

GESTIONE SOSTENIBILE DELLE RISORSE IDRICHE NEL BACINO DEL FIUME TEVERE

SUSTAINABLE WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE TIBER RIVER BASIN (CENTRAL ITALY)

GUIDO CALEND^(*) & CORRADO PAOLO MANCINI^(*)

^(*) University of "Roma Tre" - Department of Civil Engineering Sciences - Via Vito Volterra, 62 - 00146 Roma, Italia
e-mail: calenda@uniroma3.it, mancini@uniroma3.it

RIASSUNTO

Lo studio per la valutazione della risorsa idrica nel bacino del Fiume Tevere ha comportato un accurato controllo delle scale di deflusso e per interpolare le informazioni fornite dalle stazioni di misura delle portate ha ampiamente utilizzato misure delle portate eseguite in alveo e alle sorgenti ricavate da altre fonti.

Lo studio è stato sviluppato in tre fasi: la prima fase riguarda la stima della distribuzione delle portate naturali nell'ambito del bacino; la seconda, la determinazione del minimo deflusso da riservare in alveo per soddisfare il Minimo Deflusso Vitale ed altre esigenze; la terza, lo sviluppo di un modello che, tenendo conto delle portate riservate in alveo e dello stato attuale dei prelievi, determina la portata disponibile per altri usi per consentire la gestione del risparmio idrico ai fini di una razionale redistribuzione della risorsa.

TERMINI CHIAVE: uso sostenibile, portate di magra, minimo deflusso vitale

INTRODUZIONE

Si valuta che a livello mondiale i prelievi d'acqua dolce siano attualmente inferiori a un decimo del volume che giunge annualmente al mare tramite i fiumi e le falde (LA LOGGIA, 1998). Questo dato sembrerebbe indicare una disponibilità delle risorse idriche ancora ben lontana dall'esaurimento, per cui in un contesto globale l'acqua non dovrebbe costituire una grave preoccupazione. Purtroppo, per una serie di motivi la situazione è ben diversa. Innanzitutto, il potenziale tecnicamente sfruttabile è enormemente minore della totalità della risorsa, sia perché gran parte dei deflussi superficiali avvengono in regime di piena, e quindi sono utilizzabili solo per mezzo di serbatoi artificiali - la cui potenziale capacità d'immagazzinamento è limitata - sia perché una frazione notevole dei deflussi sotterranei che giungono a mare non può essere prelevata, in quanto serve a impedire la risalita del cuneo salino. In secondo luogo, la circolazione d'acqua dolce è distribuita sulla superficie terrestre in modo molto disomogeneo, e altrettanto disomogenea è la distribuzione della domanda idrica. Di conseguenza in molte zone dotate di risorse idriche limitate ma densamente antropizzate la minaccia di una crisi idrica può essere incombente. Il problema si presenta in forma particolarmente insidiosa quando l'approvvigiona-

ABSTRACT

The study for the evaluation of the water resource still available in the basin of the Tiber River involved a thorough check of flow observation series, that resulted in a careful revision of stage-discharge relationships and the utilisation of a large amount of stream and spring flow measurements by other sources, in order to interpolate the information obtained in the flow measurement stations.

The study was developed in three phases. First, the estimate of the distribution of natural low flow discharges throughout the basin; second, the determination of the minimum instream flow for ecological and other requirements; third, the development of a model that, taking into account the instream flow and present uses of the resources, could evaluate the residual resource still available for further uses and assess the reduction of water consumption aimed at a rational reallocation of water resources.

KEYWORDS: sustainable use, low flow, instream flow

INTRODUCTION

The worldwide assessment of fresh water withdrawal is presently evaluated around one tenth of the surface and subsurface water that each year reaches the sea (LA LOGGIA, 1998). That seems to indicate that men is still very far from a critical use of water resources. Unfortunately this is not the case, since for several reasons the technically usable resources are much lower than the global circulation: the amount of the resource is very far from being homogeneously distributed on the earth surface; and most of the surface flow occurs during floods and can be used only as far the limited storage capacity allows it. More insidious is the management of subsurface water, since the aquifers constitute very large reservoirs that are often tapped for amounts greater than the recharge. When this is the case, the society is living at the expenses of a non-renewable resource: water tables gradually drop, springs dry up, river flows reduce and lake levels lower.

A striking example is given by the evolution of several lakes of the Lazio region. Figure 1 shows the dramatic lowering of the water level of the Lake of Castelgandolfo, compared to the fixed tops of the piles of an ancient wharf.

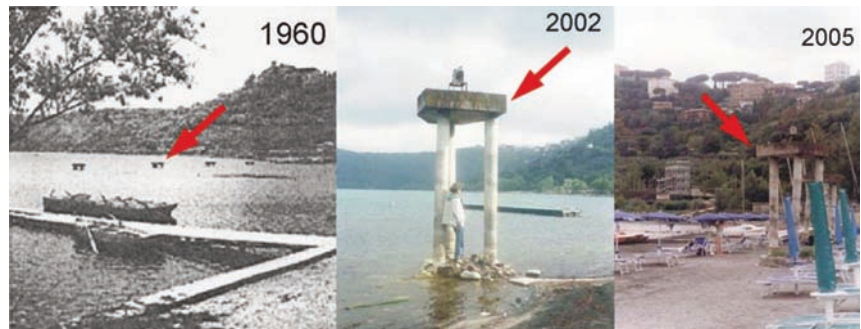


Fig. 1 - Abbassamento del Lago di Castelgandolfo
- Lowering of the Lake of Castelgandolfo

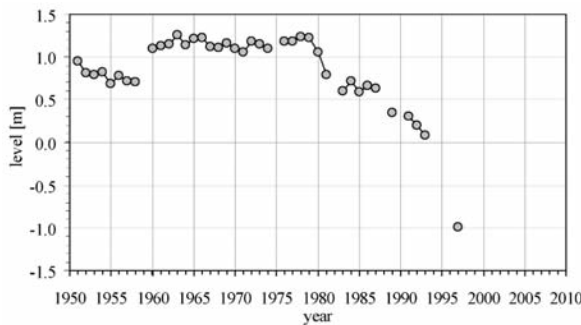


Fig. 2 - Evoluzione dei livelli idrici nel Lago di Castelgandolfo
- Evolution of the water level in the Lake of Castelgandolfo

mento idrico è prevalentemente da acque sotterranee. Le grandi falde, infatti, costituiscono enormi serbatoi, che purtroppo sono spesso sfruttati molto oltre quanto consentito dalla ricarica. Quando ciò accade la società sta vivendo a spese di una risorsa non rinnovabile: il livello della falda si abbassa gradualmente, le sorgenti si esauriscono, le portate fluviali di magra si riducono e i livelli lacuali si abbassano.

Un esempio lampante è costituito dall'evoluzione di diversi laghi laziali. La Fig. 1 mostra il drammatico abbassamento del livello del Lago di Castelgandolfo, evidenziato dalla quota fissa della sommità delle pile di un vecchio pontile.

Come mostra la Fig. 2, i livelli iniziarono a calare intorno al 1980, e quando scesero al disotto dell'incile dell'emissario il ritmo dell'abbassamento subì un forte incremento, perché la diminuzione dell'alimentazione non poteva più essere compensata da un'ulteriore riduzione delle portate nell'emissario.

Condizioni analoghe stanno per verificarsi nel Lago di Bolsena (Fig. 3), dove l'incile dell'emissario (il Fiume Marta) è regolato da paratoie, la cui apertura viene progressivamente ridotta anno dopo anno per sostenere il livello del lago riducendo gli efflussi.

Preoccupata da questa situazione, evidenziata anche dalla continua riduzione delle portate in molti corsi d'acqua del bacino del Tevere, l'Autorità di Bacino del Fiume Tevere ha conferito agli scriventi l'incarico di uno studio per la valutazione della distribuzione della risorsa idrica nel bacino (CALENDA & MANCINI, 2005a; 2005b).

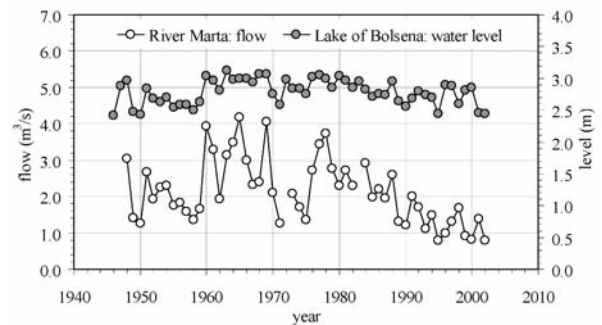


Fig. 3 - Evoluzione dei livelli idrici nel Lago di Bolsena e delle portate nell'emissario (Fiume Marta)
- Evolution of the water level in the Lake of Bolsena and of the flow in the emissary (River Marta)

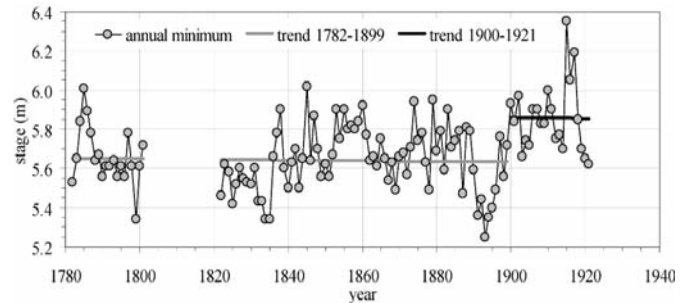


Fig. 4 - Altezze idrometriche del Fiume Tevere a Roma (Ripetta): minimi annuali
- Stage of the Tiber River at Rome (Ripetta): annual minima

As shown in Fig. 2, levels started to drop around 1980 and the dropping rate increased when the water level got below the level of the emissary, since the decrease of the supply could not be compensated by further reduction of the emissary flow.

The same conditions are about to develop in the Lake of Bolsena (Fig. 3), where the intake of the emissary (River Marta) is regulated by sluice gates, whose openings are reduced year after year to maintain the level of the lake by reducing the outflow.

Worried by this situation, highlighted also by the steady flow reductions in several river of the Tiber basin, the Basin Authority of the Tiber River entrusted the authors with the redaction of a study for the evaluation of the water resource distribution in the basin (CALENDA & MANCINI, 2005a; 2005b).

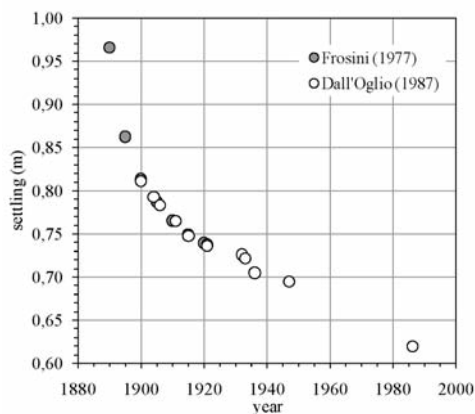


Fig. 5 - Abbassamento dello zero idrometrico dell'idrometro di Ripetta
- *Settling of the staff gauge at Rome (Ripetta)*

DISTRIBUZIONE DELLA PORTATA MINIMA

Le misure sistematiche dell'altezza idrometrica del Fiume Tevere a Roma hanno avuto inizio nel 1782, furono interrotte durante le Guerre Napoleoniche e nell'immediato dopoguerra, per riprendere soltanto nel 1821. Nei tardi anni ottanta del XIX secolo, dopo la grande piena del 1870, allo scopo di proteggere Roma dalle inondazioni, iniziò la costruzione di argini protetti da muri di sostegno (i muraglioni), che alterarono completamente l'alveo fluviale.

La serie dei minimi annuali delle altezze idrometriche è rappresentata nella Fig. 4. È evidente una brusca disomogeneità al volgere del secolo, chiaramente attribuibile alla costruzione e ultimazione dei muraglioni.

Durante i lavori fu installato un nuovo idrometro, ancorato ad un tratto di muraglione. Dopo la costruzione il muraglione cominciò ad assestarsi e con esso anche l'idrometro, come indicato nella Fig. 5.

Le misure sistematiche di portata nel Tevere iniziarono nel 1921, ma alcune misure erano già state eseguite precedentemente per mezzo di un galleggiante da Vescovali nel periodo 1872-76 (VESCOVALI, 1875 e 1876) e da Zucchelli nel periodo 1880-81 (MONTANARI, 1983). Nel 1881 Nazzani eseguì alcune misure con un mulinello (PERRONE, 1908), ed altre furono eseguite nel 1892-93 da Perrone (PERRONE, 1908). Dato che le misure di Perrone si adattano bene a quelle di Nazzani, sicuramente eseguite quando l'alveo del fiume era ancora inalterato, è probabile che nel 1893 i lavori sull'alveo non fossero ancora tanto avanzati da alterare la scala di deflusso. Le misure di Vescovali e Zucchelli, al contrario, sembrano aver in qualche misura sovrastimato la portata, probabilmente perché la relazione tra la velocità superficiale nel filone centrale della corrente e quella media non era stata, all'epoca, perfettamente valutata.

Le portate di magra nel periodo precedente alla fine degli anni novanta sono pertanto stimate usando una scala di deflusso adattata ai dati di Nazzani e Perrone, rappresentata nella Fig. 6. Dopo questo periodo, quando infine i lavori erano stati completati, dato che nessuna nuova misura è disponibile fino al 1920, si adotta la scala di deflusso del periodo 1920-22. Dopo questa data, misure di portata

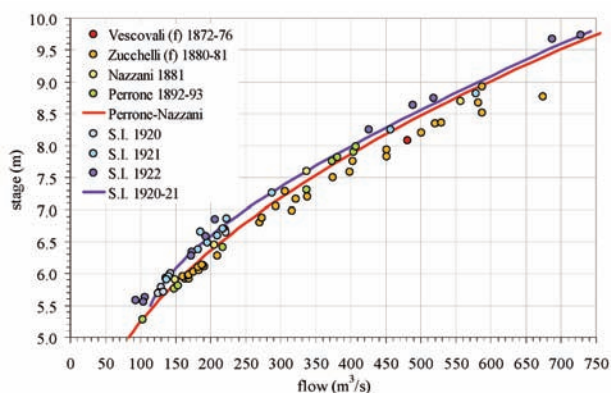


Fig. 6 - Antiche scale di deflusso del Tevere a Roma (Ripetta)
- *Ancient stage-discharge relationships for the Tiber River at Rome (Ripetta)*

DISTRIBUTION OF MINIMUM FLOW

Systematic stage measurement on the Tiber River at Rome started in year 1782, but the measurement were interrupted during the Napoleonic wars and their aftermath, and were resumed only in 1821. In the late eighties of the XIX century, after the great flood of 1870, in order to protect the town of Rome from floods, began the construction of dikes sustained by embankment walls (muraglioni) which completely altered the river bed.

The series of the minimum annual stage is shown in Fig. 4. A sharp non-homogeneity of the series clearly appears at the turn of the century, when the modification of the river bed was almost completed.

During the works, a new staff gauge was installed, anchored to the embankment walls. After the completion, the wall began to settle and so did the gauge, as shown in Fig. 5.

The systematic flow measurement in the Tiber River began in year 1921, but some measurement were executed using a float by Vescovali in the period 1872-76 (VESCOVALI, 1875 and 1876) and by Zucchelli in 1880-81 (MONTANARI, 1983). In 1881 Nazzani made a few measurement using a current meter (PERRONE, 1908), and other were made in 1892-93 by Perrone (PERRONE, 1908). Since the measurement done by Perrone fit well with those of Nazzani, that were surely made when the river bed was still unaltered, it is probable that in 1893 the works on the river bed were not so advanced to alter the stage-discharge relationship. The measurement by Vescovali and Zucchelli, on the contrary, overestimated somewhat the discharge, probably because the relationship between the surface velocity in the centre of the current and the mean velocity were not perfectly understood at the time.

Thus, in this study, the low flow discharges for the period prior to the late nineties of the century are estimated using a stage-discharge relationship fitted to the data of Nazzani and Perrone, shown in Fig. 6. For the following period, when the works were at least completed, since no new measurements were made until year 1920, the stage-discharge relationship of the period 1920-22 is adopted.

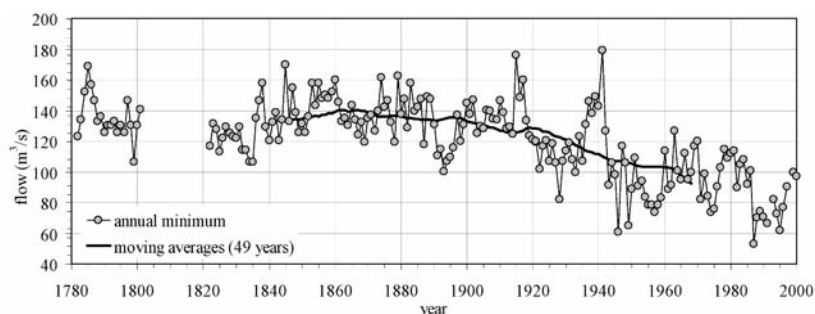


Fig. 7 - Portata del Fiume Tevere a Roma (Ripetta): minimi annuali
- Flow of the Tiber River at Rome (Ripetta): annual minima

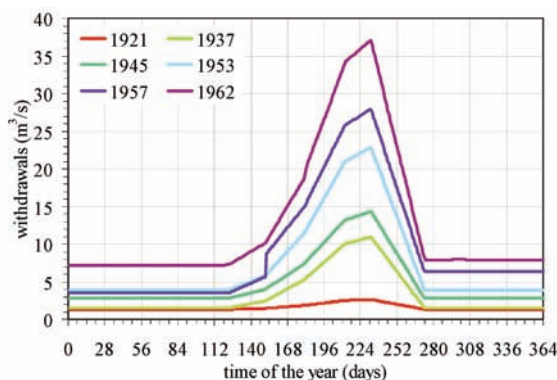
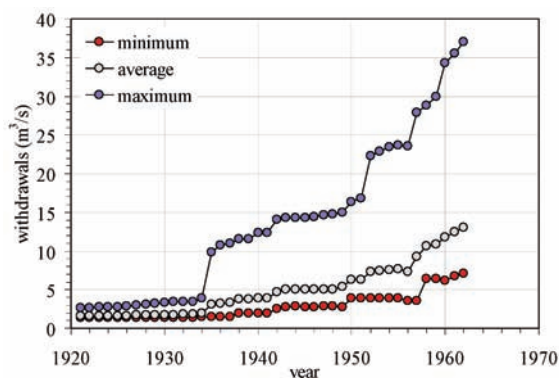


Fig. 8 - Stima dei prelievi idrici dal bacino del Fiume Tevere: (a) evoluzione, (b) variabilità annuale
- Estimate of water withdrawals from the basin of the Tiber River: (a) evolution, (b) annual variation

furono regolarmente eseguite ogni anno e la scala di deflusso fu mantenuta aggiornata.

La serie delle minime portate annuali è rappresentata nella Fig. 7 insieme alle medie mobili di 49 anni. È evidente che dopo i primi anni venti del '900 la minima portata iniziò a diminuire, e la diminuzione è proseguita con continuità fino al 2000.

La riduzione della portata minima è dovuta soprattutto ai prelievi d'acqua dal bacino. L'evoluzione dei consumi idrici dal 1920 al 1962 è illustrata nella Fig. 8. Dato che sono considerati solo i prelievi superficiali (prese da fiumi, laghi e sorgenti), i prelievi potrebbero essere in qualche misura sottostimati. L'aumento dei consumi nel periodo estivo indica l'importanza dei prelievi irrigui.

Per determinare l'entità della risorsa, una ricostruzione delle portate naturali dei corsi d'acqua fu intrapresa da CALENDÀ & UBERTINI (1993). Le portate misurate furono corrette aggiungendo le concessioni idriche, modificate in base a tipologie di uso standard, definite e codificate per descrivere le caratteristiche dei prelievi e delle restituzioni dell'acqua usata, in termini sia di variabilità temporale, sia di efficienza dissipativa dell'uso. La serie delle portate minime naturali così calcolate è rappresentata nella Fig. 9. Si può tuttavia osservare che nel periodo 1920-1962 la media delle portate minime risulta ancora nettamente inferiore a quella nel periodo precedente. A prima vista questo andamento potrebbe essere spiegato da due cause distinte:

- a) all'aver trascurato di tener conto delle estrazioni da pozzo;
- b) un periodo di precipitazioni più basse.

L'ipotesi a) può essere senz'altro respinta, almeno come causa principale, perché sappiamo da informazioni indipendenti che prima

After this, flow measurement were regularly made each year and the stage-discharge relationship was kept up to date.

The series of the minimum flow of each year is shown in Fig. 7, with the 49 years moving averages. It clearly appears that after the early twenties the minimum flow began to decrease, and the decrease continued steadily up to our days.

The reduction of the minimum flow is mainly due to the increase of water withdrawals from the basin. The evolution of the water uses from 1920 to 1962 is shown in Fig. 8. Only the surface withdrawals (intakes from rivers, lakes and springs) are included in the figures, so the value are somewhat underestimated. The increased values in the summer period indicate the large amount of irrigation consumption.

In order to determine the amount of the resource, the reconstruction of the natural river flows had been previously attempted by CALENDÀ & UBERTINI (1993). The measured flows were corrected adding the water concessions, modified following standard types of use, defined and codified in order to describe the characteristics of the fresh water withdrawal and of used water return, with regard to temporal variability and dissipation efficiency of the use. The series of Tiber River natural minimum flows at Rome (Ripetta), thus computed, is shown in Fig. 9. In the period 1920-1962 the average minimum flow is still significantly lower than in the previous period. Two causes have been at first envisaged to explain this pattern:

- a) neglecting the withdrawal from wells;
- b) a period of lower precipitations.

The hypothesis a) can be rejected, at least as a principal cause, since we know independently that prior to 1960 the withdrawals from

Fig. 9 - Portate naturali del Fiume Tevere a Roma (Ripetta):
minimi annuali
- *Natural flow of the Tiber River at Rome (Ripetta):*
annual minima

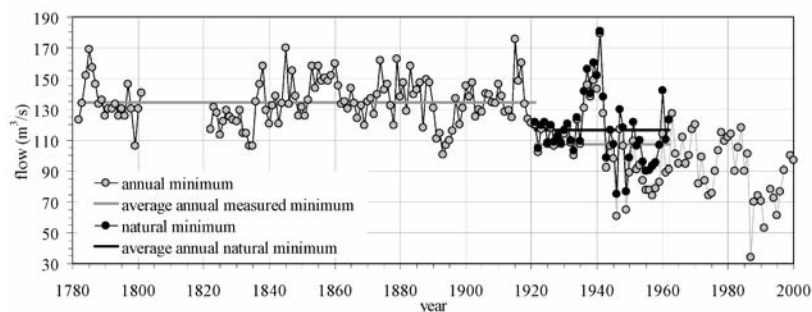
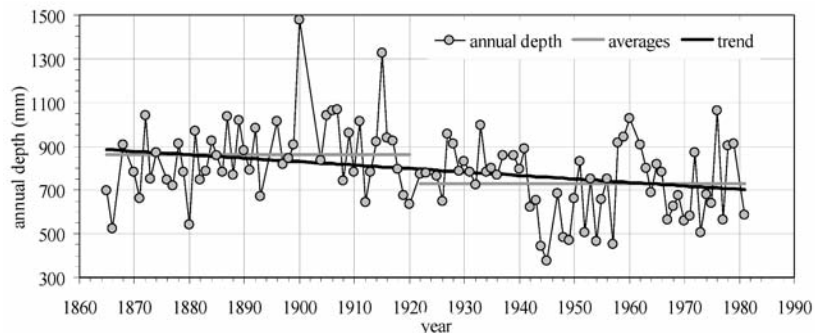


Fig. 10 - Altezze di pioggia annue a Roma (UCEA)
- *Annual rainfall depth at Rome (UCEA)*



del 1960 i prelievi da pozzo erano all'epoca relativamente bassi, e non potevano avvicinarsi ai circa $18 \text{ m}^3/\text{s}$ che rappresentano la differenza tra le medie delle misure che precedono e che seguono il 1921.

Per controllare l'ipotesi b) si considera la serie delle altezze di pioggia annuali al pluviometro di Roma UCEA (Collegio Romano). Come mostra la Fig. 10, l'altezza media precedente al 1920 è effettivamente più elevata di quella del periodo precedente a questa data. L'ipotesi b) sembrava dunque promettente, ma per accettarla occorre scartare l'ipotesi che la serie presentasse qualche disomogeneità.

Di conseguenza la serie di Roma UCEA è stata controllata con altre serie di lunga durata dell'Italia Centrale (Perugia, L'Aquila, Arezzo, Livorno) per mezzo del metodo della doppia massa. I risultati in termini di doppia massa normalizzata sono mostrati nella Fig. 11.

Appare chiaramente che in tutti i casi la linea di doppia massa tende a piegare verso l'alto tra gli anni venti e i trenta. Ciò indica una disomogeneità delle misure al pluviometro di Roma UCEA. L'esame degli Annali Idrologici segnala tra il 1931 e il 1932 una variazione della quota d'installazione del pluviometro da 17 m s.m. a 51 m s.m.. L'altezza dal suolo della bocca dello strumento (34 m) non sarebbe però cambiata. Dato che 51 è la somma di 17 più 34, è probabile che ci sia stata qualche confusione; tuttavia, dato che questo è l'unico cambiamento segnalato dagli annali, esso almeno fa pensare che tra il 1931 e il 1932 quel pluviometro abbia richiamato, per ignoti motivi, l'attenzione dell'estensore degli annali. Si è provato allora a vedere cosa succede se si assume l'anno 1931 come il momento in cui si è verificata la discontinuità. Benché si tratti soltanto di un'ipotesi congetturale, le osservazioni del pluviometro di Roma UCEA sono state modificate nel rapporto tra la pendenza media della linea di doppia massa tra gli altri pluviometri (Perugia, L'Aquila, Arezzo e Livorno) e quello di Roma UCEA nei due periodi (prima e dopo il 1931). Come

wells were comparatively low, and could not amount to $18 \text{ m}^3/\text{s}$, which is the average difference still unexplained between the period before and after 1921.

In order to check hypothesis b) the series of annual precipitation depths at the rain-gauge of Rome UCEA (Collegio Romano) is considered. As Fig. 10 shows, the mean depth before 1920 is effectively higher than that before this date. So the second hypothesis looks promising, but in order to accept it, the eventuality of the Rome UCEA series being not homogeneous must be ruled out.

The Rome UCEA series is then checked against other long precipitation series in Central Italy (L'Aquila, Perugia, Arezzo, Livorno) using the double mass method. The results in terms of normalised double mass are shown in Fig. 11.

It clearly appears that the lines of double mass tend in all cases to bend upward, starting somewhere between the twenties and the thirties. That indicates a non-homogeneity in the series of the Rome UCEA rain gauge. The examination of the Hydrological Annals show that between 1931 and 1932 the elevation of the gauge installation changed from 17 m s.l. to 51 m s.l.. The height of the mouth of the instrument from the soil (34 m) however did not change. Since 51 is the sum of 17 plus 34 it is probable that some muddle took place. This being the only change registered in the annals during the period, it at least indicates that between 1931 and 1932 some attention had been given to the gauge, and that something may have happened at that time, having an influence on the measurements. So, year 1931 was tentatively assumed as the moment when a discontinuity in the series occurred. Although this is merely a conjectural hypothesis, the measurement of the UCEA gauge were modified by the ratio of the average normalised double mass slope between the other gages

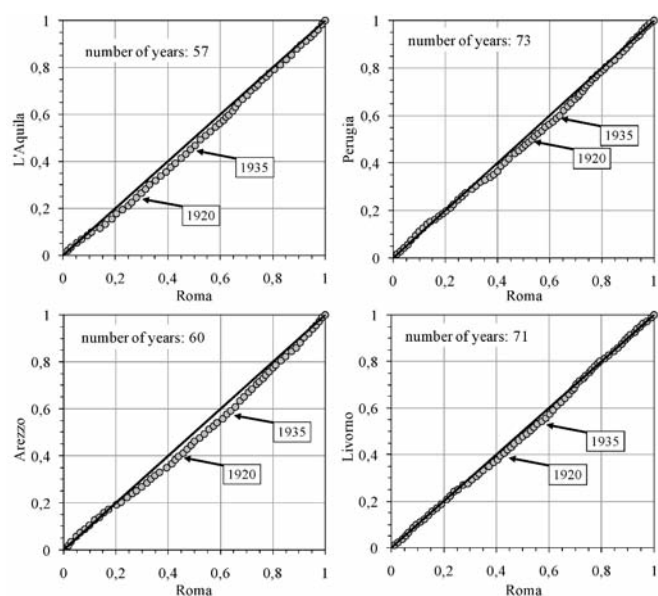


Fig. 11 - Doppia massa tra le altezze annue di pioggia misurate ai pluviometri di Roma (UCM) e ad altri pluviometri
 - Double mass between the annual depths measured at the rain gauge of Rome (UCM) and those at other locations

era da aspettarsi, le linee di doppia massa normalizzate, indicate nella Fig. 12, sono completamente rettificata. Dato che la serie delle altezze annue così modificata non mostra alcuna tendenza (Fig. 13), l'ipotesi di un periodo di minori precipitazioni dopo il 1920 (ipotesi b) non trova conferma. Risultati alquanto differenti si ottengono se si considera il pluviometro di Perugia. Qui le altezze di pioggia annuali osservate nel periodo 1920-1962 sono mediamente più basse del 8.3% di quelle nel periodo 1874-1920. Questa riduzione può spiegare almeno in parte quella delle portate minime naturali del Tevere a Roma.

Si può tuttavia provare ad avanzare un'ulteriore ipotesi: che la ricostruzione delle portate naturali sia affetta da qualche errore. È verosimile, ad esempio, che gli usi irrigui non siano così rigidamente distribuiti nel tempo da adeguarsi alla legge di prelievo illustrata nella Fig. 8b, che presenta un forte picco nel mese di agosto e una brusca caduta a un valore molto basso a settembre: quando le precipitazioni sono basse l'irrigazione può proseguire intensa anche nei mesi di settembre e ottobre. Sarebbe pertanto opportuna una revisione dell'andamento temporale degli usi irrigui.

L'analisi delle portate di magra è stata sviluppata anche per le altre stazioni di misura delle portate del bacino del Tevere. In alcuni casi si è resa necessaria una revisione della scala di deflusso. Ad esempio, le portate dell'alto Tevere, misurate alla stazione di Ponte Nuovo, presso Perugia, mostrano valori molto alti dopo il 1970, che non sono verosimili (punti bianchi nella Fig. 14). L'esame della scala di deflusso (Fig. 15) mostra che la curva ufficiale non interpola correttamente le misure di magra, sovrastimando la portata. I valori modificati, indicati dai punti scuri nella figura 14, presentano una netta tendenza a diminuire, attribuibile ai prelievi. La tendenza scom-

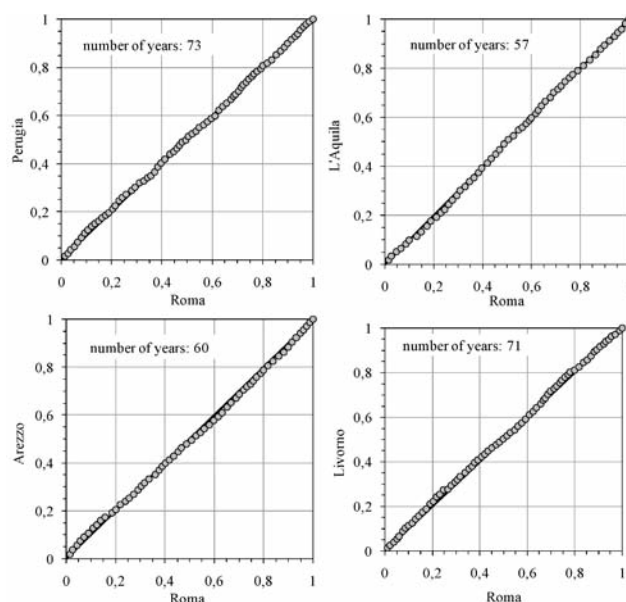


Fig. 12 - Doppia massa tra le altezze annue di pioggia modificate calcolate ai pluviometri di Roma (UCM) e ad altri pluviometri
 - Double masses between the modified annual depths evaluated at the rain gauge of Rome (UCM) and those at other locations

(Perugia, L'Aquila, Arezzo, Livorno) and the Rome UCEA gauge of the two periods (before and after 1931). The resulting normalised double masses in Fig. 12 are as straight as could be expected. The modified series in Fig. 13 shows no trend at all. So the hypothesis of a period of lower precipitation in Rome (hypothesis b) after 1920 to 1980 is not confirmed. Somewhat different are the results if the Perugia rain gauge is considered. Here the annual depths observed in the period 1920-1962 are 8.3% lower than those in the period 1874-1920. This reduction may at least in part explain that of the natural minimum flows of the Tiber in Rome.

A further hypothesis can however be put forward: that the reconstruction of the natural flows is somehow faulty. It is likely, for example, that the irrigation uses are not so rigidly distributed to give the withdrawal pattern shown in Fig. 8b, with a marked peak during the month of August and then a brusque drop to minimal values in September: when precipitation are low the irrigation may continue at a significant rate also during the months of September and October. Thus a careful revision of irrigation uses would be in order.

The analysis of the minimum flows is developed also for all the other flow measurement stations of the basin of the Tiber. In some cases a revision of the stage discharge relationships is necessary. For instance, the measured discharges of the upper Tiber at Ponte Nuovo, near Perugia, shows very high values after 1970, which are unlikely (white dots in Fig. 14). An examination of the stage discharge relationship (Fig. 15) points out that the official curve does not interpolate correctly the low flow measurements, overestimating the discharge. The modified values, marked by dark dots in figure 14, show

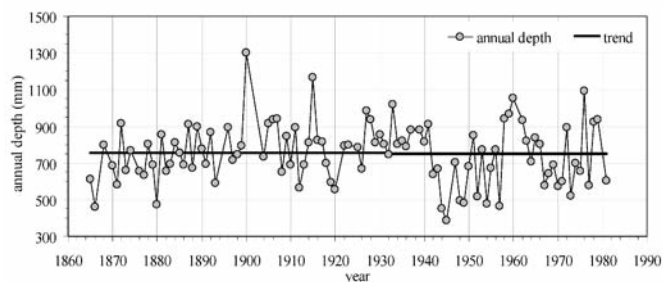


Fig. 13 - Valori modificati delle altezze di pioggia annue a Roma (UCM)
- Modified values of annual rainfall depth at Rome (UCM)

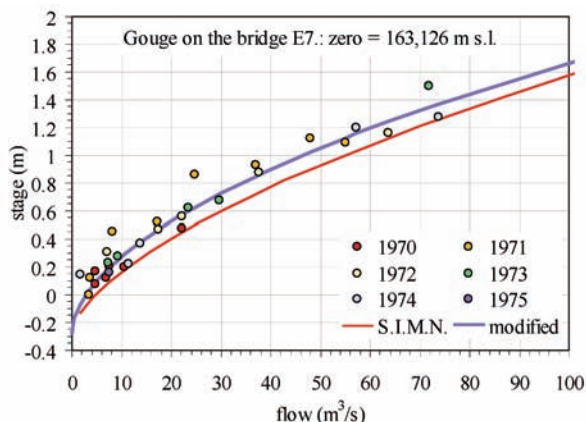


Fig. 15 - Scala di deflusso del Fiume Tevere a Ponte Nuovo (1970-80)
- Stage-flow relationships for the Tiber River at Ponte Nuovo (1970-80)

pare quando le portate misurate sono sostituite da quelle naturali, calcolate aggiungendo i prelievi stimati sulla base delle concessioni (Fig. 16). Si può ritenere, dunque, che in questo caso le portate naturali siano state stimate abbastanza correttamente.

La distribuzione di probabilità delle portate minime naturali mediate su sette giorni consecutivi (Q_7) sono stimate con una distribuzione del minimo valore tipo 3 in tutte le stazioni di misura. Ad esempio, la distribuzione per il Tevere a Roma (Ripetta) è indicata nella figura 17a in termini di variabile standardizzata di Gumbel e 17b in termini di tempo di ritorno.

Sfortunatamente le stazioni di misura delle portate sono poco numerose, mentre l'Autorità di Bacino è interessata a un maggior numero di sezioni. Vi è quindi il problema di trasferire le distribuzioni dalle sezioni di misura a quelle d'interesse. A questo scopo sono state usate diverse altre fonti di informazione, tra cui soprattutto la carta idrogeologica sviluppata da BONI *et alii* (1986, 1988). Di fondamentale importanza è stato lo studio sviluppato in contemporanea per l'Autorità di Bacino del Fiume Tevere (BONI, 2003), che fornisce la localizzazione e la portata (in molti casi media e minima) delle sorgenti lineari e puntuali dei complessi carbonatici, che sono la principale fonte di alimentazione idrica del bacino Tevere. Questi risultati sono usati per assegnare le variazioni dei parametri delle distribuzioni tra le sezioni di misura. In qualche caso le portate valutate da BONI (2003), basate su

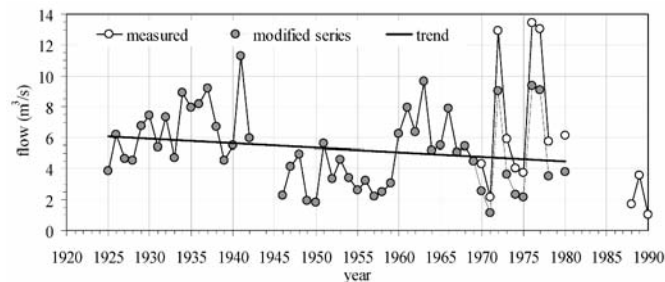


Fig. 14 - Portate del Fiume Tevere a Ponte Nuovo: minimi annuali
- Flow of the Tiber River at Ponte Nuovo: annual minima

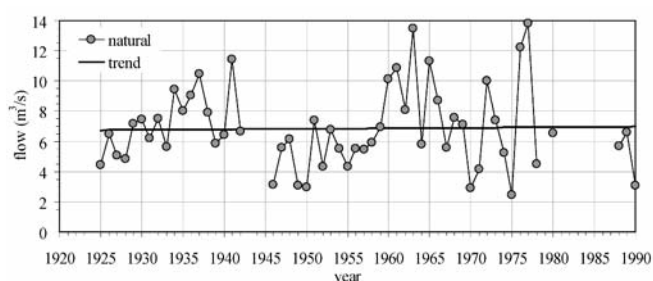


Fig. 16 - Portate naturali del Fiume Tevere a Ponte Nuovo: minimi annuali
- Natural flow of the Tiber River at Ponte Nuovo: annual minima

a distinct downward trend, due to the water uses. This trend vanishes when the measured flow are replaced by the natural flows, computed by adding the water uses estimated on the basis of water concessions (Fig. 16). It can be assumed then that, in this case, the natural discharges are correctly estimated.

The probability distribution of the natural minimum flow averaged over seven consecutive days (Q_7) is estimated using the Extreme Value Type 3 distribution of the minimum value in all the measurement sections. As an example, the distribution for the Tiber River at Rome (Ripetta) is shown in Fig. 17a as Gumbel standard variable and Fig. 17b as return time.

Unfortunately the measurement sections are few, whereas the Authority is interested to a far larger number of sections. The problem is then to transfer the distributions from the measurement sections to all the relevant sections. To that end several other sources of information are used, and primarily the hydrogeologic chart developed by BONI *et alii* (1986, 1988). Fundamental is the study developed at the same time for the Basin Authority of the Tiber River (BONI, 2003), which gives the location and the flow (both average and minimum) of the point and linear springs in the Carbonatic complex, which is the main water source in the Tiber basin. The results are used to apportion the distribution parameters in the stretches between the measurement sections. In a few cases the flow evaluation given by BONI (2003), which are based on comparatively recent measurement, are suspected to be still affected by the water uses. In this cases, if possible, the data of the "Carta Idrografica d'Italia" (PERRONE, 1908) are used for comparison. This chart was published in 1908, thus referring to a period in which the

River	Station	Reach	Area (km ²)	Low flow discharge (m ³ /s)												
				Return period (years)							BONI (2003)			SIMN	PERRONE (1908)	
				1.1	1.2	1.5	2	3	5	10	first	aver.	min	Q ₇ min	ord.	extr.
Aniene		AN01	1468	33.3	30.9	27.4	24.9	22.6	20.7	18.9	22				21.0	19.0
“		AN02	1237	28.4	26.3	23.4	21.2	19.3	17.6	16.1	21					
“		AN03	1201	27.6	25.5	22.7	20.6	18.7	17.1	15.7	21					
“	Lunghezza	AN04	1115	25.7	23.8	21.1	19.2	17.4	15.9	14.6	20			12.8		
“		AN05	1065	24.4	22.6	20.1	18.3	16.6	15.2	13.9	18				16.2	14.0
“		AN06	735	18.6	17.1	15.1	13.6	12.3	11.2	10.2	15.3				13.7	13.0
“		AN07	450	15.7	14.4	12.6	11.4	10.3	9.35	8.56	12	12.84	7.37		13.2	12.7
“	Subiaco	AN08	233	5.65	5.10	4.38	3.88	3.46	3.13	2.86	2.2	6.14	2.66	2.56	4.00	3.50
“	Cascata di Trevi	AN09	126	3.14	3.01	2.81	2.64	2.44	2.25	2.02	1.6	2.95	1	2.13	2.20	1.80
Cerfone		CF01	283	0.62	0.49	0.35	0.25	0.18	0.13	0.10			1.22			
Chiani		CH01	458	0.51	0.41	0.29	0.21	0.15	0.10	0.07					0.00	0.00
“	P. Morrano	CH02	422	0.47	0.38	0.27	0.20	0.14	0.09	0.06				0.03		
“		CH03	270	0.30	0.24	0.17	0.13	0.09	0.06	0.04						
Chiasco	Torgiano	CI01	1956	8.18	7.28	6.08	5.21	4.44	3.82	3.29	5.9			2.66	3.60	3.05
“		CI02	677	0.81	0.75	0.66	0.60	0.54	0.50	0.46	1.1					
“		CI03	581	0.81	0.75	0.66	0.60	0.54	0.50	0.46	1.1				0.60	0.50
“		CI04	556	0.81	0.75	0.66	0.60	0.54	0.50	0.46	1.1					
“		CI05	532	0.81	0.75	0.66	0.60	0.54	0.50	0.46	1.1					
“		CI06	450	0.71	0.65	0.56	0.50	0.44	0.40	0.36	0.7	0.625			0.50	0.40
“		CI07	307	0.31	0.28	0.23	0.20	0.17	0.15	0.13		0.47			0.20	0.15

Tab. 1 - Portate di magra ordinaria e estrema calcolate, confrontate con altri studi e con dati osservati
- *Computed ordinary and extreme low flows compared to other studies and observed data*

misure relativamente recenti, sembrano ancora affette dai prelievi. In questi casi si è fatto uso, ove disponibili, dei dati della "Carta Idrografica d'Italia" (PERRONE, 1908). Questa carta, infatti, è stata pubblicata nel 1908, e si riferisce dunque a un'epoca in cui i prelievi idrici erano ancora molto bassi. Le portate ottenute in ciascuna sezione per i tempi di ritorno di 1.1, 1.2, 1.5, 2, 3, 5 e 10 anni sono confrontate con i valori forniti da BONI (2003) in diverse sezioni (in molti casi una prima stima è stata successivamente precisata fornendo una portata minima e una media), e con le portate ordinarie ed estreme fornite dalla "Carta Idrografica d'Italia". Un esempio è riportato nella Tab. 1.

MINIMO DEFLUSSO IN ALVEO

Uno degli obiettivi prioritari della gestione della risorsa idrica è la conservazione del Minimo Deflusso in Alveo (MIF), che può essere definito come la minima portata che garantisce la conservazione del fiume dai punti di vista fisico e ecologico, consentendo gli usi in alveo dell'acqua (come navigazione e turismo).

La determinazione del Minimo Deflusso in Alveo non è un'operazione meramente tecnica, ma coinvolge anche decisioni politiche; tuttavia gli aspetti tecnici devono essere chiaramente formulati

amount of water uses was still very low. The flows obtained in each section for return times of 1.1, 1.2, 1.5, 2, 3, 5 and 10 years are compared with the values given by BONI (2003) in several sections (in some cases a first estimate was successively detailed, giving an average flow and a minimum flow estimate), and with the ordinary and extreme values of the "Carta Idrografica d'Italia". An example is given in Tab. 1.

MINIMUM INSTREAM FLOW

One of the strictly priority objectives in water resources management is the preservation of the minimum instream flow in rivers, that can be defined as the minimum flow warranting the conservation of the river from the physical and ecological point of view, and allowing the instream uses of the water (as navigation and tourism).

Fixing the values of the minimum instream flow is not a merely technical operation but involves political decisions as well. The technical aspects however must be clearly stated before the decision is

Fig. 17 - Fiume Tevere a Roma (Ripetta): distribuzione del minimo delle portate medie di sette giorni consecutivi
 - *Tiber River at Rome (Ripetta): distribution of annual minimum of the seven days flow*

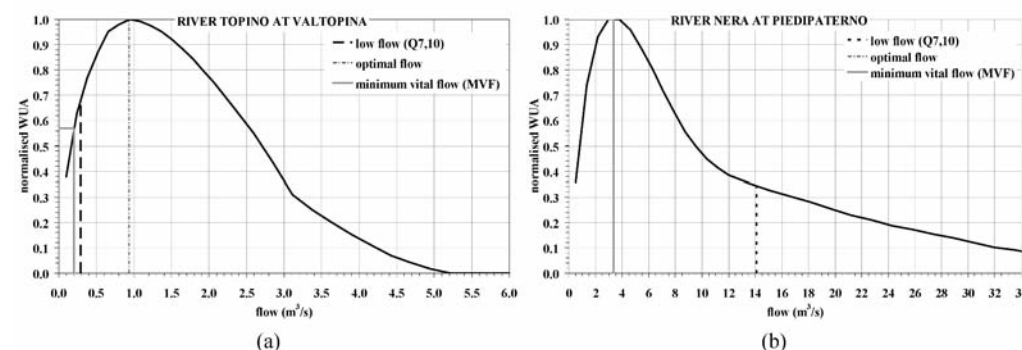
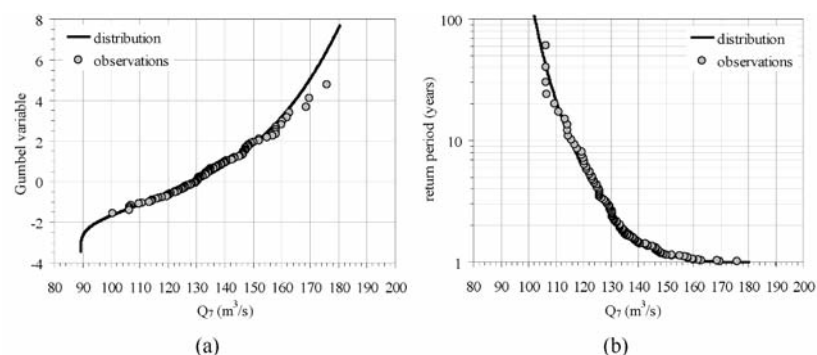


Fig. 18 - Aree disponibili ponderali (WUA) (a) per il barbo adulto e (b) per la trota adulta
 - *Weighted Usable Area (WUA) (a) for the adult barbel and (b) for the adult trout*

prima della decisione. In questo caso, dal punto di vista tecnico il principale aspetto esaminato è l'uso in alveo per un'adeguata conservazione dell'habitat, ossia il Minimo Deflusso Vitale (MVF). Questo aspetto era stato preventivamente esaminato secondo la Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) (BOVEE, 1982) da uno studio svolto dal Dipartimento di Acque e Strutture dell'Università di Perugia per l'Autorità di Bacino del Fiume Tevere (AA.VV., 1999).

Individuata preventivamente per ogni corso d'acqua la specie bersaglio (il barbo o la trota, a seconda del caso, come in Tab. 2), questo studio fornisce l'andamento dell'Area Disponibile Ponderale (WUA) per i vari stadi di sviluppo della specie. Un esempio per il barbo nel Fiume Topino a Valtopina e uno per la trota nel Fiume Nera a Piedipaterno sono rappresentati rispettivamente nella Fig. 18.

La Fig. 18 mostra due comportamenti tipici per il bacino del Tevere: tra i corsi esaminati la portata di magra è generalmente molto bassa in quelli in cui la trota non compare ed il barbo è stato assunto come specie bersaglio, mentre è relativamente elevata in quelli in cui la specie bersaglio è la trota. Assumendo come indicatore di magra la minima portata media di sette giorni con tempo di ritorno di 10 anni, $Q_{7,10}$, nel primo caso l'ottimo della WUA si verifica generalmente per una portata Q_{opt} molto più alta della portata di magra (Fig. 18a). Nel secondo caso avviene il contrario (Fig. 18b). I valori di $Q_{7,10}$ e Q_{opt} per tutti i tratti esaminati sono elencati nella Tab. 2. Diverso è il caso del Tevere a valle della confluenza del Fiume Nera, le cui portate di magra sono fornite quasi esclusivamente dal Nera ed ha una portata minima relativamente elevata, ma non costituisce un habitat adatto alla trota a causa della qualità dell'acqua.

Per i fiumi a barbi (escluso il basso Tevere) si è quindi proposto di

taken. In this case, from the technical point of view the principal aspect examined is the instream flow for an adequate the conservation of the habitat, or Minimal Vital Flow (MVF). This aspect had been previously studied following the Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) (BOVEE, 1982) by the Department of Water and Structures of the Perugia University, in behalf of the Basin Authority of the Tiber River (AA.VV., 1999).

Having previously find out for each stream a suitable target species of fish (barbel or trout according to the case, as in Tab. 2), this study produced the pattern of the Weighted Usable Area (WUA) for each life stage of the species. An example for the barbel in the River Topino at Valtopina and for the trout in the River Nera at Piedipaterno are given respectively in Fig. 18.

Figure 18 shows two patterns typical for the basin of the Tiber: among the examined rivers, the minimum flow is usually very low in the streams where no trout are found and the barbel is assumed as target species, while it is comparatively high in the streams where the trout is the target species. Assuming as low flow indicator the seven day average discharge with 10 year return period, $Q_{7,10}$, in the first case the optimum of the WUA generally occurs for a discharge (Q_{opt}) much higher than the low flow (Fig. 18a). In the second case the contrary occurs (Fig. 18b). The value of $Q_{7,10}$ of Q_{opt} for all the sections examined are listed in Tab. 2. A significant exception to this pattern is the Tiber downstream of the confluence of the River Nera, whose low flows are supplied almost entirely by the River Nera and has a high minimum flow, but where the trout is not found.

For the barbel rivers (the lower Tiber excluded) it is then pro-

river	reach	species	area (km ²)	Q _{7,10} (m ³ /s)	Q _{opt} (m ³ /s)	WUA _v
Tevere	TV42	barbel	274	0.01	1.00	0.50
Tevere	TV37	barbel	934	0.33	2.16	0.50
Tevere	TV28	barbel	4147	3.83	8.00	0.99
Treia	TE02	barbel	497	1.90	1.25	1.00
Paglia	PG02	barbel	1320	0.30	2.20	0.73
Chiascio	CI05	barbel	532	0.46	1.31	0.81
Topino	TP04	barbel	273	0.295	0.94	0.57
Aniene	AN08	trout	233	2.86	1.99	0.93
Nera	NE09	trout	1017	11.20	3.25	1.00
Nera	NE07	trout	1282	14.11	3.40	1.00
Vigi	VG01	trout	106	1.17	1.04**	0.79**
Corno	CR02	trout	612	3.79	2.59	0.96
Menotre	ME01	trout	127	0.69	1.23	0.60

** two sections average

Tab. 2 - Classificazione dei tratti fluviali in base alle specie bersaglio nel bacino del Fiume Tevere

- Classification of river reaches according to fish target species in the Tiber basin

adottare come MVF una frazione della Q_{7,10} ancora in grado di garantire un valore accettabile delle WUA (una frazione adeguata potrebbe essere 0.7). Per i fiumi a trote si propone, invece, di adottare il valore minimo tra la Q_{opt} e 0.5 Q_{7,10}. I valori delle WUA corrispondenti ai MVF così determinati (WUA_v) sono indicati nella Tab. 2.

Come precedentemente osservato, il Minimo Deflusso in Alveo (MIF) può risultare maggiore del MVF perché può dipendere anche da altre esigenze. Inoltre, le condizioni a valle possono imporre a monte un deflusso in alveo maggiore di quello richiesto da esigenze locali. Un esempio è mostrato nella Fig. 19: alla confluenza del Fiume Nera con il Tevere, la portata richiesta nel tronco del Tevere a valle è fissata in base alle condizioni richieste nel tratto metropolitano romano. Così il Nera deve fornire una portata molto maggiore di quella richiesta per esigenze ecologiche.

Una delle priorità del tronco metropolitano del Tevere è la navigazione turistica e ricreazionale. Inoltre una cospicua portata è richiesta per mantenere al fiume il suo carattere di perennità, con una corrente che occupi l'intera larghezza del letto, e per diluire le portate degli emissari dei depuratori. Una stima di queste esigenze certamente supera il 50% della Q_{7,10} naturale, valore che approssima i valori minimi della portata misurata annualmente a Ripetta.

RISORSE IDRICHE DISPONIBILI

Per calcolare le risorse ancora disponibili nel bacino del Fiume Tevere è stato sviluppato un apposito modello. In ciascuna sezione gli ingressi del modello sono costituiti da: le portate naturali attese per differenti tempi di ritorno, il Minimo Deflusso in Alveo, i prelievi e le restituzioni d'acqua a monte disposte in ordine di priorità (potabili, irrigui, industriali, ittogenici, idroelettrici). La risorsa disponibile in ciascuna sezione è calcolata sottraendo alla portata naturale prima il MIF e poi i prelievi in ordine di priorità. Se tutta la portata è consumata da usi ad alta priorità, viene segnalata la necessità di tagliare gli usi a priorità più bassa. Nel caso del Tevere, i valori del MIF nel bacino sono largamente

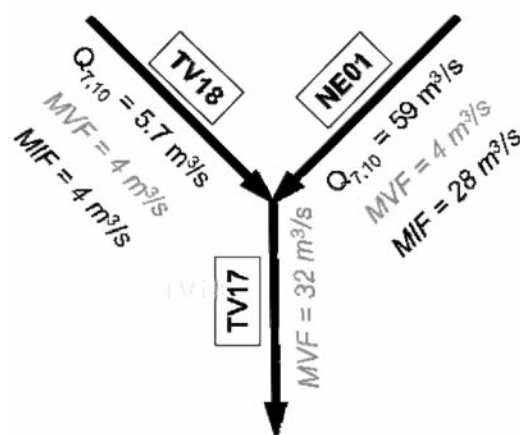


Fig. 19 - Minimo Deflusso in Alveo (MIF) e Minimo Deflusso Vitale (MVF)

- Minimum Instream Flow (MIF) and Minimum Vital Flow (MVF)

posed to assume as MVF a fraction of the Q_{7,10}, still able to guarantee an acceptable value of the WUA (a suitable fraction could be 0.7). For the trout rivers it is proposed to assume as MVF the lower value between Q_{opt} and 0.5 Q_{7,10}. The value of the WUA corresponding to the proposed MVF (WUA_v) are listed in Tab. 2.

As previously stated, the Minimum Instream Flow (MIF) can be greater than the MVF because it may depend on other needs.

Besides, downstream conditions may impose upstream an instream flow greater than that required by local factors. An example is shown in Figure 19: at the confluence of the River Nera with the Tevere, the flow required in the downstream reach of the Tevere depends on the condition required in Rome. So the River Nera must supply a discharge far greater than that determined by ecological needs.

One of the priority for the metropolitan course of the Tiber is the touristic and recreational navigation. Besides, a substantial flow is required to maintain to the river the character of perennial stream, occupying the whole width of its bed, and to dilute the outflows of the water treatment plants. An estimate of these requirements certainly exceeds the 50% of the natural Q_{7,10} which presently equals the approximate value reached by the minimum annual flow measured at the Ripetta gauge.

AVAILABLE WATER RESOURCES

A model is developed to compute the water resources still available in the basin of the Tiber River. In each section the model inputs are: the expected natural flows for different return times, the required instream flow, the upstream fresh water withdrawals and used water returns, ranged in a strict priority order (drinking, irrigation, industrial, ichthyogenic, hydroelectric). The available resource in each section is computed by subtracting from the natural flow, first the instream flow and then the water uses following the established priority order. If all the usable water is consumed by a high priority use, the necessity of cutting down the lower priority uses is pointed out. The amount of instream flow is

determinati dal MIF scelto per il tratto metropolitano del fiume, che costituisce una delle principali variabili decisionali del sistema.

CONCLUSIONI

Il lavoro di cui si è presentata qui una breve sintesi è stato svolto per l'Autorità di Bacino del Fiume Tevere con l'obiettivo principale di valutare la risorsa idrica ancora disponibile in assegnate sezioni dei corsi d'acqua del bacino, al netto del minimo deflusso vitale, con una stima del rischio d'insufficienza. Lo studio ha quindi finalità pratiche, in quanto si propone di servire come riferimento per il rilascio di nuove concessioni e per la necessaria la revisione di quelle in atto. I risultati mostrano che in gran parte del bacino i prelievi concessi superano di gran lunga le disponibilità di magra, per cui in molte sezioni è impossibile mantenere il minimo deflusso vitale.

Sfortunatamente le misure di magra sistematiche eseguite nell'ambito del bacino sono poche e rade nell'epoca in cui i prelievi erano ancora trascurabili. Non è possibile rimediare a questa carenza, per quante misura si possano fare oggi. Pertanto le portate naturali del bacino devono essere valutate a posteriori a partire dai prelievi recenti e attuali. All'epoca in cui si avviò la ricostruzione delle portate naturali, l'unico censimento sistematico degli usi idrici era quello dei prelievi da acque superficiali. Una volta attuato il censimento dei prelievi da pozzi queste valutazioni potranno essere aggiornate, e ciò potrà essere d'aiuto a chiarire alcuni problemi che sono ancora aperti. Nello studio, la valutazione del minimo deflusso vitale, benché basata su una metodologia consolidata, è ancora grossolana, e le sezioni fluviali su cui sono state compiute le indagini sono ancora poche. Arrivare ad una più realistica valutazione delle esigenze idriche delle biocenosi richiederà studi sistematici più approfonditi, attualmente carenti o non resi ancora disponibili in una forma utilizzabile per l'ingegnere idrologo.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AA.VV. (1999) - *Misure Idrometriche per la definizione metodologica delle portate di minimo vitale*. Dipartimento di Ingegneria delle Acque e delle Strutture, Università degli Studi di Perugia.
- BONI C. (2003) - *Aggiornamento e verifica degli studi idrogeologici sulle strutture carbonatiche che alimentano le sorgenti ed il reticolo idrografico perenne del Bacino del Fiume Tevere*. Autorità di Bacino del Fiume Tevere.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema Idrogeologico dell'Italia Centrale*. Memorie Società Geologica Italiana, 35.
- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1988) - *Carta Idrogeologica della Regione Lazio*. Regione Lazio.
- BOVEE K. D. (1982) - *A user guide to instream flow incremental methodology*. U.S. Fish and Wildlife Service Biological Service Program, FW/OBS-80-52.
- CALENDA G. & MANCINI C. (2005a) - *Portate di magra del Tevere a Roma*. Autorità di Bacino del Fiume Tevere.
- CALENDA G. & MANCINI C. (2005b) - *Uso sostenibile delle acque del bacino del Tevere*. Autorità di Bacino del Fiume Tevere.
- CALENDA G. & UBERTINI L. (1993) - *Gestione integrata degli invasi e definizione del minimo vitale*. Autorità di Bacino del Fiume Tevere, Roma.
- DALL'OGGIO S. (1987) - *La nuova livellazione dello zero all'idrometro di Ripetta*. Giornale del Genio Civile, 1, 2, 3.
- FROSINI P. (1977) - *Il Tevere*. Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 323 pp.
- LA LOGGIA G. (1998) - *Sistemi idrici e uso sostenibile delle acque*. Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, CUECM, Catania, V, 131-163.
- MONTANARI T. (1983) - *Calcolo delle portate del Tevere, secondo i rilievi ufficiali*. Il Politecnico.
- PERRONE E. (1908) - *Carta Idrografica d'Italia*. Tevere. Ministero di Agricoltura e Commercio, 486 pp.
- VESCOVALI A. (1875) - *Studi idrometrici sul Fiume Tevere*. Giornale del Genio Civile.
- VESCOVALI A. (1876) - *Studi idrometrici sul Fiume Tevere e considerazioni sulla convenienza della sua rettificazione*. Giornale del Genio Civile.

Received July 2008 - Accepted December 2008

controlled by the instream flow selected for the metropolitan reach of the river, that constitutes one of the main decision variable of the system.

CONCLUSIONS

The work was developed for the Basin Authority of the Tiber River with the main objective of evaluate the water resource still available in selected sections of the water courses of the basin after the guarantee of the instream flow, with an estimate of the risk of shortage. The study had therefore a practical scope, since it had to be employed as a reference for the allotment of new water uses. The results show that in a large part of the basin the allotted resource is far in excess of the available resource during low water flow, so that in most of the sections it is impossible to keep the instream flow.

Unfortunately the systematic low flow observations throughout the basin are few and sparse in the period when the water uses were still negligible. This deficiency cannot be made good by any amount of present observations. The natural flows must then be evaluated a posteriori, from the present water uses. At the time when the reconstruction of the natural flows was attempted, the only systematic census of water uses was that of the surface waters withdrawals. After the census of the well withdrawals is completed a new assessment will be in order, and that will be helpful in clarifying some of the problem still open. In the study the assessment of the instream flow, although based on a well settled methodology, is still crude, and the river section studied are far too few. To implement a finer analysis will require deeper systematic biocenotic studies that are still lacking or not yet made available to the hydrologist engineer.

