o media; con *riffle* si identifica una zona di rapida con innalzamento del fondo, basso tirante, superficie increspata, substrato più grossolano, parzialmente sommerso, velocità media superiore a $0,3-0,4$ m/s. La larghezza del *Mesohabitat* è identificabile principalmente con la larghezza del letto fluviale inteso come superficie bagnata. Il *Microhabitat*, infine, si riferisce a piccole e localizzate aree all'interno del *Mesohabitat*, utilizzate dagli organismi acquatici durante le varie fasi della loro esistenza, come il periodo riproduttivo. Il *Microhabitat* è identificato come quell'area definita del corso d'acqua dove si riscontrano condizioni omogenee di profondità, velocità, substrato e copertura di fondo (questi ultimi due definiti *channel index*). Queste aree con caratteristiche omogenee, rappresentano l'unità di base per il calcolo del deflusso minimo vitale su base biologica.

Le limitazioni indotte dall'habitat su di una popolazione ittica o di invertebrati sono legate alla quantità ed alla qualità dell'habitat disponibile per le medesime popolazioni, soprattutto durante gli stadi vitali più critici (stadio giovanile e riproduttivo) ed una riduzione di tale habitat, soprattutto per un lungo periodo, eventualmente dovuto ad una drastica diminuzione della portata, può causare notevoli diminuzioni di produttività delle popolazioni di vertebrati ed invertebrati del sistema fluviale.

Elemento fondamentale nella stima dell'habitat favorevole alla sopravvivenza ed alla riproduzione delle specie ittiche sono le curve di idoneità. Tali curve rappresentano la relazione tra le variabili ambientali idro-morfologiche e la capacità della fauna ittica di svolgere le proprie funzioni vitali. Le curve d'idoneità vengono rappresentate in un sistema cartesiano nel quale l'ascissa e l'ordinata corrispondono rispettivamente alla variabile ambientale e al grado di idoneità espresso fra 0 e 1.

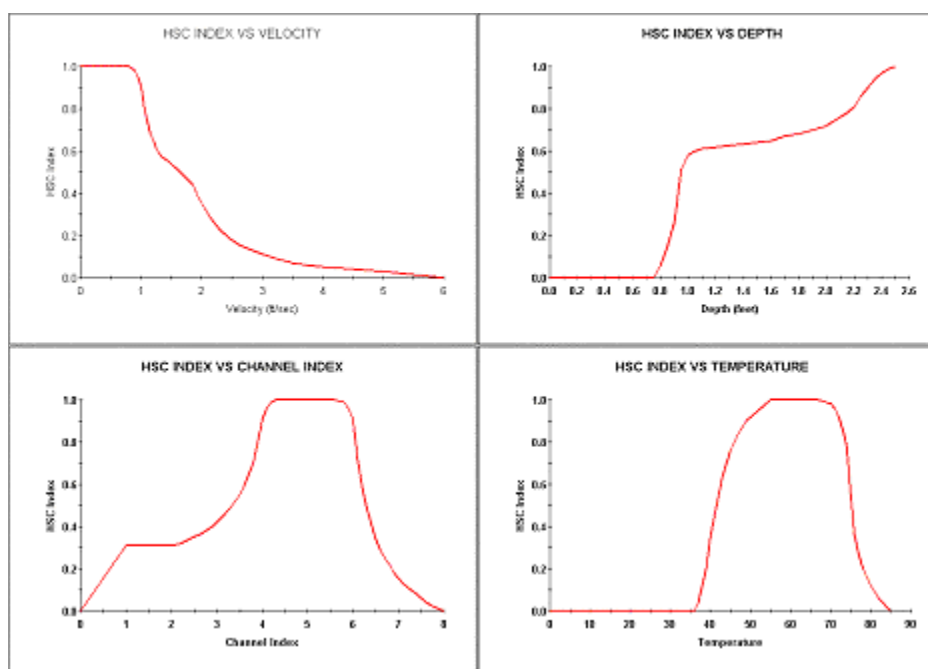


Figura 123 - Esempio di curve di idoneità. Sono presi in considerazione parametri quali velocità, profondità, Channel Index ed anche temperatura (unico parametro non appartenente al microhabitat). Da Waddle, T.J., 2001

Il grado di idoneità del parametro utilizzato nella costruzione della curva è solitamente identificabile secondo tre diversi intervalli (Thomas & Bovee, 1993):

- intervallo *ottimale*: è ottimale il range di parametro con preferenza maggiore/uguale a 0,7;
- intervallo *utilizzabile*: si tratta di un intervallo non ottimale ma comunque gradito e corrisponde al range di parametro con preferenza variabile fra 0,2 e 0,7. L'intervallo comprendente l'habitat ottimale e quello utilizzabile (osservazioni di pesci fino al 95% oppure con preferenza maggiore/uguale di 0,2) è definito *idoneo*;
- intervallo *non utilizzabile* o *non idoneo*: con preferenza inferiore a 0,2.

I criteri biologici per la costruzione delle curve di preferenza sono primariamente indirizzati a quei parametri dell'ambiente acquatico legati alla distribuzione della fauna ittica e sono direttamente collegati al flusso della corrente e alla morfologia dell'alveo: profondità, velocità, temperatura e *channel index* (copertura di fondo e substrato). Quest'ultimo parametro è solo indirettamente collegato al flusso di corrente, ma riveste notevole importanza nell'ecologia delle varie specie.

L'assunzione di base è che l'abbondanza, così come la distribuzione di ciascuna specie non sono influenzate dai singoli parametri del corso d'acqua, ma sono dipendenti, in misura diversa, da tutti i parametri idraulici del corso d'acqua stesso e soprattutto dalla loro interazione. I singoli individui di ciascuna specie tenderanno a selezionare le migliori condizioni per la loro sopravvivenza all'interno dell'ecosistema acquatico, ma sfrutteranno anche zone con condizioni meno favorevoli con utilizzo decrescente delle medesime zone con il peggiorare delle condizioni ambientali. Grazie quindi alle trasformazioni di variabili idrauliche rispetto a parametri biologici determinati (densità, produzione, successo riproduttivo, strutture di popolazione, riproduzione etc.) è possibile ottenere una rappresentazione grafica del grado di preferenza di una certa specie ittica per uno o più parametri ambientali già descritti in precedenza.

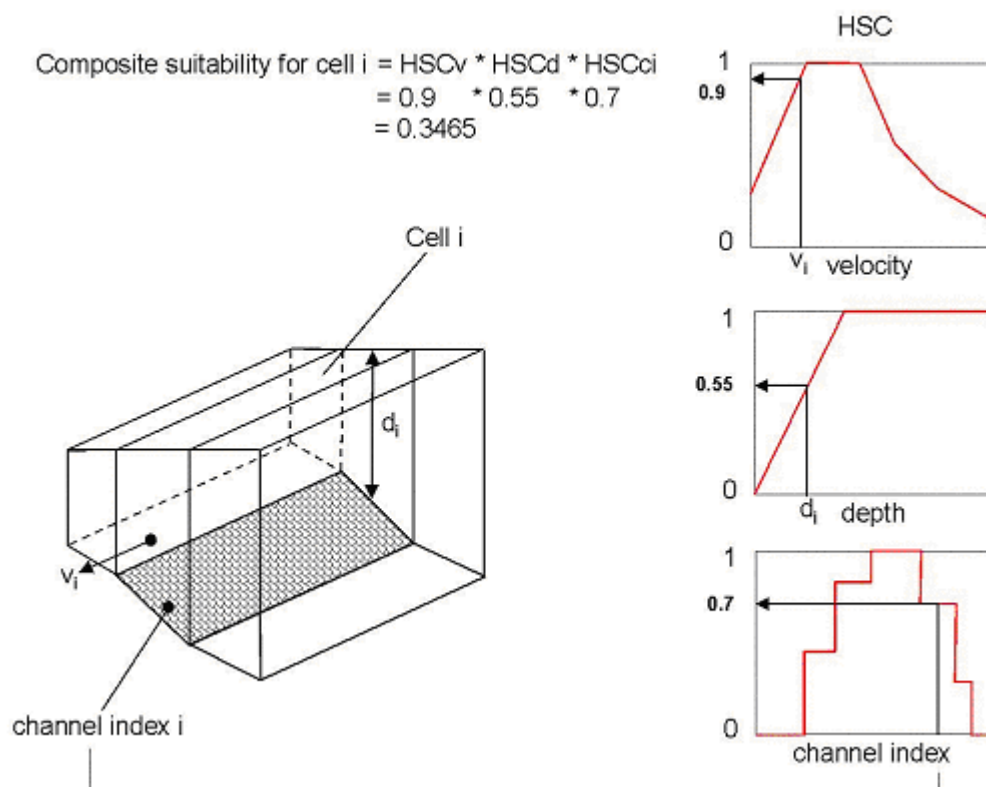


Figura 124 - Relazione esistente tra cella e curve di idoneità. Da Waddle, T.J., 2001

In generale le curve di idoneità sono classificate secondo tre distinte categorie che ne descrivono le metodologie di creazione (Bovee *et al.*, 1998):

- **Categoria 1:** appartengono a questa categoria le curve ricavate dalla letteratura o dal giudizio dell'esperto, derivanti cioè dalla conoscenza dell'esperto, accumulata nel tempo, sull'ecologia delle specie ittiche prese in esame oppure da dati riscontrati in letteratura.
- **Categoria 2:** ne fanno parte le curve derivate direttamente dall'osservazione diretta sull'utilizzo dell'habitat da parte delle specie nelle varie fasi vitali, segnalando quindi la presenza-assenza dei vari individui al variare dei valori di microhabitat.
- **Categoria 3:** a questa categoria appartengono quelle che vengono definite "curve di preferenza dell'habitat". Sono curve elaborate grazie a dati ottenuti dall'osservazione diretta (sul campo) sull'uso dell'habitat, che verranno poi messi in relazione alla reale disponibilità di tale habitat per l'intero corso d'acqua.

Non avendo a disposizione una gamma esaustiva di tali curve elaborate su base sperimentale soprattutto in riferimento alle specie caratterizzanti i corsi d'acqua della nostra penisola sono state utilizzate curve costruite su base teorica, utilizzando dati in parte bibliografici od ottenuti sul campo, in parte elaborati sulla base dell'esperienza professionale. In particolare sono state modificate o elaborate, *ex novo*, le curve d'idoneità che prendevano in considerazione i due parametri ambientali ritenuti più importanti per l'ecologia delle specie ittiche presenti nel Fiume Sieve.

L'habitat favorevole si traduce in Area Disponibile Ponderata (ADP) della parte di sezione bagnata considerata, che sarà a sua volta indispensabile nel calcolo del Deflusso Minimo Vitale. L'ADP è un valore che viene prodotto direttamente dal

PHABSIM; è infatti una misura che utilizza la combinazione di quantità e qualità del Microhabitat per esprimere unità di area di Microhabitat disponibile. Utilizzando curve di idoneità univariate, l'ADP calcolato è solo un indice, che non può essere misurato direttamente, anche se, utilizzando differenti metodi di aggregazione degli indici di idoneità si possono fare differenti stime di ADP (Morhardt & Mesick 1988).

Le curve ADP/Portata esprimono la variazione della "quantità di habitat" disponibile per la specie ittica e per lo stadio vitale di riferimento, al variare della portata.

Tale "quantità di habitat" è riferita evidentemente alle sole aree caratterizzate dalle condizioni idrauliche (tiranti e velocità) e di substrato considerato nel metodo.

Sono escluse pertanto le zone di rifugio eventualmente non caratterizzate da un punto di vista idraulico (zone di sponda, detriti in alveo ecc.) e le zone con morfologie particolari (pools di grandi dimensioni) che normalmente non sono inserite nei tratti di monitoraggio e analisi idraulica per problemi di carattere logistico nell'esecuzione dei rilievi e di significatività delle simulazioni numeriche.

In questo caso tale metodologia può fornire risultati non corrispondenti a pieno alla realtà fisica, risultando quindi conservativi sul piano ambientale.

Le curve ADP/Portata vengono normalmente utilizzate per valutare le portate di deflusso minimo vitale conseguenti a determinate ipotesi di riduzione della quantità di habitat ottimale (espressa dal massimo della curva o da punti caratteristici nel campo delle portate di regime idrologico medio).

Nel secondo caso la riduzione di habitat viene espressa schematicamente assumendo percentuali ridotte di ADP (normalmente comprese nel campo 40÷80% del valore ottimale).

Fisicamente tale riduzione corrisponde alla diminuzione della superficie delle zone d'alveo idonee alla manifestazione delle funzioni vitali della specie ittica considerata, che viene espressa come dato assoluto (area in m²) o come percentuale della superficie d'alveo bagnata complessiva.

Una volta ottenuta la curva di riferimento che mette in relazione la portata con l'habitat disponibile, si passa all'individuazione di un possibile valore di deflusso minimo vitale, riferendosi ad uno dei criteri fra quelli più comunemente utilizzati in letteratura, il metodo del break-point. Tale metodo (Milhous *et al.*, 1989) rappresenta il punto di evidente cambiamento di pendenza della curva dell'habitat-portata ed è particolarmente idoneo per l'interpretazione di curve in cui tale cambiamento sia particolarmente evidente. Concettualmente il punto di "rottura" rappresenta il confine tra una situazione in cui al crescere della portata, l'ADP aumenta in modo sostanziale, ed una situazione in cui ulteriori incrementi di ADP sono ottenuti solo con un notevole aumento delle portate, anche se oltre un determinato valore di portata l'ADP rimane costante. In un'ottica costi-benefici, il punto di "rottura" individua quindi il valore di portata per il quale potrebbe essere raggiunto il migliore compromesso tra le esigenze di tutela ambientale e quelle di natura economica.

La metodologia per il calcolo della portata biologica di riferimento è basata in parte su dati rilevati in campagna, in parte su dati ottenuti per via modellistica. In particolare i valori di ADP derivanti completamente da rilievo di campagna sono quelli relativi alla Sieve e agli idrometri di Era, Elsa, Greve, Arno (monte confluenza Sieve), Bisenzio.

Valore di riferimento di Area Disponibile Ponderata

In funzione della carta delle vocazioni ittiche, per ogni sezione di riferimento sui singoli bacini idrografici è stata individuata una *specie target* che, per le sue caratteristiche, ben rappresenta le esigenze delle altre specie ittiche presenti nel reticolo idraulico omogeneo.

Per le specie target l'analisi è stata condotta tracciando le curve di ADP in funzione della portata, ove possibile per ognuno degli stadi vitali della specie stessa. La metodologia di sintesi adottata ha previsto quindi la valutazione di una *curva di inviluppo inferiore* come sintesi degli stadi vitali di una stessa specie.

Per la definizione della portata ottimale il valore di ADP percentuale a cui si è fatto riferimento è il 30%. Questo valore risulta nella parte bassa della fascia di sopravvivenza della popolazione ittica, che ben si presta ad una valutazione delle condizioni minime in alveo riferite ad un periodo di magra.

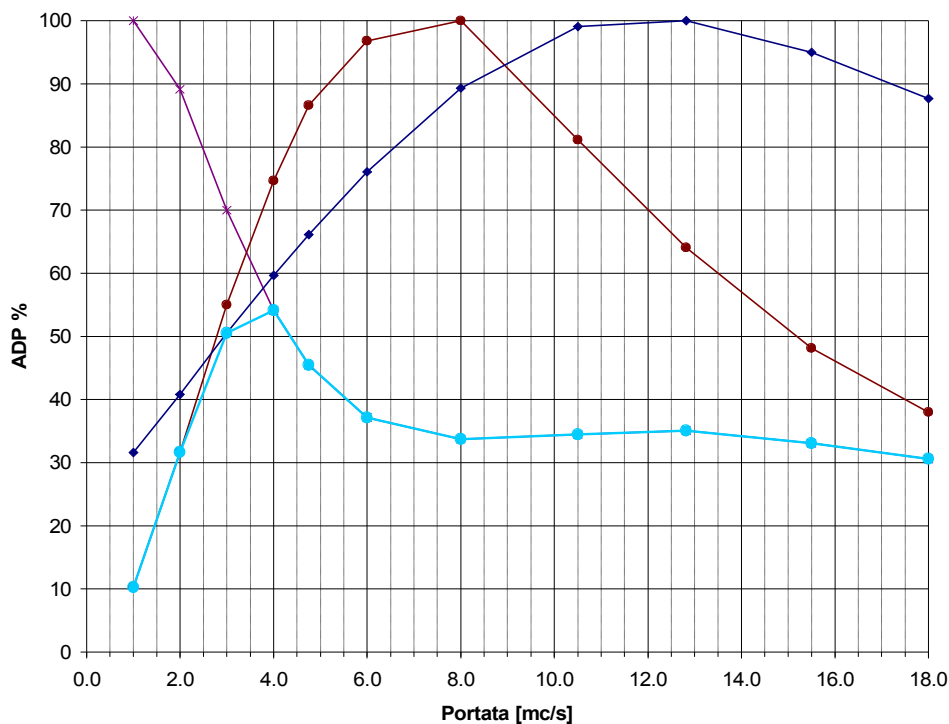


Figura 125 - Esempio di curva di ottimizzazione dell'ADP per inviluppo inferiore (in azzurro).

Il modello numerico per l'applicazione dell'IFIM

Successivamente alle campagne di misura per l'applicazione sperimentale del metodo IFIM, è stato messo a punto un modello numerico *ad hoc* che, sulla base di uno schema idraulico monodimensionale e sui parametri della popolazione ittica di riferimento per ogni tratto del reticolo idraulico esaminato, ha permesso di valutare in maniera speditiva il valore di portata biologica ottimale in corrispondenza di diverse sezioni di chiusura del reticolo idraulico.

Lo schema concettuale parte dal modello idraulico utilizzato per la stima delle grandezze idrodinamiche necessarie al calcolo dell'adattamento dell'ittiofauna. Ricopre una certa importanza, nel calcolo idraulico, la scelta della sezione trasversale da cui si ereditano i parametri idraulici; infatti tale sezione contiene le caratteristiche morfologiche e idrauliche idonee a rappresentare la morfologia e il comportamento idraulico dell'intero tratto. L'analisi del moto del fluido attraverso la sezione è stata effettuata suddividendo la stessa in settori di pari dimensione trasversale in modo da replicare l'assunto di base del metodo IFIM il quale riferisce il calcolo dell'idoneità alle celle che compongono trasversalmente la sezione. Definita quindi la sezione rappresentativa e ottenuti i valori delle grandezze idrauliche necessari (battente idraulico locale e velocità media della corrente), per mezzo delle curve di idoneità sono state calcolate le curve di Area Disponibile Ponderata per la specie ittica di riferimento.

(specie target) e quindi, mediante il metodo dell'involuppo inferiore, la curva finale di ADP.

Da un punto di vista idraulico la valutazione dell'ADP viene eseguita per un regime di magra, caratterizzato quindi da bassi valori di portata aventi una certa permanenza. Per tale motivo l'approccio modellistico utilizzato prescinde dalla necessità di descrivere un fenomeno in rapida evoluzione mediante un modello in moto vario e, superando l'approssimazione dovuta a schematizzazioni in moto uniforme, imposta la risoluzione del problema idraulico su un sistema di corrente a superficie libera in moto permanente.

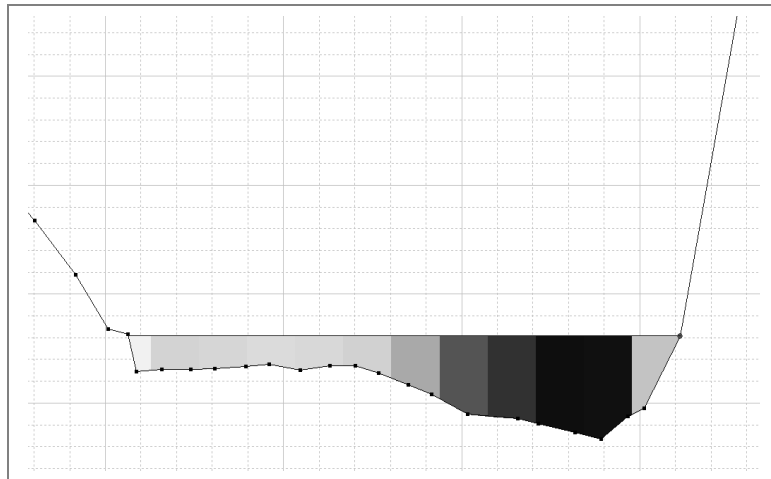


Figura 126 - Esempio di profilo trasversale di velocità (in scala di grigio, più scuro per valori crescenti) relativo alla suddivisione in settori di una sezione del Fiume Sieve.

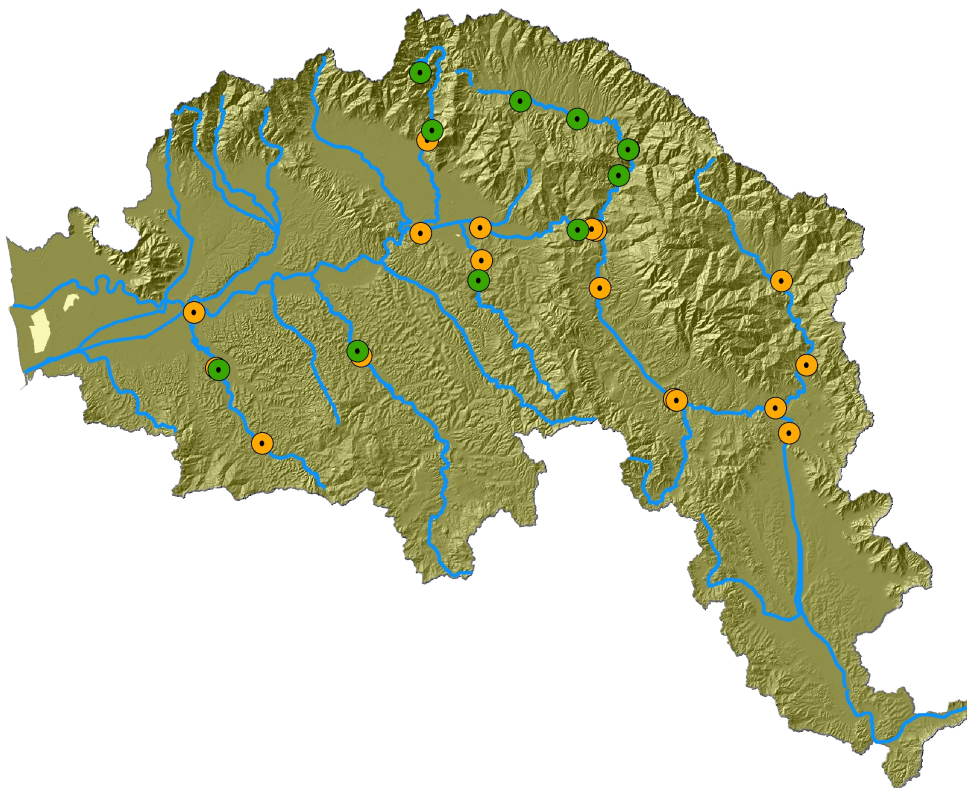


Figura 127 - Sezioni per le quali è stato applicato il metodo IFIM. In verde le sezioni in cui sono state eseguite le campagne sperimentali

Nell'utilizzo del modello numerico per l'applicazione del metodo IFIM sono state escluse alcune delle sezioni significative in quanto appartenenti a tratti fortemente modificati. In particolare si tratta di elementi del reticolo idrografico completamente artificiali (il Canale Scolmatore d'Arno, il Canale Usciana, i canali di bonifica) o di tratti che hanno ricevuto una forte impronta antropica. Sui primi, il transito fortemente intermittente dei deflussi allontana il concetto di naturalità intrinseco nel metodo IFIM; sui secondi, invece, la morfologia antropizzata, spesso legata alla necessità di adeguamento dei tratti di rigurgito degli affluenti d'Arno, porta a risultati del calcolo idraulico incompatibili con l'analisi di adattamento dell'ittiofauna. Ciò in relazione al fatto che i caratteri dell'antropizzazione, in termini di battente idraulico e velocità di corrente, conduce, nel calcolo degli indici di adattamento, a risultati numerici evidentemente distorti e non applicabili *tout court* senza lunghe campagne di osservazione e di rilevamento delle effettive condizioni della fauna ittica.

A tale proposito, osservando il confronto grafico (istogramma in scala logaritmica) tra i valori degli indici idrologici di magra e la portata biologica, si rileva una buona corrispondenza tra $Q_{7,2}$ e Q_{bio} ad eccezione dell'Ambra, del Valdarno a Firenze e dell'Era alla chiusura. Quest'ultime difformità testimoniano quanto su detto e, in particolare, per Era e Ambra, la portata biologica risente delle modificazioni morfologiche apportate al tratto di alveo ai fini della messa in sicurezza idraulica; il caso dell'Arno a Firenze è da imputare a valori di battente idraulico e velocità della corrente dovuti alla presenza delle pescaie sull'intero tratto di fiume. In quest'ultimo caso la combinazione di battenti idraulici elevati e velocità prossime allo zero producono un valore della portata biologica non rappresentativo delle condizioni di adattamento dell'ittiofauna.

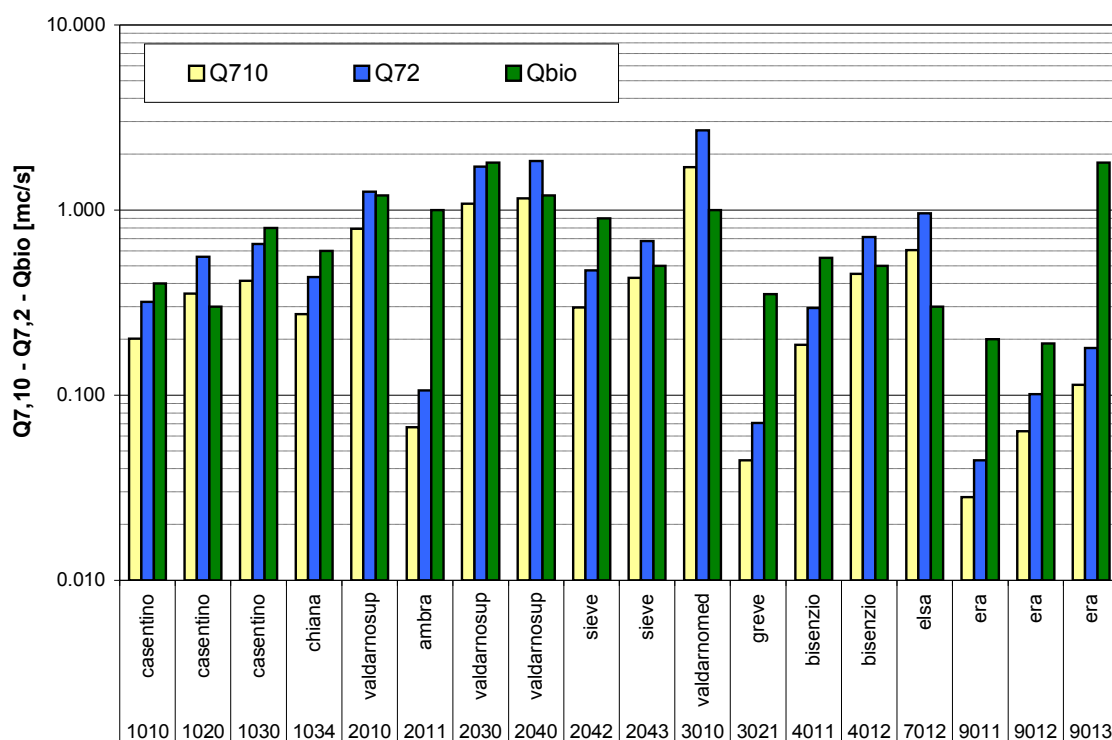


Figura 128 - Confronto tra $Q_{7,10}$, $Q_{7,2}$ e Q_{bio}

Analisi delle Pressioni – acque superficiali

Impostazione generale

I dati di prelievo o immissione da/in acque superficiali sono stati acquisiti ed elaborati in modo finalizzato all'alimentazione della modellazione afflussi-deflussi denominata MOBIDIC, utilizzata per redigere il bilancio delle acque superficiali. In tale ottica ogni punto di utilizzo è corredato, tra l'altro, da:

- utilizzo della risorsa prelevata;
- coordinate geografiche del punto di prelievo/restituzione;
- portata massima del prelievo (positiva) o della restituzione (negativa);
- efficienza dissipativa del prelievo (cioè rapporto tra quantità effettivamente consumata e quantità prelevata);
- data di inizio del prelievo.

Nella raccolta e selezione dei dati si è scelto di perseguire, per quanto possibile, la composizione di una "fotografia" attuale dello stato di utilizzo delle acque fluviali, coerente con la scala di osservazione prescelta per il bilancio idrico, sia in termini spaziali (le sezioni significative), sia in termini temporali (portate medie giornaliere sul periodo 1993-2006).

In considerazione di ciò e tenendo conto delle difficoltà connesse con l'acquisizione di dati riguardanti l'intero periodo suddetto, si è optato per l'acquisizione, da ogni singola fonte, dei dati riguardanti i prelievi in essere in un certo momento, pur corredando ogni punto di presa/restituzione con l'indicazione dell'anno di acquisizione dei dati presso i competenti enti (nella quasi totalità dei casi l'anno di aggiornamento risulta compreso tra il 2005 ed il 2007). La data di inizio dei prelievi è stata quindi posta convenzionalmente coincidente con il 01.01.1993.

Operando in tale modo, e considerato il carattere medio di gran parte dei dati acquisiti (per esempio dati di concessioni idriche o di rilasci dai depuratori), l'insieme dei punti di utilizzo ricavato può ragionevolmente essere considerato una fotografia dello stato delle pressioni antropiche sul sistema naturale negli anni recenti, mantenendo altresì una certa "maneggevolezza" o agilità del dato stesso rispetto a successivi aggiornamenti.

Per punti di utilizzo di acque superficiali si sono intesi tutti i punti di prelievo/immissione che agiscono sia direttamente sui corpi idrici superficiali, sia indirettamente, tramite bacini sotterranei connessi comunque in maniera stretta con il deflusso superficiale. Pertanto sono state considerate le 4 tipologie di punti di utilizzo riportate nella tabella seguente.

Punti utilizzo	Relazione con acque superficiali	Numero di records
derivazioni di acqua superficiale (concessioni o licenze di attingimento)	prelievo diretto	2605
captazione di sorgenti	prelievo indiretto	2110
emungimento da pozzi di sub-alveo	prelievo indiretto	15733
impianti di depurazione principali	restituzione diretta	2318
TOTALE		22766

Tabella 61 – Tipologie di punti di prelievo/restituzione di acque superficiali

Fonte dei dati ed elaborazione generale

I dati originali sono quelli appositamente trasmessi a questa Autorità di Bacino dai diversi enti dotati di un archivio delle tipologie di presa riportate al paragrafo precedente, con particolare riferimento a:

- Autorità di Ambito Territoriali Ottimali e Gestori del Servizio Idrico Integrato, limitatamente ai prelievi di qualsiasi tipo (derivazioni, sorgenti, pozzi), ad uso acquedottistico;
- Amministrazioni Provinciali, relativamente a derivazioni, sorgenti e pozzi ad uso diverso dall'acquedottistico;
- Regione Toscana/ARPAT, relativamente ad impianti di depurazione di acque reflue.

La scelta di acquisire i dati sui prelievi acquedottistici direttamente da AATO e Gestori del SII è dettata da una situazione attuale in cui non tutti i prelievi risultano regolarmente concessi.

COD	Codice assegnato al punto di prelievo/rilascio dall'ente che trasmette il dato
USO	Usi cui è destinato il prelievo/rilascio
Y_AGG	Anno cui si riferisce il dato trasmesso
FONTE	Ente che trasmette il dato
VOL_Y	Dato quantitativo espresso alternativamente, nel dato originariamente trasmesso, in termini di volume annuo [mc/a] o di portata massima [mc/s]
Q_MAX	
TIPO_OPERA	Tipologia dell'opera di prelievo/rilascio: derivazione superficiale, sorgente captata, pozzo di subalveo, impianto di depurazione acque reflue
ID_TRATTO	Limitatamente ai pozzi di sub-alveo: id del tratto di corpo idrico superficiale cui è stato attribuito il pozzo nell'individuazione dei pozzi probabilmente interferenti con il deflusso superficiale
DENOM	Denominazione dell'impianto di depurazione o altra opera
PERC_INDUS	Limitatamente agli impianti di depurazione: % di reflui industriali trattati sul totale del refluo trattato
EPSILON	Efficienza dissipativa : 0=totale restituzione in loco, 1=totale dissipazione
ATO	Ato di pertinenza del punto di prelievo/rilascio
PROVINCIA	Provincia di pertinenza del punto di prelievo/rilascio
BETA_MEDY	Portata media annua del prelievo/rilascio sulla base della legge d'uso assegnata [coefficiente della Qmax_Is]
X	Coordinata est gb
Y	Coordinata n gb
BETA_MED_E	Portata media nel periodo giu-set del prelievo/rilascio sulla base della legge d'uso assegnata [coefficiente della Qmax_Is]
TIPO_PR_SU	Limitatamente alle derivazioni superficiali: derivazione in concessione (D) o attingimento (A)
ID_CRITICO	Codice della sezione significativa nel cui interbacino ricade il punto di prelievo/rilascio
LEGGE_USO	Codice della legge d'uso assegnata
AREA_IRRIG	Areale irriguo (valdichiana, ombrone pistoiese, valdinievole, costa, interno) in cui ricade il punto di prelievo/rilascio
PR_NET_EST	Portata media nel periodo giu-set del prelievo/rilascio sulla base della legge d'uso assegnata e della Qmax_Is [mc/s]
QMAX_LS	Portata massima del prelievo/rilascio in l/s
CODICE_MD	Codice progressivo del punto di prelievo/rilascio
COD_BILANC	Codice dell'interbacino in cui ricade il prelievo-rilascio

Tabella 62 – Attributi dello strato informativo puntuale includente i punti di prelievo/restituzione di acque superficiali

I dati acquisiti, nella loro totalità, risultavano disomogenei sotto molteplici aspetti, per cui si è resa necessaria un'opera di elaborazione ed omogeneizzazione delle diverse

banche dati geo-referenziate. Si è così prodotto un unico strato informativo, i cui campi sono riportati nella tabella precedente.

Particolarità sui prelievi da pozzi di sub-alveo

Tra i pozzi di sub-alveo si sono fatti rientrare tutti i punti di prelievo, già inclusi ed elaborati nell'archivio del bilancio delle acque sotterranee, per i quali si possa ritenere probabile una interazione degli emungimenti con le portate di corsi d'acqua superficiali. Pertanto, può trattarsi di pozzi che interessano effettivamente il sub-alveo di un corso d'acqua, come anche di pozzi scavati in corpi alluvionali idraulicamente connessi con il sub-alveo dello stesso corso d'acqua.

L'inclusione di tale tipologia di prelievo nel bilancio idrico costituisce uno dei necessari punti di contatto tra bilancio acque superficiali e bilancio acque sotterranee: in diverse zone del bacino sono note situazioni in cui l'impoverimento delle portate estive è imputabile in maniera sensibile ai prelievi da pozzo, prelievi che, per loro natura, proseguono anche nei periodi in cui il letto fluviale si prosciuga, andando in tal modo ad incrementare il numero annuo di giorni in cui la portata in alveo è nulla o comunque inferiore a quella di DMV.

È stato pertanto individuato un ambito geografico in cui si considera probabile l'interazione suddetta, assumendo, ai fini del bilancio, che tutti i pozzi risultanti dai dati di pressione sulle acque sotterranee vengano utilizzati nel periodo estivo secondo definite leggi d'uso, per i volumi annui assegnati, e che la portata prelevata sia sottratta totalmente dal corpo idrico superficiale prossimale.

Sono stati considerati interagenti con le acque superficiali tutti i pozzi di qualunque tipo e profondità scavati in aree di affioramento di alluvioni recenti, distanti fino a 500 m da tutti tratti di corpi idrici superficiali caratterizzati da ordine Strahler ≥ 5 , con l'aggiunta del T. Virginio (in quanto sede di significativi emungimenti da sub-alveo noti).

All'interno di tale criterio generale, puntando a computare quantitativi prelevati realistici in ambiti di interazione probabile, sono state inoltre effettuate le seguenti esclusioni:

- interi sottobacini per i quali si può verosimilmente escludere un'interazione pozzi/acque superficiali su base idrogeologica, o comunque in cui i prelievi da pozzo si impostano preferibilmente su livelli profondi (es. Valdichiana);
- corpi idrici il cui corso è stato rimodellato a fini di bonifica, con sviluppo presumibilmente scarso del fenomeno del sub-alveo (es. T. Calice);
- porzioni vallive di corpi idrici per le quali non risulta tale interazione, pur essendo presente il fenomeno del sub-alveo nelle porzioni montane o pedemontane (es. T. Ombrone a valle di Pistoia);
- tratti di corpi idrici per i quali i prelievi da sub-alveo, pur possibili, risultano di scarsa influenza sul bilancio delle acque superficiali (es. F. Arno a valle della confluenza del F. Elsa).

Particolarità sulle restituzioni dai principali impianti di depurazione di acque reflue

Sono stati considerati in tale tipologia di punti di restituzione tutti gli impianti di depurazione trattanti qualsiasi tipologia di acqua reflua, con l'esclusione di quelli a potenzialità inferiore a 500 abitanti equivalenti. Tale esclusione è stata operata a fini di semplicità di trattamento e visualizzazione, previa verifica della scarsa rilevanza della selezione stessa sui dati quantitativi cumulati.

Da notare che anche tramite tali punti si realizza il legame bilancio acque superficiali - bilancio acque sotterranee, in quanto il ciclo delle acque di falda prelevate tramite pozzi si chiude, esclusa l'aliquota di dissipazione, come restituzione in corpi idrici superficiali.

Dati di utilizzo

Ad ogni punto di prelievo (derivazione superficiale, captazione sorgente, pozzo sub-alveo) è stato assegnato uno dei seguenti usi, inteso come uso prevalente in termini di portata prelevata al netto della restituzione:

- ACQUEDOTTISTICO
- POTABILE (idropotabile non acquedottistico)
- IRRIGUO (tutte le tipologie, agricolo, o aree a verde)
- PRODUTTIVO (industriale)
- ITTIOGENICO (alimentazione laghetti da pesca)
- IDROELETTRICO_FM (idroelettrico o forza motrice)
- SERVIZI (usi accessori quale igienico, antincendio, lavaggio strade e mezzi)
- DOMESTICO
- VENATORIO (alimentazione stagionale chiari da caccia).

Per ognuno dei punti corrispondenti invece ai principali impianti di depurazione è stata individuata la tipologia prevalente di reflu trattato, URBANO o INDUSTRIALE.

Prelievi e restituzioni sono caratterizzati in generale da una portata variabile nel tempo; tale condizione è stata schematizzata tramite l'assegnazione di una legge d'uso ad ogni punto basata su coefficienti mensili di portata (β mensili) rispetto al dato di portata massima, pertanto schematizzando gli utilizzi come portate medie costanti su base mensile.

Per l'uso irriguo la legge d'uso è stata assegnata anche su base geografica, individuando 5 leggi per altrettanti areali irrigui distinti in base a:

- tipologie colturali irrigue, ben delineate e sviluppate, con forte impatto sulle risorse idriche (Valdichiana, Ombrone P.se/vivaismo, Valdnievole/florovivaismo);
- suddivisione del rimanente territorio in due fasce climaticamente omogenee in relazione all'irrigazione agricola.

L'elenco delle leggi d'uso ricavate, unitamente ai loro coefficienti β mensili, ed ambiti di applicazione, è riportato nella tabella successiva e schematizzati nella figura seguente.

Da notare che, mentre per la maggior parte degli usi la portata massima rappresenta un dato sufficientemente rappresentativo del prelievo effettivo (β mensile = 1), per gli usi irriguo e venatorio (alimentazione dei cosiddetti "chiari" da caccia) il dato di portata massima, o portata concessa, è caratterizzato da un'alea molto rilevante qualora si voglia da esso estrapolare l'effettivo prelievo in assenza di misure.

Prelevi ad uso irriguo

Dato il peso in termini di prelievo che l'irriguo riveste per molti sottobacini, una speciale attenzione è stata posta nella distribuzione mensile del prelievo, cioè sulla calendarizzazione. Essa è stata ricavata a partire dal fabbisogno annuo e dall'estensione delle varie colture, su base comunale, arrivando a ricavare il modo in cui il prelievo totale si distribuisce sui vari mesi nei diversi areali, espresso tramite coefficienti irrigui mensili.

Codice legge d'uso	Definizione	Applicazione	Coefficienti β mensili												Coeff. β : media annua	Coeff. β : media estate (giu-set)		
			G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D				
1	Prelievo / restituzione costante	Acquedottistico Potabile Idroelettrico Servizi Domestico Depuratori urbani	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0000	1,0000
2	Depuratori industriali	Depuratori industriali	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	1	1	0,9575	0,8750
3	Prelievi industriali	Produttivo	1	1	1	1	1	1	1	0.8	1	1	1	1	1	1	0,9830	0,9500
4	Prelievi Ombrone Pistoiese	Irriguo	0.04	0.04	0.04	0.04	0.29	0.6	0.93	0.61	0.3	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0,2526	0,6100
5	Prelievi Valdinevole	Irriguo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.4	0.93	0.62	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0,1720	0,4900
6	Prelievi irrigui Chiana	Irriguo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.93	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0,1626	0,4833
7	Prelievi irrigui areale entroterra	Irriguo	0	0	0	0	0	0.38	0.93	0.48	0	0	0	0	0	0	0,1510	0,4475
8	Prelievi irrigui areale costa	Irriguo	0.01	0.01	0.01	0.04	0.37	0.7	0.93	0.29	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0,2017	0,4825
9	Prelievi venatori	Venatorio	0	0	0	0	0	0.25	0.75	1	0.75	0	0	0	0	0	0,2308	0,6875

Tabella 63 – Prelievi/restituzioni da acque superficiali: leggi d'uso utilizzate

Inoltre, tenuto conto che nella modellazione le portate medie mensili corrispondono ad una aliquota della portata massima istantanea, è stato necessario stimare un valore ragionevole del rapporto tra portata istantanea massima e portata media nel mese di massimo consumo (corrispondente per il bacino del F. Arno al mese di Luglio). A tale scopo è risultato utile esaminare la legge d'uso n° 10 risultante nello studio "Modellistica idrologica per la gestione integrata delle risorse idriche del bacino dell'Arno e tutela dell'habitat fluviale in relazione al Deflusso Minimo Vitale" redatto per questa Autorità di Bacino dal Prof. Ing. Lucio Ubertini (ved. Appendice 1); tale legge mette in relazione un valore di portata massima istantanea con le portate stimate giornaliere nella stagione irrigua, ed il rapporto di cui sopra assume valore 0.93. Tale valore è pertanto assegnato al coefficiente β del mese di luglio. I valori degli altri β mensili sono computati di conseguenza come segue:

$$\beta \text{ mese}_i = (\text{coeff. irriguo mese}_i / \text{coeff. irriguo mese}_{\text{LUGLIO}}) * 0.93.$$

Si rimanda al capitolo 2 (Quadro conoscitivo - L'Agricoltura e la Zootecnia) per i dettagli sulla metodologia utilizzata.

COEFFICIENTE IRRIGUO MENSILE (del fabbisogno annuo totale)					
areale	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5
mese	OMBRONE	VALDINIEVOLE	VALDICHIANA	BACINO ENTROTERRA	BACINO COSTA
G	0.014	0.007	0.000	0.000	0.004
F	0.014	0.007	0.000	0.000	0.004
M	0.014	0.007	0.000	0.000	0.004
A	0.014	0.007	0.000	0.000	0.016
M	0.096	0.007	0.000	0.000	0.157
G	0.199	0.195	0.310	0.214	0.292
L	0.308	0.446	0.479	0.516	0.387
A	0.203	0.296	0.211	0.270	0.120
S	0.098	0.007	0.000	0.000	0.004
O	0.014	0.007	0.000	0.000	0.004
N	0.014	0.007	0.000	0.000	0.004
D	0.014	0.007	0.000	0.000	0.004

Tabella 64 – Coefficienti irrigui mensili

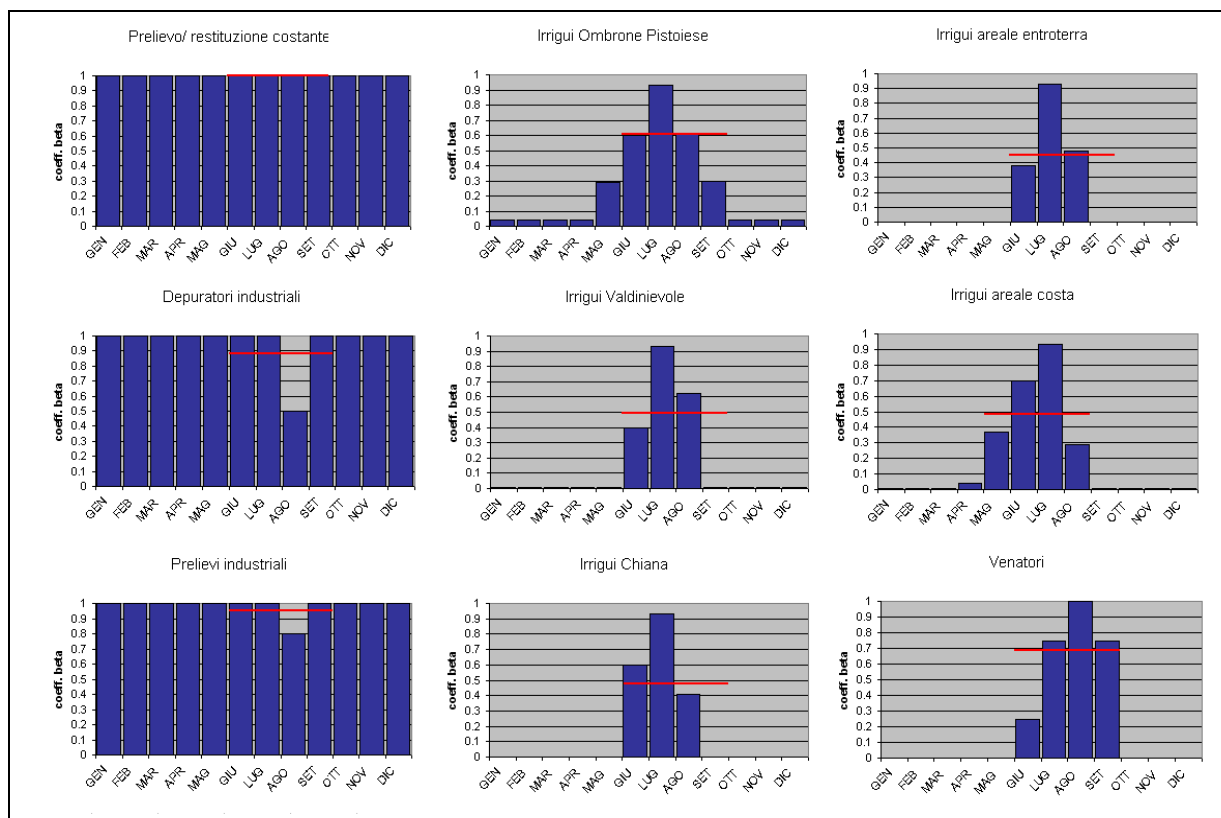


Figura 129 - Prelievi/restituzioni da acque superficiali: leggi d'uso utilizzate. In blu: coefficiente β mensile, in rosso: coefficiente β medio sul periodo estivo

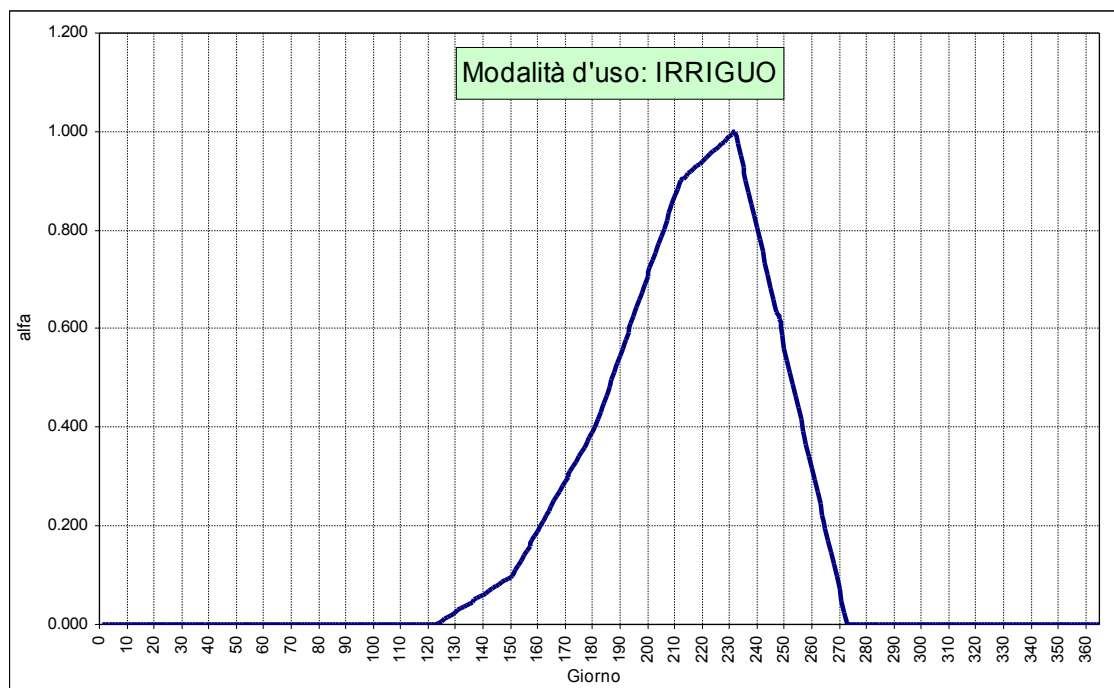


Figura 130 - Legge d'uso per prelievi irrigui basata su portate giornaliere

Prelievi ad uso venatorio

Per quanto riguarda i prelievi venatori, essi risultano significativi soltanto per l'interbacino "Usciana confluenza con Arno", e caratterizzati da forti prelievi di breve

durata distribuiti mediamente sui mesi di luglio, agosto, settembre, e in minor misura di giugno.

Poiché il prelievo viene comunque schematizzato come prelievo continuo medio sul mese, la legge d'uso è stata elaborata a partire da stime dei fabbisogni effettivi medi confrontati con i dati medi della portata massima richiesta. I fabbisogni sono stati a loro volta stimati a partire dalla superficie dei laghi e dai dati medi di temperatura.

Usi dissipativi ed usi conservativi

I prelievi sono inoltre caratterizzati, in quanto a dissipazione della risorsa, dalle seguenti tipologie assegnate anch'esse sulla base dell'uso:

- a) totalmente conservativi: caratterizzati da rilascio pressoché totale dell'acqua prelevata;
- b) totalmente dissipativi: caratterizzati, ai fini del bilancio idrico, da completa dispersione dell'acqua prelevata tramite consumo o evaporazione, e perciò da rilasci nulli in corpi idrici superficiali.

Il caso a) è applicato per gli usi idroelettrico, forza motrice, ittiogenico, considerati pertanto, ai fini del bilancio idrico alle sezioni significative, come usi totalmente "trasparenti", i cui effetti si esplicano solo alla scala locale, sui tratti compresi tra presa e restituzione.

Nel caso b), applicato a tutti i rimanenti usi, solo per l'irriguo si ha una dissipazione pressoché totale nella realtà. Tuttavia il raggruppamento in un'unica tipologia è giustificato dal fatto che anche negli altri casi (es.: produttivo o potabile) il rilascio avviene in prevalenza in reti fognarie recapitanti ad impianti di depurazione. Perciò si è preferito assegnare al punto di prelievo un rilascio nullo "in loco", quantificando direttamente l'acqua restituita in modalità cumulata in corrispondenza degli impianti stessi.

Il rilascio è schematizzato tramite l'assegnazione ad ogni punto di prelievo/restituzione del coefficiente ε :

$$\varepsilon = 0 \text{ per totale rilascio, } \varepsilon = 1 \text{ per totale perdita.}$$

L'elaborazione delle leggi d'uso di cui sopra è stata effettuata puntando ad ottenere un maggior dettaglio negli usi dissipativi rispetto a quelli conservativi, considerato il rispettivo contributo fornito al bilancio idrico a scala di bacino o di sottobacini.

Dati di portata

Dato un certo uso, l'incidenza di ogni punto di utilizzo è quantificata tramite un dato di portata massima di prelievo/restituzione: è questo il dato di partenza tramite cui la legge d'uso adottata modula l'entità dell'utilizzo durante l'anno.

Forma del dato quantitativo

Tale dato è stato ricavato tramite metodiche diverse in ragione del fatto che il dato quantitativo fosse disponibile, alternativamente, in termini di portata massima o di volume annuo medio. Nella seguente tabella si vede la forma in cui il dato stesso è stato fornito nei vari casi.

Tipologia presa	Fonte	Tipo/uso	Dato quantitativo	N° dati
Sorgente	Aato		Volume annuo	1244
Sorgente	province		Portata massima	866
Superficiale	Aato		Volume annuo	88
	Provincia PI		Volume annuo	64
	Provincia LU		Portata massima	197
	Provincia AR	Attingimenti	Volume annuo	264
		derivazioni	Portata massima	149
	Provincia PT		Portata massima	662
	Provincia PO	Irrigui	Portata massima	13
		altri	Volume annuo	31
	Provincia FI	Pro-parte	Volume annuo	183
		Pro-parte	Portata massima	707
	Circ.Emp.Vald.	Pro-parte	Volume annuo	8
		Pro-parte	Portata massima	58
	Provincia SI	attingimenti	Volume annuo	121
		derivazioni	Portata massima	53
Subalveo			Volume annuo	15731
Depuratori			Volume annuo	2336

Tabella 65 – Tipologia di dato quantitativo di prelievo/restituzione

Nel primo caso (dato fornito: portata massima) si è acquisito direttamente il dato fornito. Nel secondo caso (dato fornito: volume annuo) si è applicata la seguente relazione per ottenere una portata massima simulata dal volume annuo passando attraverso il coefficiente medio annuo estraibile dalla legge d'uso assegnata:

$$\text{Portata massima [l/s]} = \text{Volume annuo [m}^3\text{]} / \beta \text{ media annua} / 31536.$$

Elaborazione del dato

In generale ogni gruppo di dati di prelievo/restituzione elaborato ha presentato una incidenza variabile di records privi del tutto del dato quantitativo, corrispondenti in genere ad una reale mancanza del dato di archivio o in una incompleta operazione di archiviazione informatizzata.

Si è perciò cercato per quanto possibile di sostituire i dati mancanti con opportune stime. Ogniqualevolta i records privi del dato quantitativo erano corredati del dato "USO" si è cercato di ricavare un valore medio probabile del quantitativo tramite analisi statistiche dei dati completi, basate sull'uso e sull'ambito geografico, o anche, in certi casi, in relazione ai corsi d'acqua coinvolti.

Nei casi in cui il trattamento statistico risultava impossibile o inaffidabile, oppure risultava assente anche il dato "USO", si è scelto di inserire il prelievo con portata di prelievo/restituzione nulla. Tale scelta ha comportato incidenza significativa solo nel caso della captazione di sorgenti, dato caratterizzato oltretutto da una copertura non completa in alcuni ambiti provinciali; si fa notare comunque che tale tipologia di utilizzo comporta generalmente un impatto piuttosto limitato quantitativamente sulla risorsa superficiale rispetto alle restanti, che, ripetiamo, sono caratterizzate da una buona completezza del dato.

Tabella 66 – Incidenza dei punti di prelievo/restituzione privi del dato quantitativo

TIPO PRESA	N° DATI	N° DATI a Q=0	% dati a Q=0
Prese superficiali	2605	115	4.0
Captazioni sorgenti	2110	246	12.0
Depuratori	2318	8	0.3
Prese subalveo	22015733	29	0.2
Totale punti di utilizzo	22766	398	1.7

Il dato quantitativo viene rappresentato nei diversi archivi e per i diversi records in termini di portata/volume concessa, richiesta, effettiva, media, massima, costante, etc.. In generale si è scelto di dare la priorità a dati volumetrici, ove presenti, o comunque alla tipologia di dato con la maggior copertura all'interno del dato archivio.

L'elaborazione ha comportato in taluni casi significativi, anche la suddivisione di singoli records su punti diversi per i diversi usi, la suddivisione del quantitativo su punti di presa plurimi, o addirittura il posizionamento sul reticolo di punti di attingimento non georeferenziati. In tutti i casi, comunque, l'elaborazione è stata ragionata, spesso supportata dall'assistenza di tecnici dell'Ente fornitore del dato stesso.

Prelievi acquedottistici dal Fiume Arno all'Anconella

Particolare importanza in quanto ad entità dei quantitativi in gioco rivestono le prese di acqua dal F. Arno appena a monte di Firenze, in località Anconella e Mantignano, prese che approvvigionano il potabilizzatore "Anconella". Per la presa dell'Anconella la portata costante di prelievo è stata posta pari a 2,810 m³/s (punto COD=109), secondo quanto risultante dai più recenti dati emersi in sede di Commissione Tutela delle Acque (2007).

Prelievi da pozzi di sub-alveo

I quantitativi derivano direttamente dall'archivio dei pozzi elaborato ai fini del bilancio delle acque sotterranee, in cui ogni punto è corredato di un dato di volume annuo. Per la metodologia di elaborazione del dato quantitativo di tale archivio si rimanda alla lettura dell'apposito capitolo della relazione.

Restituzioni agli impianti di depurazione

Riguardo al dato quantitativo degli impianti di depurazione, è stato utilizzato prioritariamente il dato di portata media su base annua. Ove esso è risultato mancante si è proceduto ad una stima della portata su base statistica fondata sul dato di potenzialità reale allo scarico (AE), o, se mancante anch'esso, di potenzialità massima di progetto (AE), ponendo un dato medio ricavato sulla totalità dei records completi per cui 1 AE equivale a 0.002 l/s (200 l/g). Tale stima risulta possibile, in mancanza di dati diretti, in tutti i casi in cui la percentuale di reflui urbani trattati è prevalente.

Portate prelevate e restituite nel bacino del Fiume Arno

Analizzando i dati di pressione antropica sulle acque superficiali a scala di bacino, espressi in termini di portata media nel periodo giugno-settembre si ricavano le seguenti cifre indicative:

Prelievo da corsi d'acqua, sorgenti, pozzi sub-alveo (al netto di rilasci)	13,9 m ³ /s
Restituzione in acque superficiali da impianti di depurazione	8,1 m ³ /s
Prelievo netto	5,8 m ³ /s

Tabella 67 – Entità degli utilizzi a scala di bacino

È utile inoltre visualizzare i prelievi, esclusi quelli totalmente restituiti, raggruppandoli in ordine alla tipologia di approvvigionamento e di uso, come esposto nelle figure e tabelle seguenti.

Fonte di approvvigionamento	m ³ /s	%
Acque Superficiali	10.0	72
Sorgenti	1.0	7
Subalveo	3.0	21

Tabella 68 – Prelievi per fonte di approvvigionamento a scala di bacino

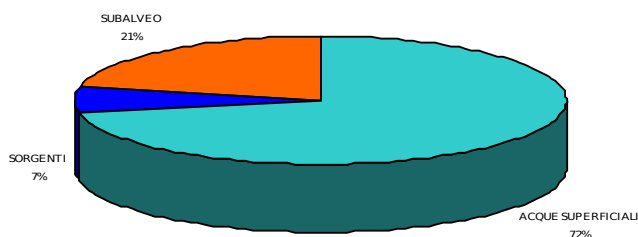


Figura 131 - Prelievi per fonte di approvvigionamento a scala di bacino

I prelievi di sub-alveo sono caratterizzati da una inevitabile incertezza in quanto a delimitazione degli areali interessati, rapporti idrogeologici effettivi con le portate in alveo, difficoltà di modellazione rispetto alle derivazioni superficiali, in quanto prelievi attivi anche con portate in alveo nulle. Tuttavia essi non sono trascurabili nell'economia generale del bilancio idrico del bacino del F. Arno, ed anzi per alcuni sottobacini risultano voce preponderante in quanto alla pressione antropica sul deflusso superficiale.

A loro volta le sorgenti captate sono una voce di prelievo dal deflusso superficiale minoritaria in generale, acquistando però rilevanza in taluni sottobacini montani.

In entrambi i casi, pozzi di sub-alveo e sorgenti captate, gli effetti dei punti di prelievo inseriti nella modellazione sono probabilmente in qualche misura sottostimati.

Tipologia d'uso	m ³ /s	%
Idropotabile	6.8	49
Irriguo	4.1	29
Industriale + Servizi	2.8	20
Venatorio	0.2	1

Tabella 69 – Prelievi per tipologia d'uso a scala di bacino

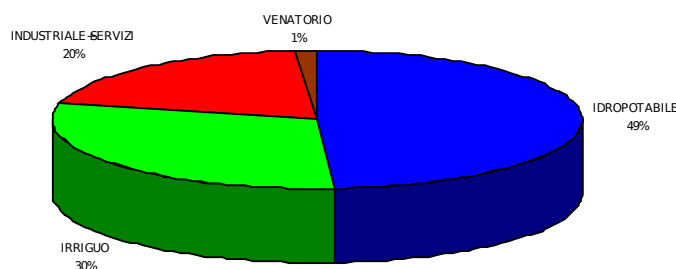


Figura 132 - Prelievi per tipologia d'uso a scala di bacino

Tornando alle cifre generali riportate in apertura al paragrafo, a fronte di un'ingente portata sottratta al naturale deflusso superficiale ($13,9 \text{ m}^3/\text{s}$), è evidente l'alto peso rivestito dal termine "restituzioni" nel bilancio idrico ($8,1 \text{ m}^3/\text{s}$). Preme ricordare, però, che tale termine risulta comunque in stretta relazione con la quantità totale delle acque utilizzate a scala di bacino, ivi comprese le acque emunte da pozzi, anche non di sub-alveo, poiché in generale tutte le acque utilizzate ed in qualche misura restituite chiudono comunque il loro ciclo di utilizzo sotto forma di acque superficiali.

È interessante in tal senso mettere a confronto i prelievi caratterizzati da usi non totalmente dissipativi (idropotabile, produttivo, servizi) computati sia nel bilancio delle acque sotterranee che nel bilancio delle acque superficiali, con le restituzioni dagli impianti di depurazione, esprimendo ancora i dati in termini di portate medie estive.

Analizzando i dati di sottobacino alla sezione 10010 (Foce dell'Arno) si ricavano i dati esposti nella tabella seguente.

Prelievi parzialmente restituitivi da pozzi	2,9 mc/s
Prelievi parzialmente restituitivi da derivazioni, sorgenti, pozzi subalveo	9,0 mc/s
Prelievi parzialmente restituitivi totali	11,9 mc/s
Restituzioni ai depuratori	7,2 mc/s

Tabella 70 – Confronto tra prelievi e restituzioni alla sezione di foce, in termine di valori medi estivi. Vengono considerati i soli prelievi "parzialmente restituitivi", cioè non dissipativi quali, per es., i prelievi ad uso irriguo

Si vede come, dati i prelievi medi computati separatamente per i bilanci delle acque sotterranee e superficiali, la restituzione risulta pari al 60% circa del prelevato, a conferma della generale congruità delle cifre indicative della pressione antropica.

Il modello afflussi deflussi

La necessità di disporre dei termini del bilancio nelle sezioni significative di interesse, non necessariamente coincidenti con sezioni in cui si poteva disporre di serie storiche di misure di portata, ha determinato la scelta di ricostruire, tramite modello matematico, la dinamica della trasformazione degli afflussi in deflussi.

Lo strumento modellistico, pur con tutti i limiti della rappresentazione dei parametri fisici del bacino e della schematizzazione di complessi processi fortemente non lineari, rappresenta il mezzo più efficace per la valutazione quantitativa del regime delle acque superficiali in qualsiasi tratto del reticolo idrografico. La simulazione avviene considerando un set di dati di input costituiti dalle caratteristiche geomorfologiche del bacino e dai dati delle forzanti meteorologiche, e producendo come output la simulazione di ognuna delle grandezze in gioco nel bilancio: evapotraspirazione, contenuto di acqua del suolo, portata.

Per consentire la più affidabile ricostruzione delle dinamiche di trasformazione degli afflussi in deflussi anche nelle sezioni e nei sottobacini in cui non si dispone di serie storiche delle portate misurate su cui effettuare la calibrazione del modello, si è optato per un modello fisicamente basato, in grado quindi di collegare i valori dei parametri del modello a delle caratteristiche fisiche del bacino.

Lo scopo finale è quello di disporre di uno strumento modellistico che consenta di valutare la durata delle portate di magra (estive) a scala temporale giornaliera, su ogni sezione del bacino, ed in particolare nelle sezioni di controllo selezionate (tratti caratteristici).

L'impostazione

Il modello adottato è di tipo distribuito, per tenere in adeguato conto dell'alta variabilità spaziale delle caratteristiche del suolo, delle precipitazioni e di altri parametri che concorrono alla determinazione del bilancio. La scala temporale di riferimento per le simulazioni è quella giornaliera, in modo da poter evidenziare le dinamiche stagionali, in termini di curva di durata delle portate.

Di seguito viene fornita un'illustrazione approfondita della struttura del modello, a partire dal contesto e le modalità con cui è stato sviluppato.

La genesi e lo sviluppo

Nel corso della sperimentazione di un modello unico integrato per il preannuncio di piena nel bacino dell'Arno (sistema ARTU) è stato implementato e testato, presso l'Autorità di Bacino, una prima versione operativa di modello idrologico distribuito per la stima in tempo reale dell'umidità del suolo (MOBIDIC), realizzato dal Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze. Nonostante la finalità iniziale del suo utilizzo in un sistema di previsione delle piene, MOBIDIC già consentiva di effettuare in continuo, cioè anche nei periodi di assenza di precipitazione, il bilancio idrico degli strati superficiali del terreno (Castelli *et al.*, 2002). Un aspetto cruciale nella calibrazione e verifica di schemi distribuiti di bilancio idrologico superficiale è la necessità di disporre di misure e/o stime, comparabilmente distribuite, della saturazione del suolo e dei flussi da questa dipendenti. Recenti studi in collaborazione fra DIC e M.I.T. (Caparrini *et al.*, 2002, 2003, 2004, Campo *et al.*, 2006) hanno mostrato come questo sia operativamente ottenibile attraverso l'uso combinato del telerilevamento da satellite e della modellazione del bilancio energetico della superficie. In tale senso il DIC ha sviluppato un primo miglioramento di MOBIDIC per aggiungere all'esistente schema di bilancio idrico anche il bilancio energetico dello strato superficiale del suolo e della sovrastante vegetazione. Se da un lato questo era

atteso portare già sicuri miglioramenti sia in termini di accuratezza della modellazione dell'umidità del suolo e dell'evapotraspirazione che di controllo periodico degli stessi, dall'altro un pieno utilizzo del modello ai fini del bilancio idrico di bacino, come richiesto dall'Autorità di Bacino, richiedeva ulteriori miglioramenti e completamenti per quanto riguarda soprattutto i deflussi canalizzati e la dinamica delle falde acquifere (Querner, 1997).

Ulteriore, ma non meno importante, aspetto di comune interesse fra DIC e Autorità di Bacino è stato la necessità di sviluppare un sistema modellistico che, all'aumentare della complessità dei processi fisici rappresentati e delle relative schematizzazioni, consentisse in maniera agevole e standardizzabile la stima e aggiornamento dei parametri distribuiti del suolo, del sottosuolo e del reticolo idrografico, tramite idonee procedure d'interfaccia con i moderni sistemi GIS. Ciò al fine di consentire la certificazione dei bilanci eseguiti, la minimizzazione delle parametrizzazioni di tipo *'trial and error'*, il confronto fra risultati relativi ad ambienti operativi e bacini idrografici diversi.

Sulla scorta dei risultati della fase sperimentale del Modello di Preannuncio di Piena, il Centro Funzionale della Regione Toscana ha adottato lo stesso modello per l'implementazione della catena previsionale, a partire da input forniti dalle previsioni quantitative di precipitazione fornite dai modelli meteorologici a scala locale (LAM). Il modello MOBIDIC, recentemente applicato in accordo con il Centro Funzionale della Regione Umbria anche per le previsioni ideologiche dei corsi d'acqua di tali territorio, costituisce così lo strumento di riferimento condiviso localmente per le elaborazioni di trasformazione afflussi/deflussi.

Sulla base di tali considerazioni, Autorità di Bacino e DIC hanno ritenuto di elevato e comune interesse lo svolgimento del programma di ricerca di seguito dettagliato, ed hanno quindi stipulato uno specifico accordo di collaborazione a fine luglio 2003.

In tale accordo viene definito, come obiettivo principale del programma di ricerca, la realizzazione di un sistema modellistico per il monitoraggio a scala di bacino dell'umidità del suolo ed il bilancio della risorsa idrica, con caratteristiche innovative in termini di:

- scala di dettaglio e completezza nella rappresentazione dei principali processi idrologici, biologici ed energetici che determinano la dinamica dell'umidità del suolo e la disponibilità di risorsa idrica superficiale e sub-superficiale;
- interfaccia con i moderni sistemi di gestione di dati territoriali, immagini da telerilevamento, dati idro-meteorologici storici e da reti di monitoraggio in tempo reale;
- procedure di calibrazione automatica a partire da informazioni sia puntuali che spazialmente distribuite;
- gestione operativa tramite rete informatica;
- implementazione, documentazione e distribuzione in ottica shareware controllato.

Nella nuova versione realizzata in questo piano, i dati geografici in ingresso, in formato sia raster che vettoriale, possono essere forniti al modello nei più comuni formati GIS. I dati meteorologici, i dati su prelievi e rilasci nei corsi d'acqua e nelle falde e sulla regolazione degli invasi sono forniti al modello in forme tabellari di semplice gestione.

Un modulo di pre-processamento (MOBIDIC-BUILDGIS) è dedicato al consolidamento dei dati geografici, e alla codifica delle relazioni spaziali e topologiche fra topografia, reticolo idrografico, invasi e punti di prelievo e rilascio.

I calcoli di bilancio idrologico vengono quindi eseguiti con il modulo MOBIDIC-WRM con la richiesta risoluzione spaziale e temporale. I risultati includono le serie storiche delle portate simulate in ciascun ramo del reticolo e le relative statistiche (fra le quali le curve di durata) e le mappe delle principali componenti ideologiche (precipitazione, evapotraspirazione, deflusso superficiale, ecc.). Tali risultati possono quindi essere accoppiati con i dati sui consumi e sul deflusso minimo vitale, consentendo quindi il calcolo di un bilancio idrico, su ogni ramo del reticolo idrografico, che tenga conto anche di tali aspetti.

Nella applicazione al bacino dell'Arno, la simulazione idrologica è stata effettuata a passo giornaliero per il periodo 1993-2006. La geomorfologia del bacino ed i corrispondenti processi di versante sono stati modellati a partire da un Modello Digitale del Terreno con maglia di 10 m, aggregato a scala di minore dettaglio (100 m) per esigenze di contenimento dei tempi di calcolo. Le informazioni sull'uso del suolo, sulla geologia e sulle proprietà idrauliche dei suoli sono state derivate da mappe preesistenti, basate anche su immagini satellitari. La base cartografica di riferimento è quella già citata nei capitoli precedenti.

Sono stati simulati scenari sia "naturali" (nei quali non sono stati considerati prelievi o rilasci artificiali; costituiscono la base del bilancio "idrologico") che "antropici" (bilancio "idrico"). I risultati includono le serie temporali simulate di portata su circa 20,000 rami del reticolo e oltre 22,000 siti di prelievo/restituzione, curve di durata delle portate e mappe di componenti idrologiche sull'area del bacino (umidità del suolo, evapotraspirazione, infiltrazione).

Gli algoritmi

In MOBIDIC-WRM, il dominio spaziale per il calcolo dei processi idrologici è rappresentato tramite una discretizzazione in celle quadrate di dimensione arbitraria e una suddivisione verticale in 5 strati: 1) vegetazione, 2) corpi idrici superficiali (fiumi e laghi), 3) frazione di suolo a prevalente comportamento gravitazionale, 4) frazione di suolo a prevalente comportamento capillare, 5) acquiferi. Rispetto alla precedente versione del modello (Campo *et al.*, 2005), la nuova formulazione include la propagazione delle portate lungo il reticolo idrografico e i serbatoi, il bilancio energetico di superficie e la dinamica degli acquiferi.

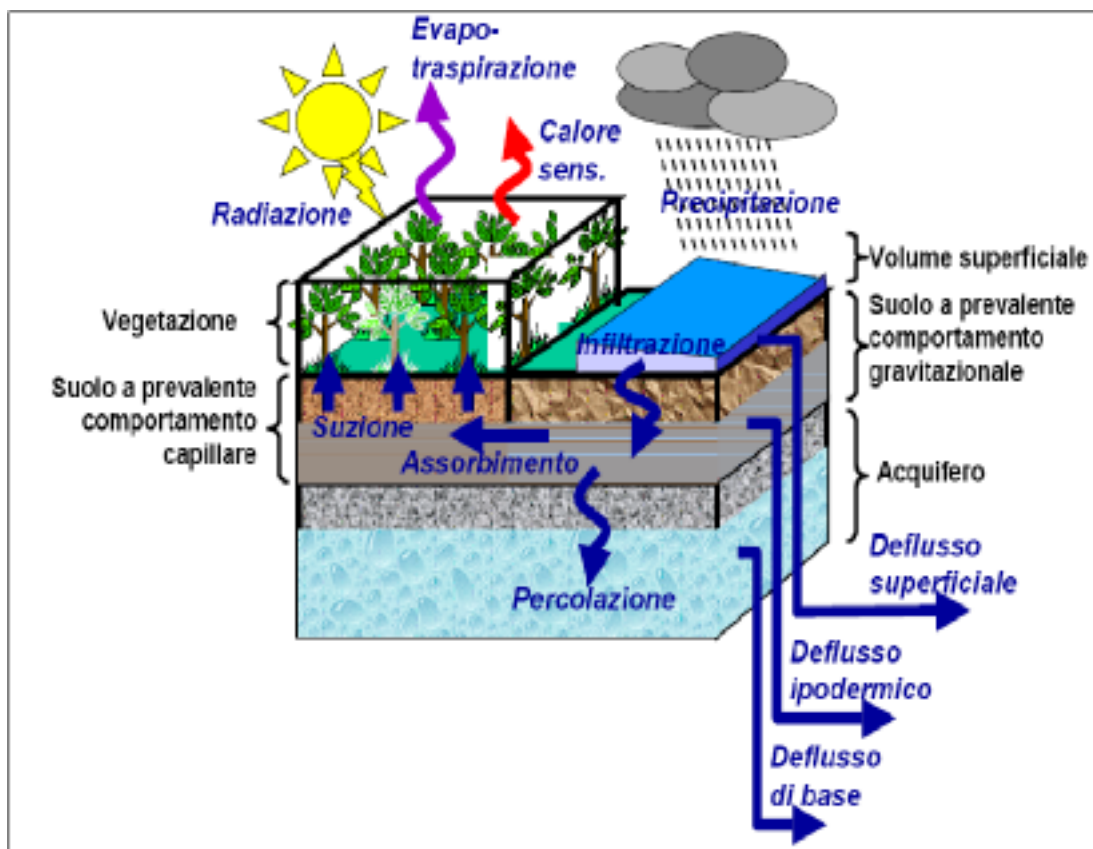


Figura 133 - Discretizzazione orizzontale e verticale utilizzata nel modello

Il sistema suolo-vegetazione-atmosfera

L'evapotraspirazione è calcolata a partire dal bilancio energetico fra la superficie del terreno e l'atmosfera. Tale bilancio è rappresentato risolvendo l'equazione della diffusione del calore nei diversi strati del sistema suolo-vegetazione-atmosfera.

Il calcolo dei flussi può essere svolto sia con una formulazione 'a doppia sorgente' (in cui i contributi di suolo e vegetazione sono calcolati separatamente), che con una formulazione a 'sorgente combinata', dove suolo e vegetazione sono rappresentati come un solo mezzo, con assegnate proprietà termiche equivalenti (Caparrini *et al.*, 2005). Nel primo caso, sono richieste come dato aggiuntivo le mappe di frazione di suolo vegetato e del Leaf Area Index. Il secondo approccio è più parsimonioso e non richiede nessun dato sulla copertura vegetale, e può essere convenientemente utilizzato laddove non sia necessario discriminare fra evaporazione dal suolo e traspirazione dalle piante.

Nella presente applicazione è stato utilizzato l'approccio a sorgente combinata.

I flussi di calore latente e sensibile dalla superficie (suolo+vegetazione) sono quindi calcolati tramite la formulazione 'bulk' del trasferimento del calore in termini di gradienti di umidità e temperatura fra la superficie del terreno (pedice s) e l'atmosfera (pedice a):

$$H = \rho c_p C_H U (T_s - T_a)$$

$$L \cdot E = \rho L C_H U (q_s - q_a)$$

dove U è la velocità del vento e c_p e L sono le usuali proprietà termodinamiche (calore specifico dell'aria a pressione costante e calore latente di vaporizzazione). Il parametro adimensionale C_H è il coefficiente di scambio turbolento del calore e include gli effetti delle caratteristiche della superficie (scabrezza e geometria) e della stabilità atmosferica (Van Den Hurk e Holstlag, 1997).

Idrologia di superficie

Il bilancio idrico nel suolo è affrontato tramite una suddivisione concettuale del suolo, in ciascuna cella di calcolo, in due diversi serbatoi: uno gravitazionale (pori più grandi) e uno capillare (pori più piccoli). La suddivisione fra tali serbatoi è basata sulla definizione di una dimensione caratteristica dei pori, pari a $60 \mu m$ (Busoni *et al.*, 1986). I corrispondenti volumi d'acqua (per unità di area) W_g e W_c sono limitati da valori di capacità massima W_{gmax} e W_{cmax} , e la loro evoluzione è governata dalle seguenti equazioni di bilancio di massa:

$$\frac{dW_g}{dt} = I_{nf} - S_{per} - Q_d - S_{as}$$

$$\frac{dW_c}{dt} = S_{as} - E_T$$

dove I_{nf} è il tasso di infiltrazione, S_{per} è la percolazione, Q_d è il deflusso ipodermico, S_{as} è l'assorbimento dal suolo gravitazionale verso quello capillare e E_T è l'evapotraspirazione. L'assorbimento S_{as} è assunto essere un processo lineare irreversibile, proporzionale ad una "altezza di suzione rappresentativa" attraverso il parametro di assorbimento κ :

$$S_{as} = \kappa \left(1 - \frac{W_c}{W_{cmax}} \right)$$

L'evapotraspirazione E_T è alimentata dal solo contenuto idrico capillare, cioè la suzione da parte delle radici è considerata essere dominante rispetto alla evaporazione diretta dal suolo, ed è mantenuto al suo valore potenziale E_{Tpot} (stimato tramite il bilancio energetico di superficie) fino a che il suolo non si asciuga.

Con questa schematizzazione, i volumi W_{gmax} e W_{cmax} possono essere definiti come, rispettivamente, il massimo contenuto d'acqua al di sopra della capacità di campo e il massimo contenuto d'acqua compreso tra la capacità di campo e il punto di appassimento.

L'acqua nel serbatoio gravitazionale alimenta il flusso di percolazione S_{per} verso la falda e il deflusso ipodermico Q_d verso le celle più a valle lungo il versante.

Entrambi questi flussi sono considerati lineari rispetto al contenuto d'acqua gravitazionale, con la definizione di un parametro di percolazione γ e un parametro di deflusso ipodermico β :

$$S_{per} = \gamma W_g$$

$$Q_d = \beta W_g$$

I due parametri dipendono dalla conducibilità idraulica a saturazione K_s e dalla risoluzione orizzontale determinata dalla dimensione Δx della cella di calcolo e possono essere espressi come:

$$\beta = \beta^* \frac{K_s}{\Delta x}$$

$$\gamma = \gamma^* \left(\frac{K_s}{\Delta x} + C^* \right)$$

dove β^* , γ^* e C^* sono coefficienti concentrati da determinare mediante calibrazione.

Il tasso di infiltrazione I_{nf} nel suolo è limitato dalla conducibilità idraulica a saturazione K_s mentre l'accumulo è limitato dalla capacità del suolo gravitazionale W_{gmax} . Se P è il tasso di precipitazione sulla cella e $(Q_d, R_h, R_d)_{up}$ sono i contributi del deflusso ipodermico, del runoff di Horton e del runoff di Dunne dalle celle di monte, l'infiltrazione è stimata come:

$$I_{nf} = \begin{cases} \left[P + (Q_d + R_h + R_d)_{up} \right] \left[1 - \exp\left(\frac{-K_s}{P + (Q_d + R_h + R_d)_{up}} \right) \right] & \text{if } W_g < W_{gmax} \\ 0 & \text{if } W_g = W_{gmax} \end{cases}$$

Il routing del deflusso ipodermico è totale (cioè il contributo di deflusso ipodermico da monte è semplicemente la somma della produzione di deflusso ipodermico dalle celle di monte) e istantaneo (cioè le velocità del flusso ipodermico è implicita nella definizione del parametro β). Il routing dello scorrimento superficiale viene trattato con un filtro lineare che rappresenta l'effetto del volume d'acqua W_s sul versante:

$$\frac{dW_s}{dt} = -\alpha_s W_s + R_H + R_D + q_{up}$$

dove q_{up} è il runoff da monte che raggiunge la cella per scorrimento superficiale.

Il parametro α_s che controlla lo scorrimento superficiale è definito a scala di cella con relazioni empiriche come:

$$\alpha_s = \frac{\alpha_0}{\Delta x} \sqrt{Ai}$$

dove A è l'area contribuyente alla cella, i la sua pendenza topografica e α_0 un coefficiente concentrato da calibrare. Quando il runoff superficiale raggiunge il reticolo idrografico, esso viene trasferito su quest'ultimo e quindi propagato attraverso la portata fluviale.

Routing dei fiumi e dei serbatoi

La rappresentazione dei corpi idrici superficiali si articola invece in:

- rappresentazione vettoriale del reticolo idrografico in forma di rete di canali cilindrici, e relativa valutazione dello stato del deflusso canalizzato in forma di volumi e portate nei tratti del reticolo;
- rappresentazione concettuale dei grandi invasi (artificiali e laghi naturali) come serbatoi con leggi di invaso e svasso specificabili, connessi alla rete idrografica, e relativa stima dello stato dei grandi invasi in forma di livelli e volumi.

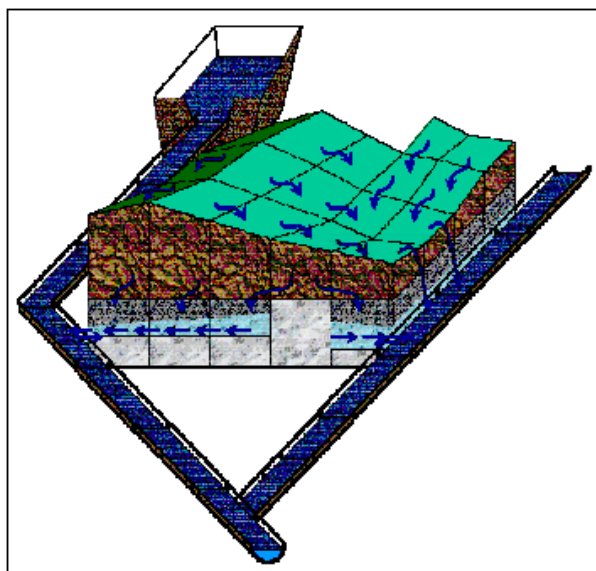


Figura 134 - Schematizzazione del reticolo utilizzata nel modello

Il reticolo idrografico è rappresentato in forma vettoriale e composto da canali cilindrici nei quali la portata può essere calcolata con vari schemi (*lag*, serbatoio lineare, Muskingum-Cunge).

La topologia della rete viene generata in fase di pre-processamento partendo da una rappresentazione dei fiumi per mezzo di polilinee. Può essere definito un ordine minimo di calcolo per i canali (per esempio i processi nei canali possono essere simulati solo da un certo ordine un su allo scopo di risparmiare tempo di calcolo).

L'interazione del reticolo idrografico con i processi di versante, la falda, i prelievi e i serbatoi viene anch'esso strutturato spazialmente nella fase di pre-processamento sulla base del DTM, della posizione dell'acquifero e dei punti di prelievo/rilascio.

Attributi aggiuntivi della struttura del reticolo, se richiesti, sono la geometria delle sezioni, le scale di deflusso, i coefficienti di scabrezza.

L'equazione di bilancio in ogni ramo è data da:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + c(q_L + q_D + q_W)$$

dove q_L è il flusso laterale (da superficie e ipodermico), q_D è il deflusso di base (dalla falda) e q_W sono i prelievi e/o i rilasci nel ramo. I parametri del routing sono: c , la celerità dell'onda di piena e μ , la diffusività. Quest'ultimo parametro è richiesto solo quando vengono adottati schemi diffusivi (per esempio Muskingum-Cunge).

I serbatoi superficiali (sia naturali che artificiali) vengono schematizzati come volumi con leggi di deflusso connessi con il reticolo idrografico. La geometria del serbatoio viene schematizzata per mezzo di curve volume/livello che vengono calcolate per ciascun serbatoio sulla base dei dati disponibili sulla quota dello sbarramento e sulla topografia del bacino del serbatoio ottenuti dal DTM.

Il bilancio di massa è quindi calcolato considerando i flussi entranti dai fiumi dai deflussi di falda, di superficie e ipodermico e i flussi uscenti dalla sezione di chiusura e dagli sfioratori.

Schematizzazione del sottosuolo

La schematizzazione può essere trattato in modo semplificato come un serbatoio lineare, oppure con una dettagliata rappresentazione dei processi sotterranei mediante l'approssimazione di Dupuit. In questo caso, il dominio del sottosuolo viene discretizzato con una propria griglia (che può avere una diverso dominio spaziale e una diversa risoluzione orizzontale rispetto a quella utilizzata per i processi di superficie).

Possono essere simulati acquiferi sia freatici che confinati con gli algoritmi appropriati. Nella fase di pre-processamento MOBIDIC-BUILDGIS viene utilizzata una griglia per la definizione dell'estensione spaziale dell'acquifero allo scopo di determinare le interazioni tra sottosuolo, idrologia del suolo e il reticolo idrografico.

Confrontato con lo schema di semplice serbatoio lineare, questo approccio è più fisicamente basato e può migliorare notevolmente la stima del deflusso di base. Tuttavia, la simulazione dettagliata dei processi richiede informazioni aggiuntive sulla permeabilità e la profondità del bedrock che in molti casi non sono disponibili ad eccezione di aree limitate dove sono state condotte indagini specifiche.

Nelle applicazioni qui presentate è stato utilizzato lo schema semplificato.

L'applicazione al bilancio idrologico del bacino dell'Arno

Per l'applicazione al bacino dell'Arno i dati di input sono rappresentati da:

- raster caratteristiche morfometriche e geopedologiche del bacino;
- dati meteorologici su 333 stazioni pluviometriche e 110 stazioni termometriche, ottenuti dalla rete regionale di monitoraggio idrometeorologico (Regione Toscana – Settore Servizio Idrologico Regionale, e ARSIA);
- dati di prelievi e rilasci su 22.764 punti.

Il modello è stato applicato suddividendo l'intero bacino in 15 sottobacini, su cui sono state effettuate elaborazioni separate:

- Casentino;
- Chiana;
- Valdarno Superiore;
- Sieve;
- Greve;
- Valdarno Medio;
- Bisenzio;
- Ombrone;

- Pesa;
- Elsa;
- Era;
- Usciana;
- Bientina;
- Valdarno Inferiore.

Le simulazioni tengono ovviamente conto della struttura gerarchica dei sottobacini, prevedendo adeguate immissioni dei sottobacini di monte nei sottobacini di valle.

Il bilancio idrico è stato calcolato su scala temporale giornaliera per un periodo di 10 anni (1993-2006). In questa applicazione, la modellizzazione della falda è stata trattata con lo schema semplificato (serbatoio lineare), a causa della scarsa disponibilità di dati sugli acquiferi sull'intero territorio. L'elaborazione del modello è avvenuta attraverso la produzione dei raster giornalieri di:

- precipitazione cumulata (mm);
- evapotraspirazione reale (mm);
- temperatura al suolo (K);
- contenuto idrico capillare del suolo (mm);
- contenuto idrico gravitazione del suolo (mm).

Infine, per ogni tratto in cui è stato schematizzato il reticolo, il modello produce i valori giornalieri di portata.

Inoltre, le misure di livello idrico per un set di stazioni dotate di scala di deflusso per almeno qualche anno nel periodo di studio sono state utilizzate per scopi di calibrazione e validazione. La posizione di tali stazioni è mostrata nella tavola 8 della Cartografia.

Calibrazione

L'utilizzo di un tipo di modello fisicamente basato consente di correlare il valore dei parametri del modello a caratteristiche del suolo e della geomorfologia, secondo leggi potenzialmente valide a livello generale, al di là della caratterizzazione locale e particolare dei singoli bacini. Trattandosi in ogni caso di modelli che cercano verosimilmente di riprodurre fenomeni complessi e fortemente non lineari, è ragionevole attendersi che questo assunto non sia completamente rispettato, e che quindi sia necessario adattare alcuni dei parametri del modello per far sì che questo riesca a riprodurre nel miglior modo possibile la grandezza obiettivo dell'applicazione modellistica, ovvero la portata alla sezione di chiusura del bacino o a una sezione di controllo prescelta.

Come già descritto, il modello adottato presenta alcuni parametri validi per l'intero bacino, tipicamente dei moltiplicatori dei valori distribuiti di alcune grandezze che entrano in gioco nella schematizzazione dei processi di interazione atmosfera-suolo, di infiltrazione, e di generazione del runoff e del deflusso nel reticolo. Altresì, alcuni processi (l'infiltrazione negli acquiferi e il contributo del deflusso profondo) sono rappresentati tramite una modellazione "lumped", che fa riferimento a parametri assegnati all'intero bacino. È modificando tali parametri che si è agito per adattare in maniera ottimale il modello nei singoli bacini in cui è stato scomposto l'intero bacino dell'Arno.

La fase di calibrazione del modello si è concentrata su 10 sezioni strumentate (confronto con le misure idrometriche), per il periodo 1993-1998. La scelta di tale periodo è stata effettuata considerando la necessità di disporre di un quadro il più possibile omogeneo di misure di portata adeguatamente validate, per il numero di stazioni preso in considerazione.

La stima dei parametri richiesti è stata effettuata ponendo come obiettivo della taratura: migliore riproduzione possibile della distribuzione temporale delle portate estive. La funzione obiettivo è stata valutata considerando la differenza tra l'area sottesa dalla curva di durata misurata e calcolata

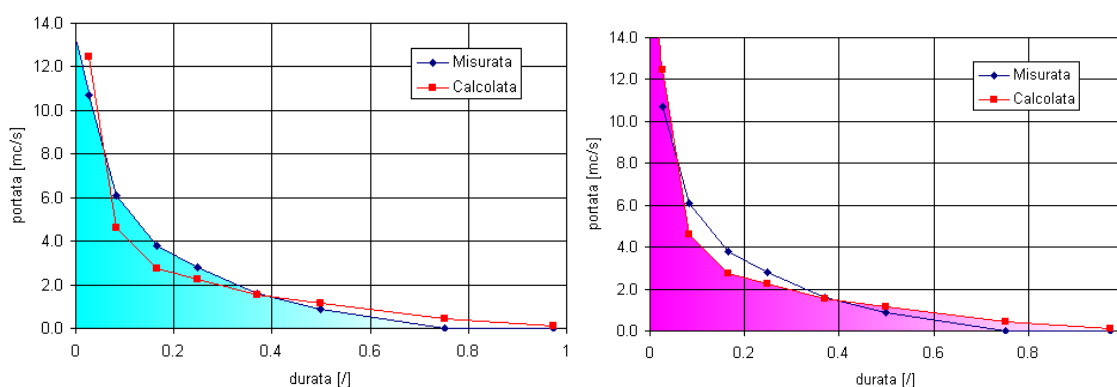


Figura 135 - Rappresentazione della curva di durata calcolata (a sinistra) e misurata (a destra) e della rispettiva area sottesa. Le curve sono riferite al periodo estivo

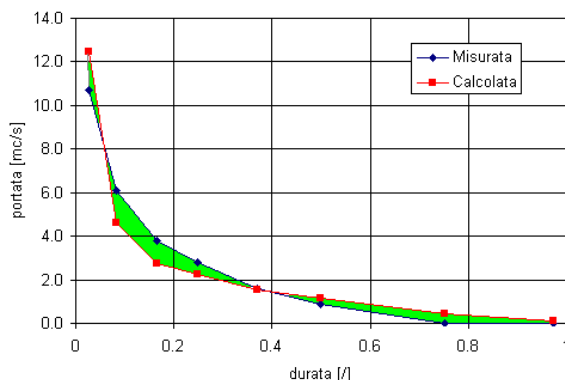


Figura 136 - Rappresentazione schematica della valutazione della differenza di area sottesa dalle curve di durata misurata e calcolata, periodo estivo

Il valore di confronto per ritenere accettabile una calibrazione è stato fissato per al 20% del valore misurato: ovvero, se la differenza di area, in valore assoluto, risultava inferiore al 20% dell'area sottesa dalla curva di durata misurata, l'obiettivo di calibrazione si riteneva raggiunto.

La calibrazione è avvenuta variando alcuni dei parametri aggregati a livello di intero sottobacino, e in particolare:

- moltiplicatore "lumped" del parametro K_s del suolo (velocità di infiltrazione a saturazione), distribuito; valori assunti variabili tra 0.1 a 4.0 [l];
- il parametro "global loss" degli acquiferi (perdita verso altri acquiferi e coefficiente di filtrazione); valori assunti tra 0 e 20 [%];
- il parametro K_f degli acquiferi (coefficiente di filtrazione); valore assunto tra $1.0 \cdot 10^{-7}$ e $2.0 \cdot 10^{-6}$.

Sono stati invece lasciati invariati e uguali per tutti i sottobacini i seguenti parametri:

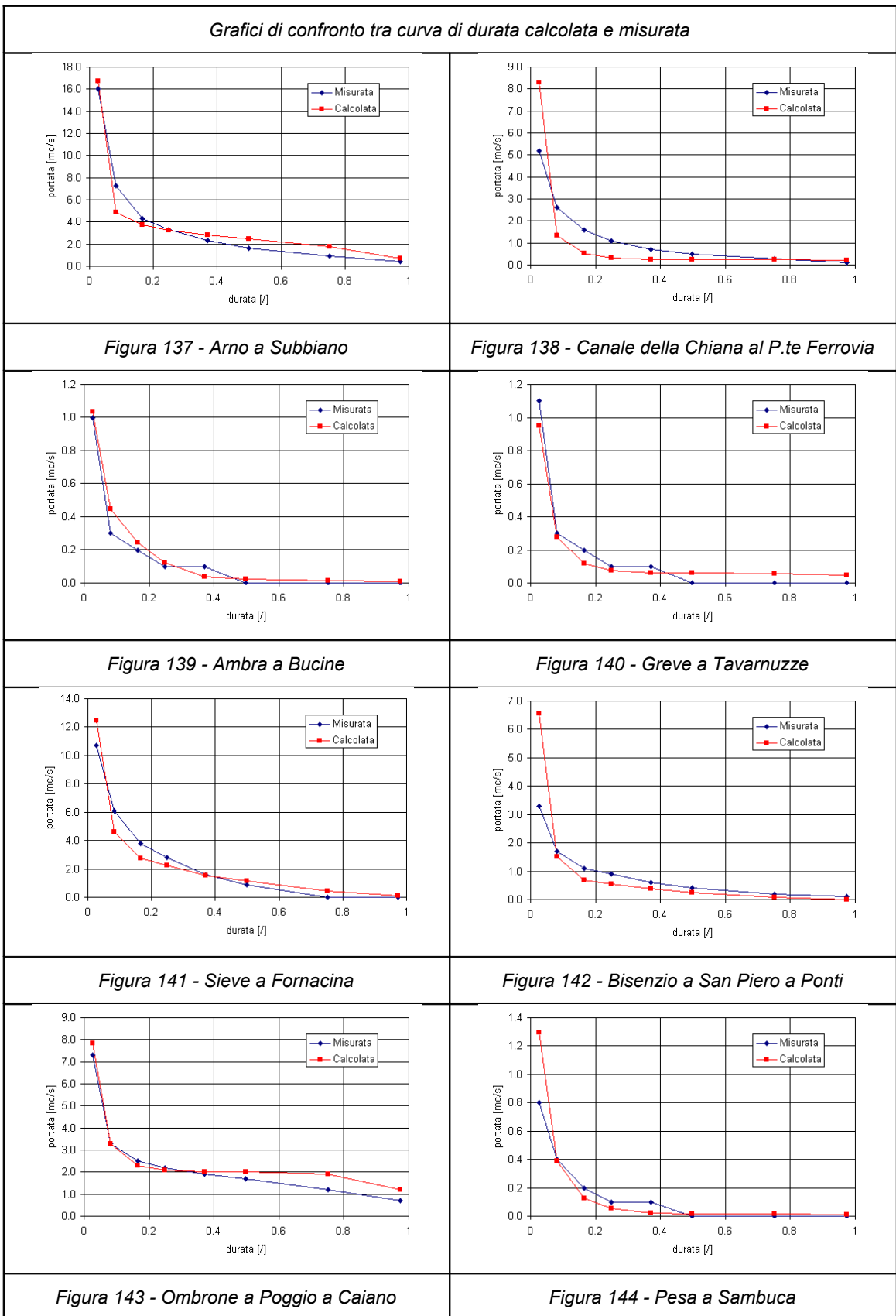
Parametro	Descrizione	Unità di misura	Valore assunto
α_s	Costante d'invaso per il deflusso superficiale di versante	[1/s]	$2.0 \cdot 10^{-5}$
γ	Parametro di ritardo per la percolazione	[1/s]	$2.0 \cdot 10^{-7}$
β	Parametro di ritardo per il deflusso ipodermico	[1/s]	$2.0 \cdot 10^{-6}$
κ	Parametro di ritardo per l'assorbimento capillare	[1/s]	$3.0 \cdot 10^{-12}$

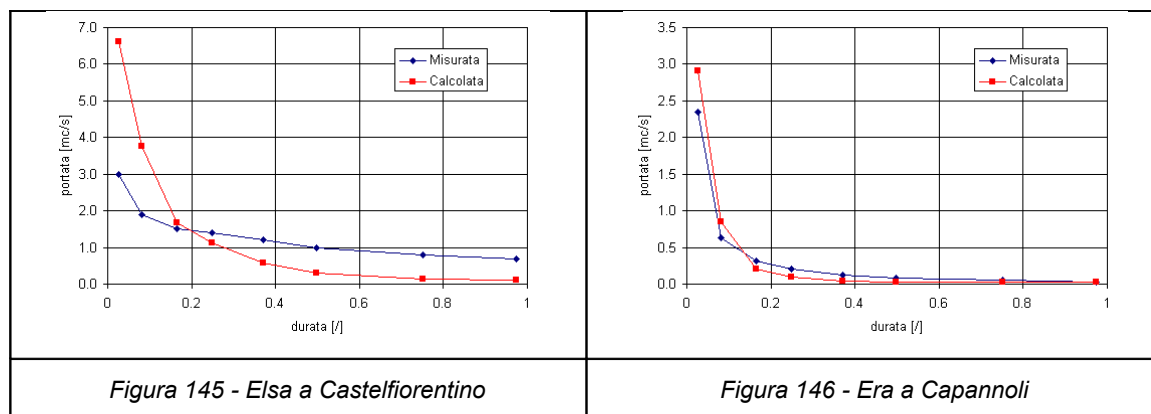
Tabella 71 – Elenco dei parametri invariati

Il fatto di lasciare invariati questi parametri costituisce una dimostrazione dell'efficacia della rappresentazione dei processi fisici della trasformazione afflussi/deflussi: la variabilità spaziale viene di fatto adeguatamente riprodotta dai raster che esprimono le caratteristiche geomorfologiche e pedologiche.

Di seguito si riportano i grafici relativi alla calibrazione per le stazioni idrometriche utilizzate.

Grafici di confronto tra curva di durata calcolata e misurata





In definitiva, al termine della fase di calibrazione si è potuto disporre di un modello afflussi/deflussi adeguatamente tarato su tutto il bacino, in grado di assicurare un adeguato livello di efficacia per le successive elaborazioni, consistenti in:

- simulazione delle portate del periodo 1993-2006;
- ricostruzione della curva di durata estiva;
- derivazione dei parametri utili per identificare lo stato di criticità del corso d'acqua (numero di giorni per cui la portata è inferiore al DMV).

La scala spaziale di aggregazione dei dati di bilancio

Il bilancio delle acque superficiali è potenzialmente disponibile, alla scala giornaliera, nei 60.000 tratti in cui è suddiviso il reticolo superficiale. Tale livello di accuratezza è tuttavia illusorio vista la diversa risoluzione spaziale dei dati di base, pedologia, litologia, uso del suolo, e la relativa scarsità dei dati idrometrici necessari alla calibrazione. Si è dunque ritenuto opportuno operare una aggregazione tale da garantire una ragionevole omogeneità delle diverse informazioni e, al contempo, facilitare le forme di gestione, in particolare per quanto attiene l'apposizione di misure normative e gestionali. È evidente che tale forma di presentazione dei risultati può essere raffinata a seguito degli aggiornamenti del quadro conoscitivo di base e del sistema delle reti di monitoraggio esistenti e previste.

Per quanto sopra il bilancio delle acque superficiali è fornito in un numero discreto di sezioni fluviali, ritenute significative del reticolo fluviale e del bacino sotteso, in corrispondenza delle quali è stato successivamente individuato il livello di criticità.

In considerazione della stretta interconnessione tra bilancio idrico e Piano di Tutela delle Acque, prioritariamente le sezioni significative sono state definite in modo da ricomprendere al loro interno i *corpi idrici significativi (CIS)* del Piano di Tutela e quindi sulla base dei seguenti criteri:

- sezioni ubicate in corrispondenza della foce a mare o della confluenza in altro *CIS*; sezioni in corrispondenza di nodi fra i diversi tronchi in cui vengono suddivisi i corsi d'acqua significativi ai sensi del PTA, escludendo i punti di valle di laghi, invasi, zone umide e taluni nodi dell'Arno a valle di Firenze sottendenti interbacini di superficie molto ridotta;
- sezioni ubicate a monte di immissioni di affluenti classificati tra i *CIS*;
- sezioni ubicate in corrispondenza del punto di passaggio tra porzioni omogenee dal punto di visto morfologico;
- sezioni poste in corrispondenza di punti di restituzione (scarichi) di notevole entità in relazione al regime delle portate;
- sezioni ubicate in corrispondenza di stazioni idrometriche dotate di scala di deflusso delle portate sottendenti bacini significativamente diversi da quelli individuati nei punti precedenti;
- sezioni ubicate in corrispondenza di stazioni idrometriche prive di scala di deflusso delle portate, individuate in modo tale da suddividere interbacini con superfici superiori ai 400-500 kmq.

Tale metodologia ha prodotto l'individuazione di 44 sezioni significative, di cui 12 sull'Arno, 29 sugli affluenti e 3 sul bacino del Canale Scolmatore.

Ciascuna sezione significativa sottende una porzione del bacino definita "sottobacino", all'interno della quale si individua una ulteriore porzione, l'"interbacino", risultante dalla sottrazione dal sottobacino dei sottobacini sottesi da sezioni significative di monte.

Per ogni sezione/sottobacino è stata redatta una scheda di sintesi, alla presente allegata, che riporta i dati di caratterizzazione morfologica, climatica, idrologica, DMV, uso suolo, pressione antropica, bilancio idrico e criticità.

Analogamente è stata redatta una scheda di sintesi relativa ai dati di caratterizzazione idrologica, ambientale, uso suolo, pressione antropica, dettagliati alla scala dei singoli interbacini.

La scala temporale di aggregazione dei dati di bilancio e l'individuazione delle criticità

L'Arno e i suoi affluenti sono caratterizzati da un regime fortemente torrentizio, strettamente legato all'andamento pluviometrico. Ciò determina che le criticità maggiori sono concentrate nel periodo estivo, criticità peraltro amplificate dal sistema dei prelievi per uso irriguo, concentrati tra giugno e settembre (oltre naturalmente ai prelievi per altri usi costanti nell'anno), nonché dalle temperature elevate.

Per tali motivi e come già detto in premessa, si è voluto conservare ed esaltare nel bilancio dell'Arno, come elemento caratterizzante, la dimensione temporale della criticità, anche con l'ulteriore considerazione che le condizioni di stress degli ecosistemi fluviali non sono dovute tanto a picchi estremi quanto alla prolungata persistenza di valori di magra.

In questo senso si è voluto concentrare l'attenzione sui risultati delle simulazioni per i quattro mesi estivi, nei quali tutti gli elementi portatori di criticità raggiungono la massima concordanza di fase.

Tale fatto, già tenuto in debito conto nella modellazione, in cui si è optato per la migliore riproduzione della distribuzione temporale delle portate estive, è stato tradotto in classi di criticità funzione del numero di giorni in cui le portate medie giornaliere risultano inferiori al DMV. I giorni critici sono ricavati dalla curva di durata delle portate estive, sia antropizzate che naturali, posta a confronto con il valore del DMV definito.

I valori di criticità ottenuti sono stati quindi aggregati in 4 classi come di seguito indicato:

	<i>Deficit idrico della sezione /sottobacino</i>	<i>Numero giorni in cui la portata è inferiore/superiore al DMV</i>
C4	Molto elevato	> 60 gg
C3	Elevato	30 ÷ 60 gg
C2	Medio	1 ÷ 30 gg
C1	Nulla	0 gg

Tabella 72 – Classi di criticità delle acque superficiali