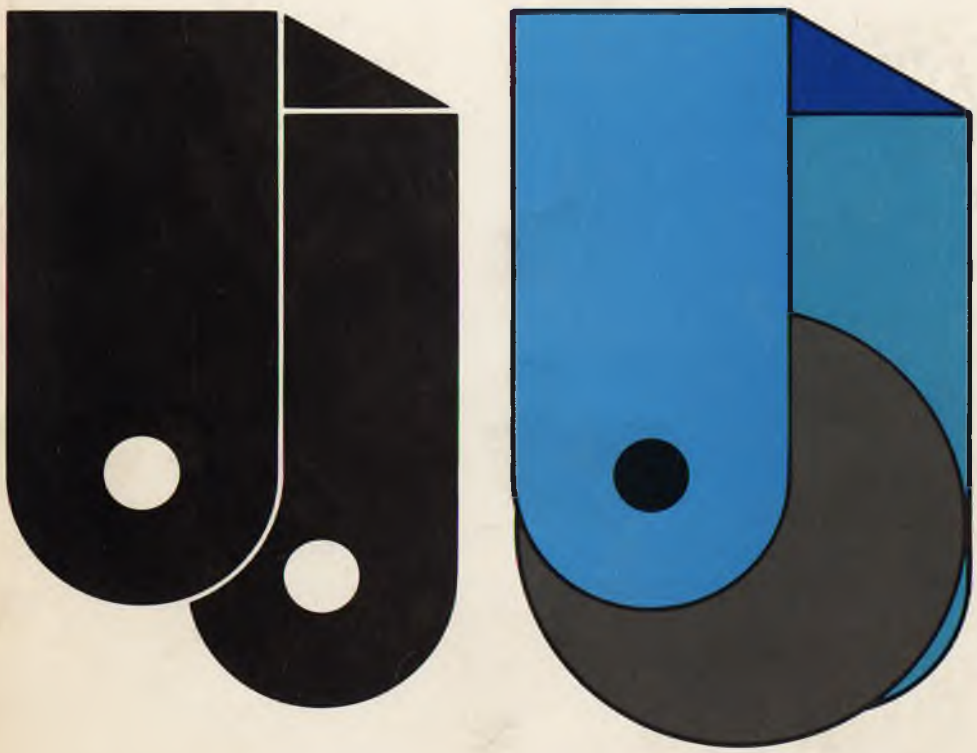


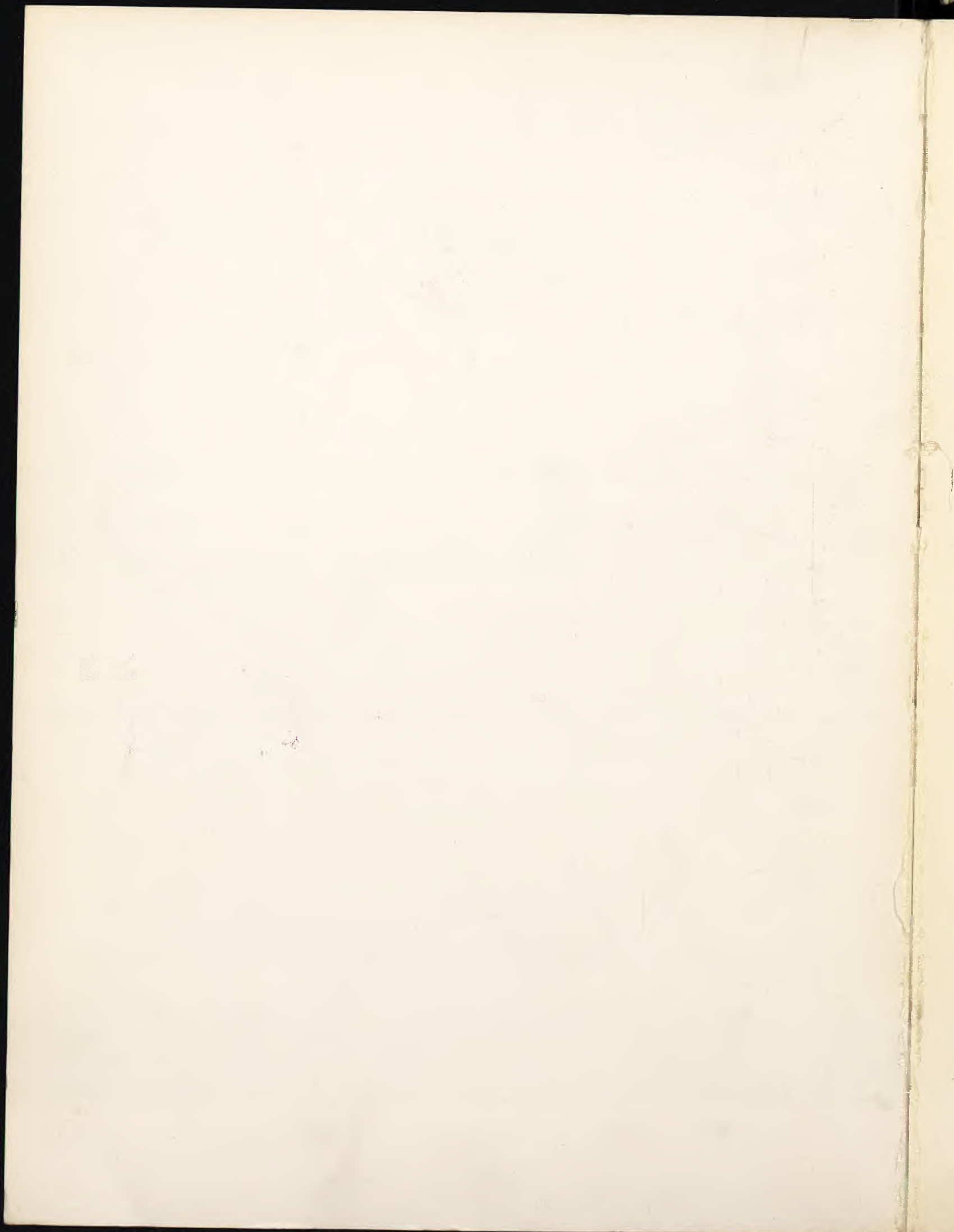
20.

QUADERNI DELLA CASSA PER IL MEZZOGIORNO

4/1



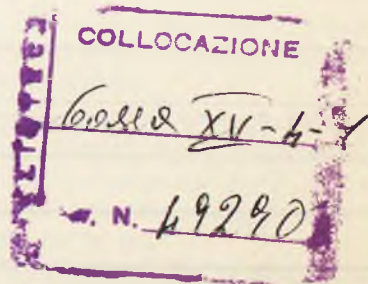
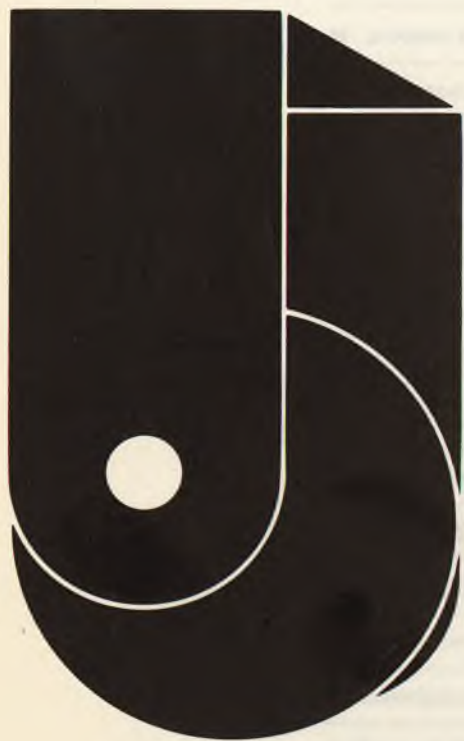
A PER
OGGIORNO
Q
/4-1
TECA



Progetti speciali per gli schemi idrici nel Mezzogiorno

Impostazione metodologica
e strumenti di analisi
per gli schemi dell'Appennino
centro-meridionale

4/1



Collaborano ai «Quaderni»:

Gaetano Argento, Claudio Bartolomei, Alberto Buonopane, Claudio Calvaruso, Alessandro Carena, Francesco Cavaliere, Pietro Celico, Antonio Cenedese, Gino Ceriani, Giuliano Cesarini, Gerolamo Colavitti, Giuseppe Consiglio, Leonardo Cuoco, Gastone Cuocolo, Francesco Maria de Falco, Angelo Del Treste, Mario D'Erme, Angelo Detragiache, Giuseppe Di Nardi, Maurizio Di Palma, Carmelo Formica, Francesco Forte, Giulio Cesare Gallo, Enzo Gambino, Antonio Giolitti, Fabrizio Giovenale, Giorgio Gugliormella, John Higgs, Ercole Incalza, Gino Lo Giudice, Gianfranco Murzi, Calogero Muscarà, Angelo Pecoraro, Luciano Piccioni, Ugo Possenti, Serenella Romeo, Manlio Rossi Doria, Renato Santelia, Gianfranco Saraca, Alfonso Silipo, Giovanni Simonelli, Vincenzo Stanganelli, Francesco Tagliamonte, Francesco Vegna, Alfonso Visconti

Copertina di Michele Spera

Edito dalla Cassa per il Mezzogiorno
Piazza Kennedy, 20 - 00144 Roma - Tel. 59911

Stampa Grafiche Magliana - Roma - 1982

Progetti speciali per gli schemi idrici nel Mezzogiorno

Impostazione metodologica
e strumenti di analisi
per gli schemi dell'Appennino
centro-meridionale

14



[Illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page]

Hanno collaborato a questo «Quaderno»:
Claudio Bartolomei, Pietro Celico, Antonio Cenedese, Gerolamo Colavitti, Giuseppe Consiglio,
Gastone Cuocolo, Francesco Maria de Falco, Angelo Del Treste, Maurizio Di Palma,
Enzo Gambino, Giorgio Gugliormella, Gianfranco Murzi, Angelo Pecoraro, Luciano Piccioni,
Ugo Possenti, Renato Santelia, Gianfranco Saraca, Vincenzo Stanganelli, Francesco Vegna.

sommario

presentazione	5
1 il progetto speciale per gli schemi idrici intersettoriali dell'Abruzzo, Campania, Molise, Lazio e Marche meridionali	9
■ obiettivi e finalità	11
■ problemi decisionali	11
■ impostazione operativa	16
2 la metodologia globale di analisi	17
■ approccio sistemico	19
■ analisi preliminari	19
■ ricerca delle soluzioni progettuali ottimali	27
■ studi settoriali	29
■ supporto elaborativo	30
3 l'analisi di un sistema idrico complesso	31
■ ottimizzazione statica	33
■ ottimizzazione intertemporale	42
■ simulazione	54
■ dimensionamento di uno schema acquedottistico	58
4 l'uso dei modelli di sistema	67
■ sensitività e parametrizzazione	69
■ minimizzazione dei costi e massimizzazione dei benefici netti	71
■ analisi costi-benefici	77
5 i modelli per la valutazione della domanda d'acqua	79
■ modello demografico	81
■ uso razionale dell'acqua nel settore irriguo	86
6 i modelli idrologici	95
■ modello statistico	97
■ modello deterministico	100
■ analisi integrata tra risorse superficiali e sotterranee	101
7 bibliografia	105

2	presentazione
9	1 Il progetto speciale per gli schemi ibridi interfonali dell'Aduzzo, Campana, Lizio e M...
11	■ obiettivi e finalità
11	■ problemi decisionali
16	■ impostazione operativa
17	2 la metodologia globale di analisi
19	■ ...
19	■ ...
27	■ ricerca delle soluzioni ottimali
29	■ studi settoriali
30	■ supporto operativo
31	3 struttura del sistema ibrido complesso
33	■ ottimizzazione statica
42	■ ottimizzazione interdinamica
54	■ ...
58	■ dimensionamento di uno schema quadrangolare
61	4 l'uso del metodo di sistema
69	■ sensibilità e parametrizzazione
71	■ minimizzazione dei costi e manutenzione dei percorsi
77	■ ...
79	5 l'analisi per la soluzione della domanda di lavoro
81	■ ...
86	■ ...
95	6 l'analisi statistica
97	■ modello statistico
100	■ ...

presentazione

La politica di intervento pubblico straordinario nelle regioni meridionali per la ricerca e la utilizzazione ottimale delle risorse idriche attraverso sistemi di interconnessione, di regolazione e di distribuzione, dura ormai da molti anni.

La legge 6 ottobre 1971, n. 853, introducendo il metodo dei progetti speciali quale fondamentale strumento di intervento, ha affinato ulteriormente la linea operativa per complessi organici, fino a quel momento seguita dalla Cassa per il Mezzogiorno, fornendo la base per un'azione più incisiva e globalmente coordinata secondo un'ottica di lungo periodo che, nel settore idrico, è stata diretta a rimuovere uno dei principali ostacoli allo sviluppo delle regioni meridionali, costituito dalla penuria di acqua e dalla irrazionale distribuzione tra i diversi impieghi e i vari territori.

Nello sviluppo dei progetti speciali idrici ha avuto un ruolo preminente la ricerca di adeguate metodologie, per armonizzare i contrastanti interessi di utenti diversi e per quantificare correttamente le disponibilità e gli effetti delle scelte operative, anche mediante l'uso su larga scala delle tecniche di analisi dei sistemi.

L'importanza e la qualità delle esperienze scientifiche compiute dalla Cassa ha suggerito l'opportunità di dedicare ad esse largo spazio nei Quaderni editi dall'Istituto, suddividendo in più volumi la trattazione della materia, per dare il necessario rilievo alla illustrazione delle citate metodologie, prima di passare alla descrizione degli interventi realizzati e in corso nel quadro dei singoli progetti speciali.

Tra queste metodologie presentano particolare interesse, anche per il loro carattere esemplificativo dei sistemi di ricerca seguiti per una organica programmazione degli impieghi idrici in tutto il Mezzogiorno, gli strumenti di valutazione e di analisi messi a punto per l'attuazione del progetto speciale n. 29, riguardante gli schemi intersettoriali dell'Abruzzo, della Campania, del Molise, del Lazio e delle Marche meridionali.

Infatti il progetto speciale n. 29 risulta essere quello che, per la complessità dei problemi affrontati e per la dimensione del territorio interessato, meglio si presta per una valutazione complessiva dell'azione condotta dalla Cassa nel particolare settore.

Alla illustrazione delle metodologie relative al citato progetto sono, quindi, dedicati il presente «Quaderno» ed altri che lo seguiranno nel corso del tempo, con lo scopo di fornire al lettore un quadro ampio ed esauriente del patrimonio di conoscenze e di esperienze, di elevato valore culturale e scientifico, accumulato dalla Cassa per il Mezzogiorno nella ricerca dei sistemi più idonei ad assicurare un ottimale uso dell'acqua.

Al riguardo occorre tenere presente che il primo gruppo di progetti speciali per l'utilizzazione intersettoriale delle acque fu formulato dal CIPE (Comitato interministeriale per la programmazione economica) nell'agosto del 1972.

Essi riguardavano le acque della Puglia e della Basilicata (n. 14), del fiume Tirso in Sardegna (n. 13) e del fiume Biferno nel Molise (n. 15).

Successivamente, tra l'agosto 1972 e il maggio 1975, il CIPE riformulava l'insieme di questi progetti sino a coprire l'intera area d'intervento della Cassa per il Mezzogiorno, confermando il n. 14 (Puglia e Basilicata) e costituendo i progetti per le acque della Sardegna (n. 25), della Calabria (n. 26) e dell'Abruzzo, Campania, Molise, Lazio e Marche meridionali (n. 29).

I cinque progetti, pur avendo ciascuno specifici elementi di caratterizzazione, sono riconducibili ad un'unica matrice, rappresentata dall'omogeneità degli obiettivi.

Loro compito è di individuare e realizzare sistemi integrati di reperimento e utilizzazione delle risorse idriche, finalizzati al più elevato sviluppo globale del territorio, dell'ambiente socio-economico e delle strutture produttive. I progetti investono, inoltre, l'intero arco di attività e discipline connesse alla gestione delle risorse idriche secondo aggiornate metodologie.

In altri termini, nelle indicazioni date dal CIPE alla Cassa, resta fermo il concetto di azione per progetti rigorosamente definiti sotto il profilo tecnico, finanziario e temporale, ma queste azioni vengono inquadrare in un disegno generale, più propriamente concepito come strumento di ricerca, pianificazione, progettazione e programmazione di interventi nel settore idrico.

Si è operato in questo modo, nella politica dell'intervento pubblico per la ricerca e l'utilizzazione dell'acqua, un rilevante salto di qualità, la cui carica innovativa, consona ad una moderna politica di sviluppo, è stata perseguita e perfezionata dalla Cassa, dal 1972 ad oggi, con la collaborazione di una pluralità di soggetti e di centri decisionali: le regioni meridionali in primo luogo.

* * *

Al pari degli altri progetti speciali idrici, anche il progetto n. 29 ha competenza su più regioni e su più settori della vita economica e civile e chiama in causa diversi centri decisionali. Ma ciò che lo caratterizza – come già si è rilevato – è il numero delle regioni interessate e la molteplicità dei centri coinvolti. D'altro lato, le aree d'intervento sono anche tra le meno omogenee del Mezzogiorno e con notevoli disuguaglianze di sviluppo civile ed economico. Si confrontino, ad esempio, le aree costiere laziali, quali la pianura pontina, con le zone interne del Beneventano; oppure si pensi ai problemi posti dalla grande concentrazione urbana del Napoletano.

Altri aspetti peculiari del progetto riguardano il reperimento delle risorse idriche, soprattutto in relazione al grande interesse che, nell'area di sua competenza, rivestono le risorse sorgentizie e, più in generale, quelle sotterranee. Il problema consiste essenzialmente nell'identificazione del processo di circolazione sotterranea e delle opportune politiche di emungimento, modulazione e ricarica.

C'è, poi, da notare che per il progetto speciale n. 29 il problema non è tanto l'assoluta penuria d'acqua, come nel caso della Sicilia e della Puglia, ma piuttosto la razionalizzazione delle scelte ai fini dell'efficacia economica dell'intervento.

Per le esposte ragioni la ricerca di adeguate metodologie ha avuto, nello sviluppo del progetto, un ruolo di grande rilevanza.

Questo significa che tutta l'elaborazione progettuale è stata basata su una serie di valutazioni ottenute utilizzando un insieme integrato di modelli matematici di identificazione e previsione, di ottimizzazione, di simulazione. Il che, peraltro, è di particolare interesse proprio in relazione alle caratteristiche sistematiche che hanno i progetti speciali, intesi come complessi organici di interventi.

All'illustrazione delle metodologie generali e degli strumenti operativi messi a punto per l'attuazione del progetto speciale n. 29 saranno dedicati diversi Quaderni.

Un primo Quaderno è questo che presentiamo. Esso tratta, in generale, delle metodologie impiegate per la definizione delle soluzioni progettuali: tecniche di analisi dei sistemi; vari modelli di ottimizzazione e simulazione; procedure per le analisi costi-benefici, per la valutazione della domanda d'acqua, per l'analisi integrata tra risorse superficiali e sotterranee.

Un secondo Quaderno conterrà le documentazioni, le ricerche e gli studi di base alla preparazione del progetto per quanto attiene alla disponibilità delle risorse idriche sotterranee, con particolare riferimento all'analisi delle strutture idrologiche e idrogeologiche.

Un terzo Quaderno riferirà, invece, sulle ricerche connesse alla valutazione delle risorse idriche superficiali, illustrando le diverse metodologie di analisi seguite – in parte anticipate in questo primo Quaderno – proponendo utili confronti anche sulla modellistica impiegata: l'accento sarà posto prevalentemente, però, sui dati di disponibilità ottenuti piuttosto che sui metodi seguiti.

Un quarto Quaderno illustrerà i contenuti del progetto: obiettivi; stato di elaborazione e di attuazione; problemi decisionali; opere realizzate o in corso di realizzazione o allo studio; caratteristiche di base della domanda, valutazioni economiche complessive.

Un quinto Quaderno sarà, invece, dedicato al progetto speciale per gli schemi idrici della Calabria e accompagnato da un'ampia premessa contenente una serie di contributi culturali e di studio redatti da esperti esteri.

Quali le ragioni di tale articolazione? In breve, si è ritenuto opportuno stralciare

dall'illustrazione complessiva dei progetti idrici quelle parti (ricerche preliminari e problemi metodologici) che per il loro contenuto specialistico sono destinate ad interessare maggiormente alcune categorie di lettori. Nello stesso tempo si è inteso assegnare a ciascun Quaderno uno scopo diverso.

Così, ad esempio, i Quaderni che documenteranno i contenuti, gli obiettivi e le realizzazioni dei progetti avranno uno scopo prevalentemente informativo. Si tratta di far conoscere in tutta la sua complessità l'azione della Cassa in un settore che è di importanza vitale per lo sviluppo delle regioni meridionali.

Quanto all'opportunità di raccogliere in Quaderni a parte documentazioni e ricerche sulle risorse idriche, essa deriva dalla stessa natura del materiale disponibile. È un insieme di dati e di elaborazioni di notevole interesse scientifico, destinato agli studiosi indipendentemente dalla sua utilizzazione ai fini del progetto.

Ancora più evidente è il carattere particolare del Quaderno sulle metodologie. Abbiamo già accennato all'importanza che per la definizione del progetto ha avuto il ricorso alle tecniche di analisi dei sistemi. Il Quaderno si propone di illustrare queste tecniche da un punto di vista generale. Tratterà perciò dei modelli utilizzati per quanto concerne le loro strutture e i limiti e potenzialità di impiego. Non tratterà, invece, di specifiche problematiche affrontate per il loro uso operativo nell'ambito del progetto, la cui trattazione sarà in parte sviluppata nel corso dei successivi Quaderni. Gli esempi forniti hanno quindi carattere esclusivamente esplicativo.

Ma a proposito di questo Quaderno ci sia consentita ancora una precisazione, che si richiama peraltro alle finalità che gli stessi Quaderni si propongono: di essere, cioè, non soltanto uno strumento di informazione e documentazione, ma altresì un'occasione di presenza della Cassa per il Mezzogiorno nel dibattito culturale; una presenza, s'intende, non generica e casuale, ma strettamente collegata ai suoi compiti d'Istituto.

Ora non c'è dubbio che in questi anni la Cassa, operando nel campo della ricerca e dell'utilizzazione ottimale dell'acqua, abbia accumulato un patrimonio tecnico, scientifico e metodologico che rappresenta un'utile base di riferimento anche per chi all'esterno opera negli stessi campi, sia pure con intenti diversi.

Soprattutto a costoro il nostro Quaderno è destinato, per sollecitarne l'attenzione, consapevoli come siamo che ogni esperienza, per svilupparsi proficuamente, ha bisogno di verifiche, confronti, critiche, suggerimenti.

Il progetto speciale
per gli schemi idrici intersettoriali
dell'Abruzzo, Campania,
Molise, Lazio e Marche meridionali

1 il progetto speciale per gli schemi idrici intersettoriali dell'Abruzzo, Campania, Molise, Lazio e Marche meridionali

- Obiettivi e finalità
- Problemi decisionali
- Impostazione operativa

■ Metodologie operative

■ Programmi decisionali

■ Obiettivi e finalità

Lazio e Marche meridionali
Campania, Molise,
intersefforali dell'Apuzzo,
per gli schemi idrici
il prodotto speciale



Il progetto speciale per gli schemi idrici intersettoriali dell'Abruzzo, Campania, Molise, Lazio e Marche meridionali

1.1. Obiettivi e finalità

Il progetto speciale n. 29 è il maggiore dei progetti speciali per gli schemi idrici intersettoriali. Esso investe cinque regioni (Abruzzo, Campania, Molise, Lazio e Marche meridionali) per una superficie di circa 37.000 chilometri quadrati, con una popolazione di oltre 6 milioni di abitanti. La dimensione globale del problema che il progetto è chiamato ad affrontare è sinteticamente indicata dal seguente dato: attualmente l'approvvigionamento idrico dell'area è di circa 2 miliardi di metri cubi all'anno; al 2016 il fabbisogno da garantire sarà di circa 7 miliardi all'anno. In figura 1.1 è riportata una mappa del territorio interessato, con le sue aree irrigue, le principali utenze industriali, gli invasi artificiali considerati, le maggiori risorse sorgentizie e sotterranee e le principali opere di adduzione. Nella figura 1.2, invece, sono riportati i principali schemi acquedottistici per il settore potabile. L'obiettivo generale del progetto è stato formulato dal CIPE con delibera del 2 maggio 1975. Il documento del CIPE sottolinea anzitutto «l'inderogabile necessità di affrontare il problema dell'utilizzazione dell'acqua in un quadro unitario di studi e di indagini che, avendo ben presenti le esigenze di ciascuna regione, possa permettere una coordinata programmazione, che abbia una solida base di credibilità e di concretezza, degli interventi che saranno individuati».

«Sulla base di queste esigenze tecniche di connessioni interregionali» – prosegue il documento del CIPE – il progetto «dovrà prospettare documentate alternative per la ottimizzazione degli impieghi delle risorse idriche», tra le quali le sedi politiche centrali e regionali dovranno scegliere per la parte di rispettiva competenza».

In tale contesto, particolare attenzione, a giudizio del CIPE, dovrà essere posta al quadro delle utilizzazioni, per il quale sarà necessario anzitutto considerare gli aspetti connessi:

- I) alle esigenze dei fabbisogni idrico-potabili, facendo salvi gli impegni derivanti dal Piano regolatore generale degli acquedotti;
- II) alle esigenze di coordinamento dei possibili utilizzi con le utenze idroelettriche in atto, anche attraverso lo studio di alternative;
- III) alle esigenze derivanti dai tempi e dai modi di realizzazione del progetto speciale per l'irrigazione del Mezzogiorno.

Nell'ambito del progetto, afferma ancora il CIPE, «sarà tenuta presente l'esigenza di perseguire l'obiettivo del riequilibrio territoriale articolato per regioni. A tale fine si adotterà, per quanto possibile, un criterio coerente con detto obiettivo nella destinazione delle risorse, avuto soprattutto riguardo ai loro effetti».

Infine si fa carico al progetto di elaborare, «con la collaborazione delle regioni, adeguati modelli gestionali che siano in grado di consentire una gestione unitaria e intersettoriale del patrimonio idrico delle regioni interessate».

1.2. Problemi decisionali

Oltre alla complessità delle alternative progettuali, un'altra caratteristica del progetto speciale n. 29 è la molteplicità dei soggetti con competenze programmatiche e decisionali che esso coinvolge. Perciò, il primo obiettivo è stato quello di promuovere un accordo tra le regioni interessate in modo da comporre gli interessi in conflitto per la destinazione alternativa delle risorse idriche.

Nè la conflittualità era soltanto interregionale; investiva anche una pluralità di organismi istituzionali ai quali fanno capo gli interessi di utenze diverse. Si pensi alle alternative di sviluppo irriguo-industriale e alle interrelazioni con gli usi energetici.

Per queste ragioni l'utilizzazione dell'acqua nell'area del progetto speciale costituiva un problema da affrontare in modo unitario, in quanto la realtà sulla quale si doveva operare si presentava essa stessa come un'unico sistema a forti interconnessioni interne, sia dal punto di vista programmatico che da quello fisico.

Invasi

Figura 1.1

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Invaso di Castignano sul Fiume Tesino | 23 | Invaso Carunchio sul Fiume Treste |
| 2 | Invaso sul Fiume Chiaro | 24 | Invaso di Celenza sul Fiume Trigno |
| 3 | Invaso sul Torrente Goscio | 25 | Invaso di Ponte Liscione sul Fiume Biferno |
| 4 | Invaso di Bisenti sul Fiume Fino | 26 | Invaso sul Torrente Cigno |
| 5 | Invaso di Penne 2 sul Fiume Tavo | 27 | Invaso di San Massimo sul Torrente Callora |
| 6 | Invaso di Penne 1 sul Fiume Tavo | 28 | Invaso di Arcichiaro sul Fiume Biferno |
| 7 | Invaso di Castignano sul Torrente Nora | 20 | Invaso di Roiate |
| 8 | Invaso di Bolognano sul Fiume Orta | 30 | Invaso di Ferentino |
| 9 | Invaso sul Fiume Alento a Lignini | 31 | Invaso di Torrice |
| 10 | Invaso sul Torrente Vesola | 32 | Invaso di Ripi |
| 11 | Invaso di Curci sul Torrente Dentolo | 33 | Invaso sul Rio Mollo |
| 12 | Invaso sul Torrente Venna | 34 | Invaso di Vandra |
| 13 | Invaso sul Torrente Moro | 35 | Invaso di Toteri |
| 14 | Invaso sul Torrente Roio a Pagliare | 36 | Invaso Civitella Licinia |
| 15 | Invaso di Conca Mandrelle (Amplero) | 37 | Invaso di Campolattaro |
| 16 | Invaso sul Torrente Feltrino | 38 | Invaso di Ponte (Lente) |
| 17 | Invaso di Casoli sul Fiume Aventino | 39 | Invaso di Ienga |
| 18 | Invaso di Bomba sul Fiume Sangro | 40 | Invaso di Ponte Elia (Apice) |
| 19 | Invaso di Riguardata sul Fiume Osento | 41 | Invaso di Grottaminarda |
| 20 | Invaso di Gissi sul Fiume Sinello | 42 | Invaso di Fiumarella |
| 21 | Invaso di Chiauci sul Fiume Trigno | 43 | Invaso di Fredane |
| 22 | Invaso di Bagnoli sul Fiume Trigno | 44 | Invaso di Acera |
| | | 45 | Invaso di Temete |
| | | 46 | Invaso di Magliano Vetere |
| | | 47 | Invaso della Rocca sul Fiume Alento |
| | | 48 | Invaso del Carmine |

NOTA BENE: Per una lettura di maggiore dettaglio vedi tavole a colori allegate al Quaderno.

Figura 1.1 - Territorio interessato dal progetto speciale per gli schemi idrici dell'Abruzzo, Campania, Molise, Lazio e Marche meridionali (n. 29): aree irrigue ed utenze industriali, risorse sorgentizie e sotterranee, principali opere di accumulo e di adduzione.



**Schemi
acquedottistici**
Figura 2.2



- | | | | |
|----|-------------------------------------|----|----------------------|
| 1 | Monti Sibillini e Pescara d'Arquata | 33 | Basso Molise |
| 2 | Ruzzo | 34 | Molisano Destro |
| 3 | Tavo | 35 | Campania occidentale |
| 4 | Nora | 36 | Matese |
| 5 | Giardino | 37 | Torano Biferno |
| 6 | Rocca di Ferro | 38 | Serino |
| 7 | Foro | 39 | Sarno |
| 8 | Avello | 40 | Alto Calore |
| 9 | Verde | 41 | Ausino |
| 10 | Capovallone | 42 | Basso Sele |
| 11 | Sinello | 43 | Alto Sele |
| 12 | Chiarino-Acqua Oria | 44 | Elce |
| 13 | Ferriera | 45 | Bussento |
| 14 | Celano | 46 | Vallo di Diano |
| 15 | Verrecchie | | |
| 16 | Rio Sonno | | |
| 17 | Pantaneccia | | |
| 18 | Collelongo | | |
| 19 | Gizio | | |
| 20 | Roccaraso-Castel di Sangro | | |
| 21 | Pomezia | | |
| 22 | Carano | | |
| 23 | Sardellane | | |
| 24 | Terracina | | |
| 25 | Capofiume-Tufano-Posta | | |
| 26 | Val San Pietro | | |
| 27 | Forme d'Aquino | | |
| 28 | Aurunci | | |
| 29 | Vetere | | |
| 30 | Capodacqua Mazzoccolo | | |
| 31 | Campate e Forme | | |
| 32 | Molisano Sinistro | | |

NOTA BENE: Per una lettura di maggiore dettaglio vedi tavole a colori allegate al Quaderno.

Figura 1.2 - Principali schemi acquedottistici per il settore potabile.



Interconnessioni fisiche esistono, infatti, tra i bacini idrografici delle varie regioni; mentre un fattore unificante è lo sfruttamento in comune dei massicci carbonatici.

Si aggiunga che il progetto ha dovuto armonizzare esigenze e direttive, per alcuni aspetti contrastanti, formulate dagli organi istituzionalmente titolari delle politiche complessive d'intervento. Tra queste erano soprattutto importanti:

- I) le direttive del CIPE che attribuivano espressamente al progetto un rilevante contenuto pianificatorio nell'ottica del riassetto del territorio nel lungo termine, assegnandogli il tema della gestione della politica dell'acqua;
- II) le direttive ministeriali che vincolavano il progetto all'elaborazione di programmi a breve termine, con cadenza temporale annuale, da sottoporre a verifiche decisionali del Ministero per il Mezzogiorno e delle Regioni.

È stato pertanto necessario, da una parte, effettuare analisi ad un livello di dettaglio compatibile con le esigenze della programmazione degli interventi e, dall'altra, compiere scelte operative con un ritmo temporale che mal si adattava a tali esigenze.

Comunque queste esigenze hanno improntato fin dall'inizio il contenuto metodologico e operativo del progetto, condizionandone l'evoluzione.

1.3. Impostazione operativa

Nell'impostazione del progetto, pertanto, si sono tenuti presenti tre principi fondamentali. In primo luogo, i complessi da realizzare dovevano rispondere agli obiettivi locali e regionali di uso delle acque, nel rispetto del vincolo rappresentato dagli obiettivi socio-economici di carattere nazionale (quali l'occupazione e lo sviluppo della produzione).

In secondo luogo, l'accordo con le regioni e tra le regioni per l'uso delle risorse idriche, doveva venire perseguito attraverso l'indicazione di varie soluzioni alternative e dei relativi effetti.

Infine, si doveva distinguere tra opere di urgenza immediata, da realizzare in tempi brevi per il soddisfacimento di bisogni critici, e piano globale delle acque di lungo periodo, cercando tuttavia di coordinare interventi a breve termine e interventi futuri.

Per rispettare tali principi secondo criteri di razionalità sono state applicate tecniche di analisi dei sistemi.

Questa metodologia considera il complesso delle opere (anzi l'intero territorio investito dal progetto) come un sistema i cui elementi sono le strutture idrauliche e gli utilizzatori finali, legati tra loro da relazioni a carattere fisico (i flussi idrici) ed economico.

Il problema che ci si è proposti in questa impostazione è stato, quindi, di definire fino a che punto debbano svilupparsi, nell'orizzonte temporale del progetto, gli elementi considerati (strutture idrauliche e utilizzatori finali), perché col minimo costo siano massimizzati alcuni obiettivi economici aggregati connessi all'uso dell'acqua (maggiore occupazione e crescita produttiva), rispettando il vincolo dei fabbisogni idropotabili e in armonia col perseguimento di ulteriori obiettivi subordinati.

Per la soluzione del problema sono stati utilizzati vari modelli di ottimizzazione e usate procedure di simulazione a vario livello di complessità, a seconda del dettaglio raggiunto nelle analisi.

Illustreremo nei capitoli seguenti le procedure adottate e alcuni dei modelli utilizzati per le diverse analisi (costi-benefici; risorse idriche, superficiali e sotterranee; valutazione della domanda d'acqua).

Aggiungiamo soltanto che in linea generale il processo di analisi è stato sviluppato in tre distinte fasi logiche: analisi preliminari; impiego di modelli di ottimizzazione per la definizione delle configurazioni ottimali del sistema idrico; controllo di tali configurazioni, in relazione alla variabilità idrologica, con modelli di simulazione operanti su serie adeguate di input idrologici.

2 la metodologia globale di analisi

- approccio sistemico
- analisi preliminari
- ricerca delle soluzioni
progettuali ottimali
- studi settoriali
- supporto elaborativo

2.2. Metodologia globale

2.2.1. La metodologia globale è un sistema che si è formato al

... e varie regioni, fu fatto un settore importante e lo sfruttamento e controllo dei massicci carbonatici.

Si annuncia che il progetto ha dovuto considerare esigenze e direttive, per alcuni aspetti contestate, formulate dagli organi amministrativi titolari delle politiche complessive provinciali. Vi sono stati e soprattutto momenti:

1) la spinta del CNR che anticipavano espressamente al progetto un rilevante contributo metodologico e teorico nei confronti del territorio nel lungo termine, assegnando a una certa fase della politica dell'acqua.

2) la mancanza di programmi a medio termine, con un ciclo temporale annuale, da sottoporre a verifiche decisionali nel momento dei bilanci.

3) l'assenza di una politica da una parte, e l'assenza di analisi ad un livello di dettaglio necessario per la attuazione della programmazione degli interventi e, dall'altra, compiere scelte operative nel tempo che mal si adattava a tali esigenze.

4) l'assenza di una politica nazionale, ma l'improntato fin dall'inizio il contenuto metodologico e operativo del progetto, con l'obiettivo di:

1.1.1. Obiettivi generali

1.1.1.1. Obiettivi generali. In primo luogo, i complessi da studiare sono quelli locali e regionali di uso delle acque, nel rispetto del vincolo rappresentativo degli obiettivi socio-economici di carattere nazionale (quali l'occupazione e lo sviluppo della produzione).

In secondo luogo, l'accordo con le regioni è stato il punto di partenza delle risorse idriche, doveva venire perseguito attraverso l'indicazione di varie alternative e dei relativi effetti.

Infine, si doveva distinguere tra opere di urgenza immediata, da realizzare in tempi brevi per il soddisfacimento di bisogni critici, e piano globale delle acque di lungo periodo, tenendo tuttavia di coordinare interventi a breve termine e interventi futuri.

Per rispettare tali principi secondo criteri di razionalità sono state applicate tecniche di analisi e sintesi.

Questa metodologia considera il complesso sistema idrico come un territorio investito di risorse idriche, con un vincolo di equilibrio tra le risorse idriche e gli interventi di sviluppo economico.

Il problema che si è posto in questa impostazione è quello di definire fino a che punto, nel rispetto del vincolo di equilibrio, si possa realizzare la massima utilizzazione sicura obiettivi economici aggregati (come la crescita occupazionale e crescita produttiva), rispettando il vincolo dei fabbisogni idrici e in armonia con il perseguimento di ulteriori obiettivi subordinati.

Per la soluzione del problema sono stati utilizzati vari modelli di ottimizzazione e usate tecniche di simulazione a vario livello di complessità, a seconda del dettaglio raggiunto.

Nei capitoli seguenti le procedure adottate e i risultati ottenuti sono presentati per le risorse idriche (costi benefici; risorse idriche, equità e sovrappiù; valutazione delle alternative).

È importante notare che in linea generale il processo di analisi è stato sviluppato in tre fasi: analisi preliminari; impiego di modelli di ottimizzazione per la definizione delle configurazioni ottimali del sistema idrico; controllo di tali configurazioni, in relazione alla variabile idrologica, con modelli di simulazione operanti su serie adatte di input idrologici.

La metodologia globale di analisi

2.1. Approccio sistemico

Per esporre in sintesi la problematica afferente al progetto speciale n. 29, si potrebbe dire che questa riguarda la ricerca e l'esecuzione di un sistema idrico per il territorio di competenza, che – soddisfacendo ai vincoli fisici e programmatici, relativi all'offerta e alla domanda di acqua, in rapporto alla disponibilità di mezzi finanziari – realizzi in massimo grado, compatibilmente con tali vincoli, gli obiettivi dello stesso progetto.

La ricerca di tale soluzione «ottimale» richiede l'esame di tutto il complesso delle soluzioni progettuali possibili e degli effetti di tali soluzioni rispetto agli obiettivi prescelti.

Ora, per definire il progetto da realizzare, occorre che tali obiettivi siano tutti specificati con la gerarchia nella quale sono perseguiti o, se di eguale livello, con il grado in cui sono reciprocamente desiderati. Purtroppo, non sempre tutti gli obiettivi sono specificati sin dall'inizio degli studi e, in ogni caso, le autorità decisionali quasi mai hanno la possibilità di conoscere «a priori» i pesi riguardanti gli obiettivi di eguale livello.

Inoltre, come si è già posto in evidenza, occorre nel nostro caso considerare, da un lato, l'urgenza della risoluzione di alcuni problemi immediati; dall'altro, la mancanza di una esauriente raccolta di informazioni sulle risorse effettivamente disponibili e sugli effetti – in termini di obiettivi generali – dei possibili usi dell'acqua.

Queste considerazioni hanno suggerito di pervenire alla definizione del progetto globale di utilizzazione delle risorse idriche mediante un approccio metodologico che, attraverso un processo di affinamenti successivi, potesse fornire, in tempi brevi, risposte corrette alle necessità più urgenti e, in riferimento all'intero complesso delle utilizzazioni possibili, risposte sempre più dettagliate in ragione della qualità e quantità delle informazioni di base disponibili e del grado di precisazione raggiunto negli obiettivi.

Tale processo si concretizza, per l'analisi di un particolare sistema idrico, nella messa a punto e nella utilizzazione di una serie integrata di modelli per le analisi preliminari, d'interpretazione e valutazione delle caratteristiche fondamentali della realtà in esame (stima delle disponibilità idriche, dei costi delle strutture, dei benefici conseguibili in termini di obiettivi generali, dei fabbisogni idrici derivanti da specifici obiettivi programmatici), per la ricerca della soluzione progettuale ottimale (modelli di programmazione matematica) e, infine, per la verifica del funzionamento del sistema idrico e degli effetti da esso indotti – in un dato orizzonte temporale – sulle grandezze socio-economiche di interesse (modelli di simulazione).

Come si può vedere nello schema riportato alla fig. 2.1 questo processo si svolge attraverso un ciclo dinamico di affinamenti successivi, sia della realtà allo studio che degli obiettivi perseguiti, cui si perviene in base all'esame delle soluzioni progettuali precedentemente ottenute, in relazione a un minor dettaglio delle informazioni di base e/o ad una minore specificazione degli obiettivi.

Questo modo di procedere permette di orientare diversamente, in rapporto ai vari stadi del processo, gli studi di dettaglio sugli elementi del sistema, concentrando l'accuratezza degli studi settoriali su particolari problemi evidenziati dalle analisi già effettuate, e determinando le priorità nel tempo della realizzazione degli studi stessi. Parallelamente, dall'esame «a posteriori» delle soluzioni progettuali prospettate, le autorità pianificatrici possono meglio comprendere i propri «gusti» e, quindi, fissare, implicitamente o esplicitamente, i pesi con cui intendono perseguire gli obiettivi individuati: ciò vale, ad esempio, per il problema della fissazione dei valori «target» di fabbisogno minimo da soddisfare, al termine di un orizzonte temporale di riferimento e, successivamente, dell'evoluzione di questi fabbisogni minimi all'interno di tale periodo.

2.2. Analisi preliminari

2.2.1. Le analisi preliminari consistono essenzialmente in bilanci tra risorse disponibili e usi prefissati, utilizzando procedure di simulazione piuttosto semplici, con idrologia co-

Figura 2.1 - Schematizzazione del processo decisionale per la ricerca della soluzione progettuale relativa a un sistema idrico.

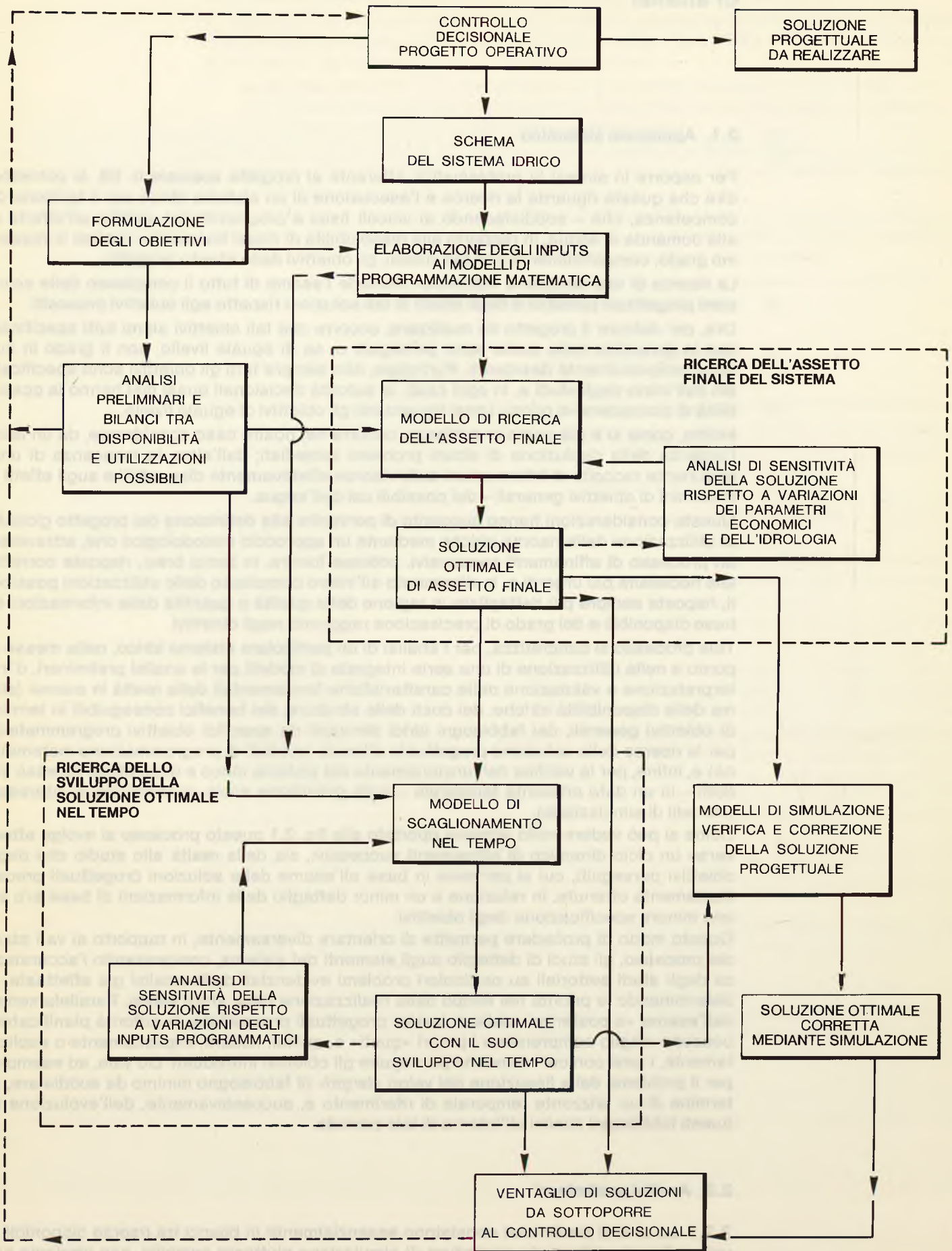


Figura 2.2 - Una prima suddivisione del territorio in sistemi idrici.

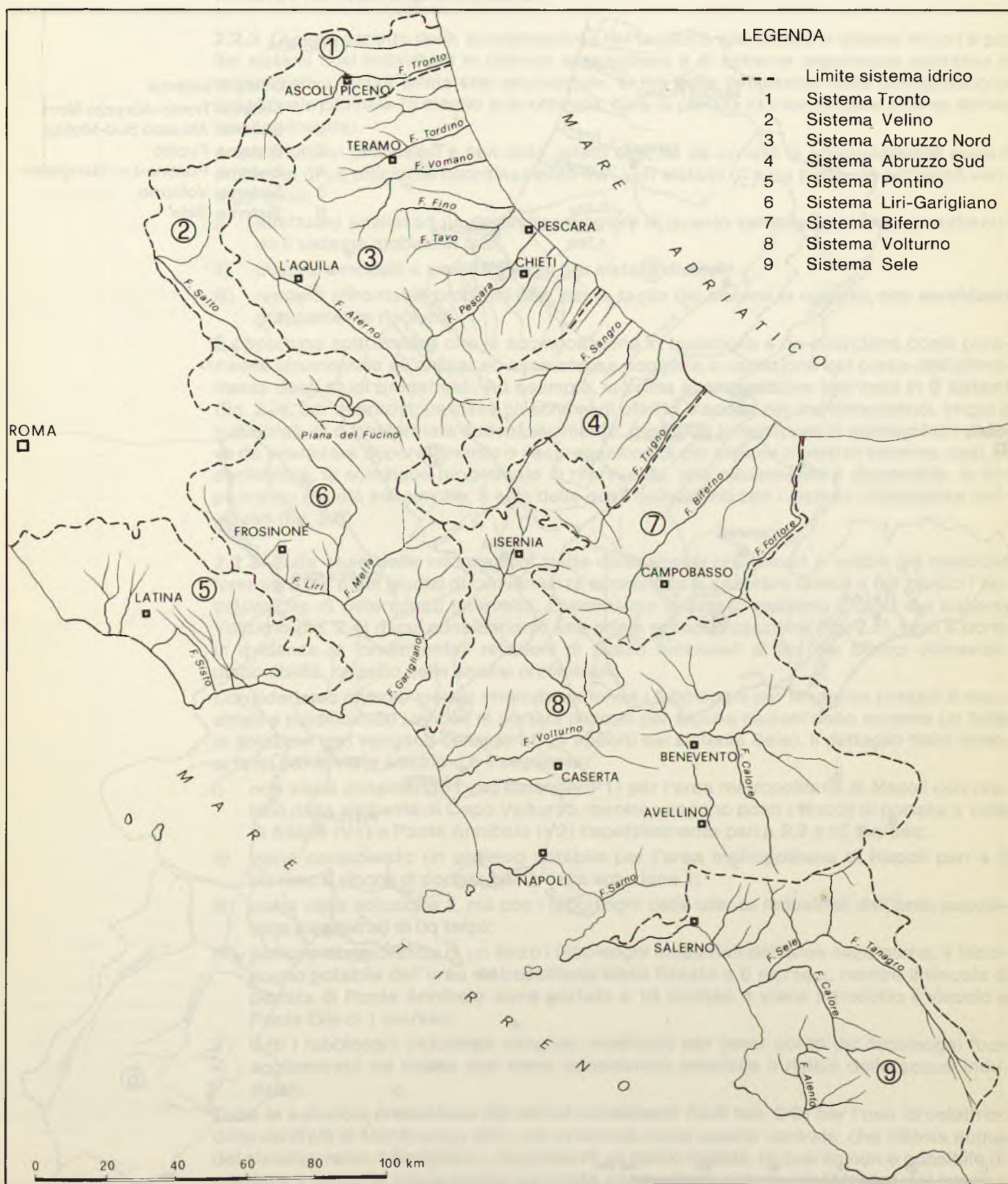
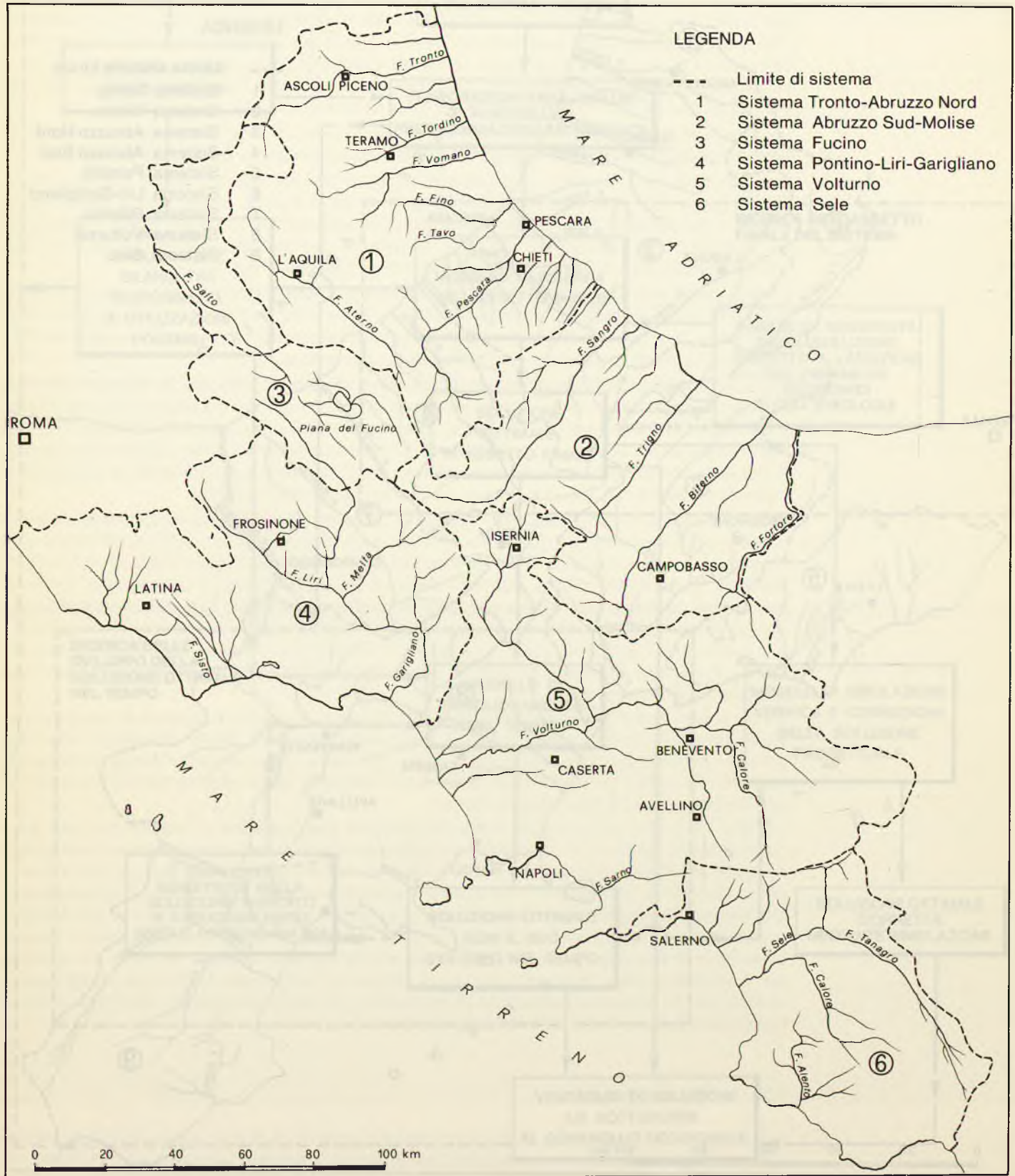


Figura 2.3 - Una seconda suddivisione del territorio in sistemi idrici utilizzati per le analisi mediante modelli di ottimizzazione.



stituita da un anno medio e da pochi anni rappresentativi. Loro scopo è quello di fornire una prima verifica delle possibilità offerte dagli schemi idrici individuati a fronte di una gamma di livelli di richieste possibili da parte dei vari usi. In questo modo, risulta possibile procedere a prime revisioni degli schemi idrici per renderli compatibili con le necessità potenziali.

Dall'uso di analisi preliminari si sono potuti trarre gli elementi di valutazione per una scomposizione dell'intero territorio di competenza del progetto in sistemi idrici: si è giunti a ciò isolando le relazioni di minore complessità o rilevanza e studiando gli effetti delle variazioni nei livelli degli interscambi.

2.2.2. Questo aspetto della scomposizione del territorio allo studio in sistemi minori e poi dei sistemi così individuati in ulteriori sottosistemi è di estrema importanza operativa e organizzativa, ancor prima che strumentale, ai fini della definizione della configurazione progettuale ottimale (o meglio sub-ottimale, data la perdita di informazione che ne deriva inevitabilmente).

A quest'ultimo proposito, è ben noto, infatti che, se da un lato la scomposizione pone il problema di un efficiente coordinamento tra i vari sistemi, d'altra parte ciò permette vantaggi quali:

- I) effettuare analisi ad un dettaglio maggiore di quanto sarebbe possibile considerando il sistema globale *in toto*;
- II) utilizzare modelli e analisi diverse per sistemi diversi;
- III) rendere affrontabili problemi che, per la taglia dei sistemi in oggetto, non sarebbero praticamente risolvibili.

È opportuno sottolineare che la scomposizione in questione è da intendersi come puramente strumentale all'analisi ed essa stessa soggetta a variazione nel corso dell'affinamento degli studi progettuali. Ad esempio, la prima scomposizione dell'area in 9 sistemi (fig. 2.2), per quanto riguardava gli schemi di offerta d'acqua per usi idroelettrici, irrigui e industriali, si è trasformata successivamente, mediante lo scorporo di sottosistemi chiave da analizzare separatamente o l'aggregazione di più sistemi o parti di sistema: così, in particolare, la soluzione progettuale di riferimento, che attualmente è disponibile, si impernia su 6 unità sistemiche, 3 sole delle quali coincidenti con i sistemi inizialmente individuati (fig. 2.3).

2.2.3. Sulla base delle informazioni tratte dalle analisi preliminari è inoltre già possibile formulare dei primi giudizi di convenienza economica e ancorare quindi a tali giudizi l'anticipazione di determinati interventi. Esaminiamo a questo esempio il caso del sistema Volturno (fig. 2.4) di cui consideriamo una prima schematizzazione (fig. 2.5), tesa a porre in evidenza le fondamentali relazioni di flusso funzionali ai fini dei bilanci domanda-disponibilità, oggetto delle analisi preliminari.

Consideriamo diverse ipotesi ottenute variando i fabbisogni per le utenze potabili e industriali e modificando i vincoli di portata imposti per alcune sezioni dello schema (in tutte le soluzioni non vengono considerati gli apporti dal sistema Sele). Il dettaglio delle ipotesi fatte per le varie soluzioni è il seguente:

- I) non viene considerato l'uso potabile (P1) per l'area metropolitana di Napoli con prelievi dalla sorgente di Capo Volturno, mentre vengono posti i vincoli di portata a valle di Aliano (V1) e Ponte Annibaie (V2) rispettivamente pari a 2,2 e 10 mc/sec;
- II) viene considerato un prelievo potabile per l'area metropolitana di Napoli pari a 5 mc/sec e vincoli di portata come nella soluzione 1;
- III) come nella soluzione 2, ma con i fabbisogni delle utenze industriali dell'area napoletana maggiorati di un terzo;
- IV) sempre maggiorando di un terzo i fabbisogni industriali dell'area napoletana, il fabbisogno potabile dell'area metropolitana viene fissato a 6 mc/sec., mentre il vincolo di portata di Ponte Annibaie viene portato a 13 mc/sec e viene introdotto il vincolo a Ponte Elia di 1 mc/sec;
- V) tutti i fabbisogni industriali vengono modificati per tener conto dei fabbisogni fuori agglomerato ed inoltre non viene considerato possibile il riciclo delle acque industriali.

Tutte le soluzioni presentano dei deficit consistenti (vedi tab. 2.2) per l'uso idroelettrico della centrale di Montelungo (E1): ciò evidenzia come questa centrale, che distrae acqua del sistema verso il Garigliano, rappresenti un punto nodale, in quanto non è possibile rispettare a pieno la concessione esistente senza dover ridurre i fabbisogni dei concor-

Figura 2.4 - Il sistema idrico Volturno.

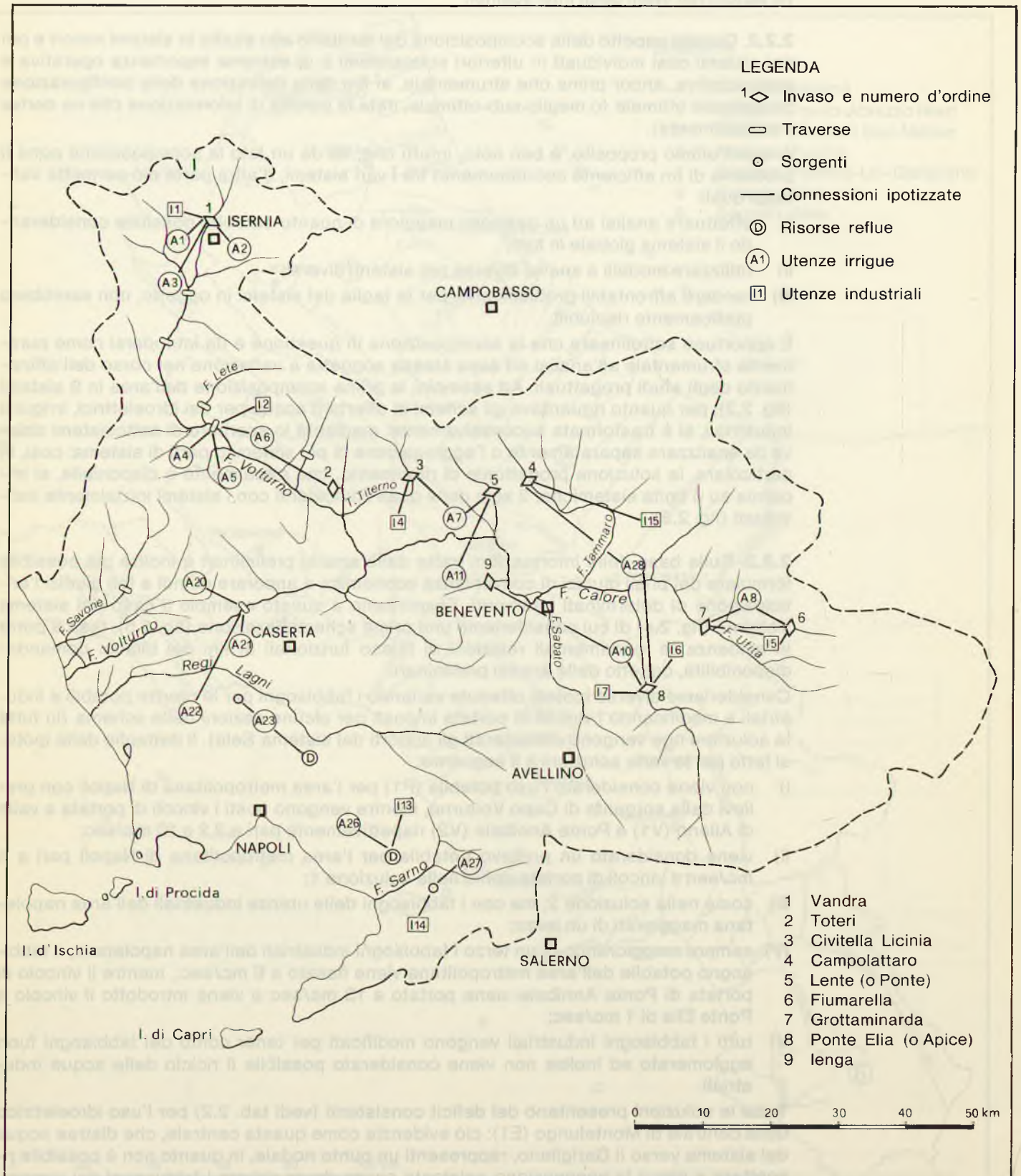


Figura 2.5 - Schema logico del sistema Volturno utilizzato per le analisi preliminari.

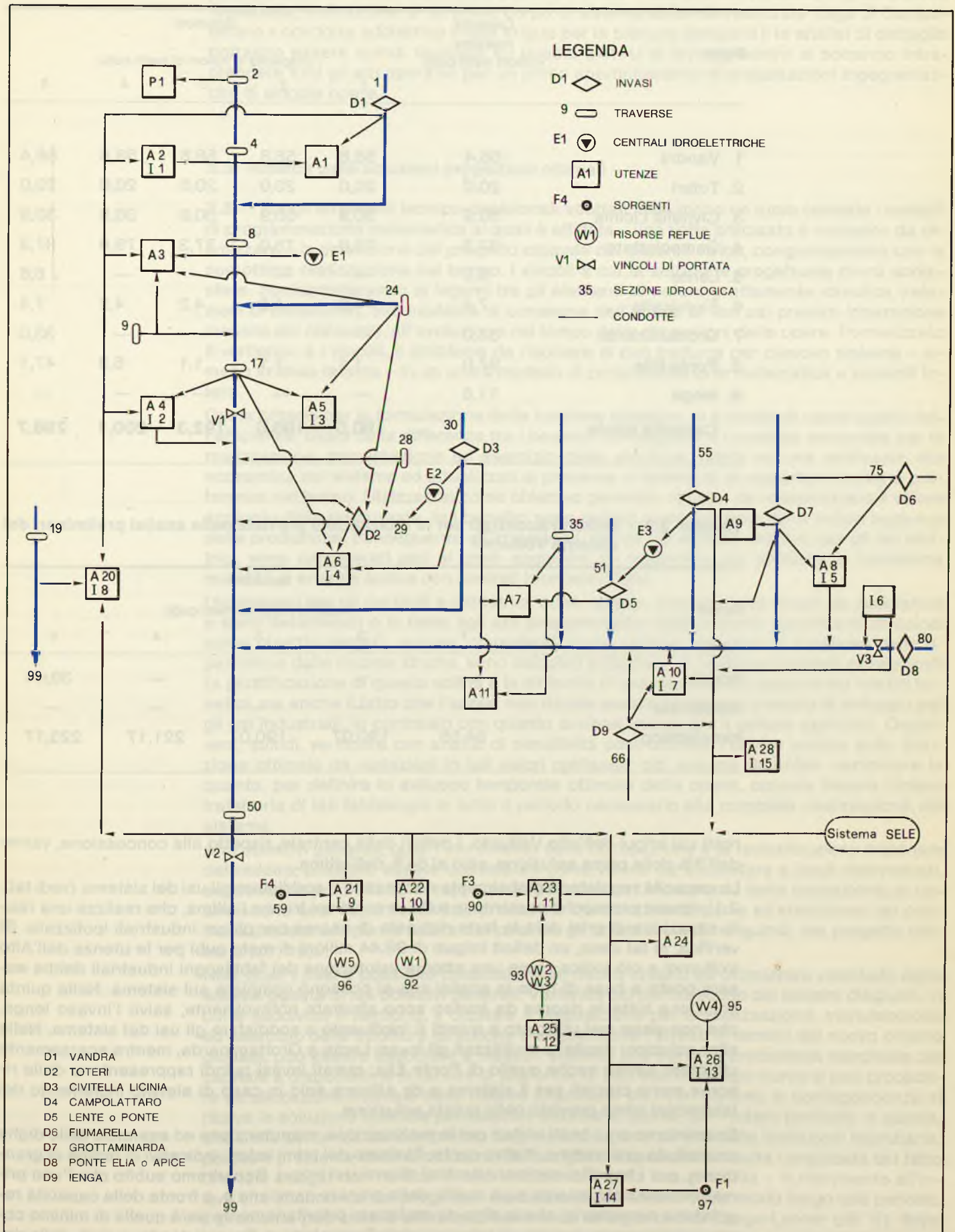


Tabella 2.1 - Capacità delle dighe risultante dalle soluzioni delle analisi preliminari per il sistema Volturno

Dighe	Capacità massima (milioni metri cubi)	Soluzioni				
		(capacità in milioni di metri cubi)				
		1	2	3	4	5
1. Vandra	66,4	58,8	58,8	58,8	58,8	66,4
2. Toteri	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
3. Civitella Licinia	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9
4. Campolattaro	87,3	75,0	75,0	77,3	79,9	87,3
5. Lente	6,6	—	—	—	—	6,6
6. Fiumarella	7,4	4,2	4,2	4,2	4,2	7,4
7. Grottaminarda	33,0	—	—	—	—	33,0
8. Ponte Elia	97,0	1,1	1,1	1,1	6,3	47,1
9. Ienga	11,6	—	—	—	—	—
Capacità totale		190,0	190,0	192,3	200,1	298,7

Tabella 2.2 - Deficit riscontrati per le utilizzazioni previste nelle analisi preliminari del sistema Volturno

Deficit	Soluzioni				
	(valori in milioni di metri cubi)				
	1	2	3	4	5
Irriguo	—	—	—	—	39,44
Industriale	—	—	—	—	—
Idroelettrico	34,55	190,07	190,07	221,17	223,17

renti usi irrigui dell'aito Volturno. I deficit della centrale, rispetto alla concessione, vanno dall'8% della prima soluzione, sino al 54% dell'ultima.

La capacità regolatoria globalmente necessaria a soddisfare gli usi del sistema (vedi tab. 2.1) rimane pressoché costante in tutte le soluzioni tranne l'ultima, che realizza una reale situazione di crisi data la forte richiesta di risorse per gli usi industriali ipotizzata. Si verifica, in tal caso, un deficit irriguo di 39.44 milioni di metri cubi per le utenze dell'Alto Volturno; e ciò indica come una attenta valutazione dei fabbisogni industriali debba essere posta a base di tutte le analisi che si possono compiere sul sistema. Nella quinta soluzione tutte le risorse da invaso sono sfruttate notevolmente, salvo l'invaso Ienga, che non viene mai utilizzato e quindi è ininfluenza a soddisfare gli usi del sistema. Nelle altre soluzioni risultano inutilizzati gli invasi Lente e Grottaminarda, mentre scarsamente utilizzato risulta anche quello di Ponte Elia: questi invasi quindi rappresentano delle risorse meno cruciali per il sistema e da attivare solo in caso di elevato incremento dei fabbisogni come previsto nella quinta soluzione.

Esaminiamo ora i costi unitari per la realizzazione, manutenzione ed esercizio delle dighe cruciali, da una parte e, d'altro canto, fissiamo dei primi valori, indicativi in ordine di grandezza, per i benefici corrispondenti ai diversi usi irrigui. Scopriremo subito che l'uso primariamente conveniente sarà quello della pianura campana e, a fronte della capacità regolatoria necessaria, che la diga da realizzare prioritariamente sarà quella di minimo costo unitario posta a monte di tale uso, cioè Campolattaro. Prescindendo, quindi, dalla de-

finizione puntuale della dimensione dell'uso irriguo, o della struttura idraulica, potremo subito ottenere – da un confronto costo-beneficio – una più convincente, ma altrettanto immediata, indicazione di un primo corpo di sistema idrico da realizzare (diga di Campolattaro + condotta adduttrice + rete irrigua per la pianura campana): le analisi di dettaglio potranno essere quindi facilitate su questa ipotesi di lavoro, mentre si potranno intraprendere tutti gli atti operativi per un primo approntamento di progettazioni ingegneristiche di singole opere.

2.3. Ricerca delle soluzioni progettuali ottimali

2.3.1. Tra gli strumenti tecnico-decisionali adottati, assumono un ruolo centrale i modelli di programmazione matematica ai quali è affidata – una volta precisato il «criterio» da ottimizzare – la definizione del progetto ottimale del sistema idrico, congiuntamente con la sua ottima realizzazione nel tempo. I vincoli a cui la soluzione progettuale dovrà soddisfare, corrisponderanno ai legami tra gli elementi di natura prettamente idraulica (relazioni di continuità), alle modalità di consegna dell'acqua ai vari usi previsti (ripartizione mensile dei consumi), all'evoluzione nel tempo delle dimensioni delle opere. Formalizzato il «criterio» e i vincoli, il problema da risolvere si può tradurre per ciascun sistema – almeno in linea teorica – in un unico modello di programmazione matematica a variabili intere.

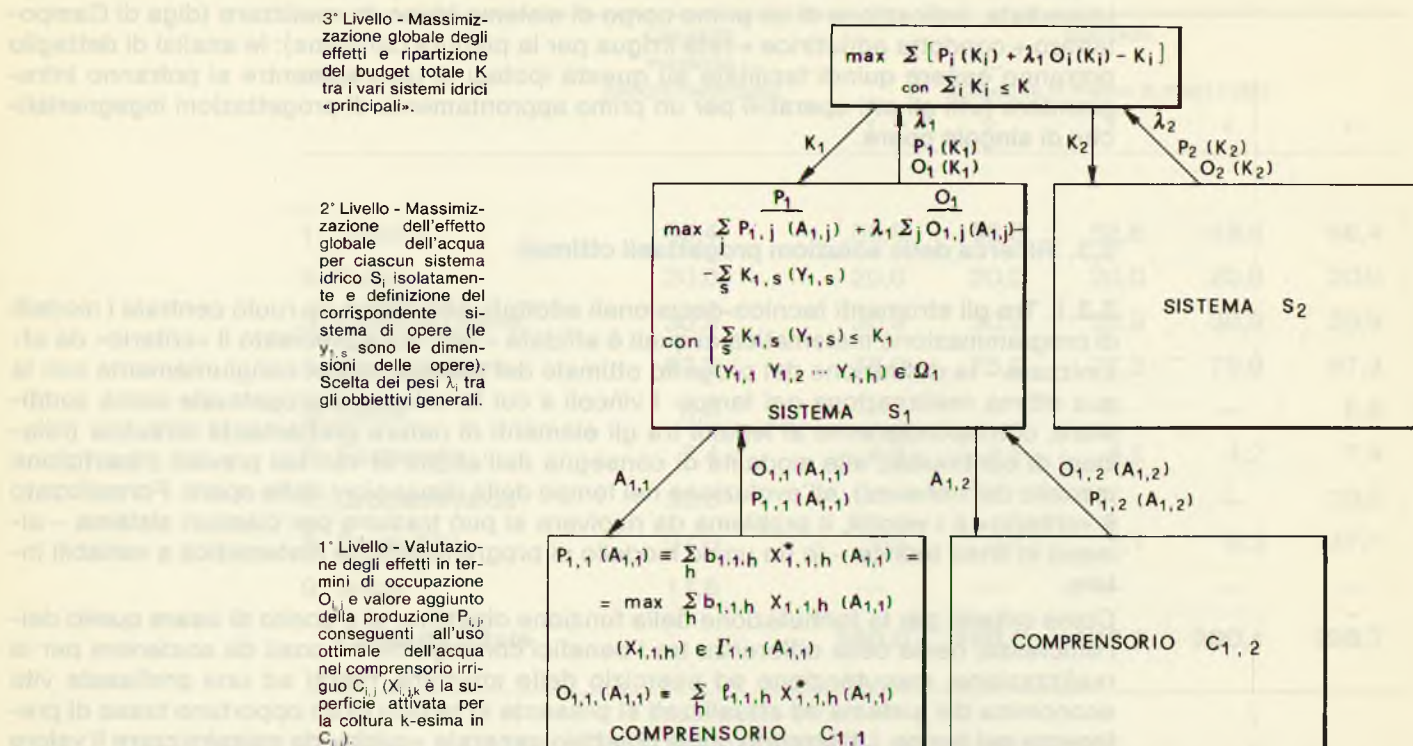
Come criterio per la formulazione della funzione obiettivo, si è scelto di usare quello dell'efficienza, ossia della differenza tra i benefici conseguibili e i costi da sostenere per la realizzazione, manutenzione ed esercizio delle strutture, riferiti ad una prefissata vita economica del sistema ed attualizzati al presente in termini di un opportuno tasso di preferenza nel tempo. Utilizzando come obiettivo generale «guida» da massimizzare il valore aggiunto della produzione, tali benefici sono definiti come incremento di valore aggiunto della produzione, conseguente all'irrigazione, per gli usi agricoli, mentre, per gli usi elettrici, sono considerati pari ai costi aggiuntivi da sostenere per produrre la medesima quantità di energia annua con centrali termoelettriche.

I fabbisogni per gli usi civili e industriali sono, invece, imposti come vincoli da soddisfare e sono determinati o in base agli atti programmatici delle autorità pianificanti (e quindi come obiettivi-target), oppure, considerati come variabili esogene al problema della ripartizione delle risorse idriche, sono calcolati sulla base di opportuni modelli previsionali (a giustificazione di questa scelta è la difficoltà di una corretta valutazione dei relativi benefici, ma anche il fatto che l'acqua non risulta essere un fattore primario di sviluppo per gli usi industriali, in contrasto con quanto avviene invece per il settore agricolo). Occorrerà, quindi, verificare con analisi di sensitività post-ottimali, l'effetto indotto sulla soluzione ottimale da variazioni in tali valori prefissati; ciò assume un'enfasi particolare in quanto, per definire lo sviluppo temporale ottimale delle opere, occorre fissare l'intera traiettoria di tali fabbisogni in tutto il periodo necessario alla completa realizzazione del sistema.

Altri obiettivi generali, quali l'incremento della occupazione e la redistribuzione regionale del reddito, possono essere considerati come vincoli da soddisfare a livelli determinati, seguendone poi l'effetto in rapporto all'obiettivo dell'incremento della produzione; si costruiscono così superfici di trasformazione tra obiettivi da porre all'attenzione del controllo decisionale per la scelta dei pesi tra gli obiettivi stessi e, quindi, del progetto ottimale (cfr. 19).

Noti, così, i pesi è possibile considerare un nuovo criterio da ottimizzare costituito dalla somma pesata di tali obiettivi generali. Variando poi per ciascuno dei sistemi disgiunti, in cui è suddiviso il territorio, il capitale a disposizione per la realizzazione, manutenzione ed esercizio delle strutture idrauliche e seguendone l'effetto in termini del nuovo criterio globale, può essere associata a ciascun sistema una curva di produttività marginale del capitale a disposizione in termini di tale criterio. Dall'esame di ogni curva si può procedere all'allocazione ottimale delle risorse finanziarie tra i vari sistemi; in corrispondenza si ricava la soluzione ottimale per ciascun sistema e, quindi, per l'intero territorio in esame, che tiene conto sia del complesso degli obiettivi generali che delle limitazioni finanziarie; poiché il problema della allocazione del budget a disposizione risulta complicata dal fatto che tale budget non risulta limitato unicamente nella sua globalità – in riferimento all'intera vita economica del progetto – ma risulta disponibile in vario modo lungo tale periodo, il problema può essere affrontato ricorrendo all'algoritmo di Lange-Lerner (cfr. 5), dopo aver diviso la soluzione progettuale di ciascun sistema in più progetti distinti.

Figura 2.6 - Gerarchia degli obiettivi.



2.3.2. Il processo di ottimizzazione, ora descritto, può essere formalizzato – almeno parzialmente – come una struttura gerarchica a più livelli (tenendo conto che al secondo livello i pesi sono definiti «a posteriori» dalle autorità decisionali senza utilizzare alcun esplicito modello formale di confronto, quali quelli utilizzati nell'analisi multiobiettivi). Come si riporta schematicamente in fig. 2.6 e considerando per semplicità solo gli usi agricoli e gli obiettivi generali di valore aggiunto della produzione e dell'occupazione:

- a - al 1° livello vengono valutati – sulla base di ipotesi di uso razionale dell'acqua – gli effetti dell'acqua in ogni comprensorio irriguo, considerato isolatamente, al variare dell'acqua disponibile;
- b - al 2° livello viene invece massimizzato – secondo il criterio dell'efficienza della spesa – l'obiettivo «complesso» della somma pesata di produzione e occupazione (stabilendone il valore del «peso» λ_i) al valore del budget disponibile per ciascun sistema idrico – considerato isolatamente – in cui è suddivisa l'intera area di intervento del progetto speciale n. 29;
- c - al 3° livello viene massimizzato il beneficio globale per l'intera area, individuando così la ripartizione del budget per ciascun sistema idrico (2° livello). Tornando a questo punto al 2° livello, risultano determinati, in relazione al budget prefissato, la configurazione progettuale del sistema e quindi le dimensioni delle opere e i volumi d'acqua assegnati ai vari usi, in particolare a quelli agricoli. Scendendo quindi al 1° livello ed eseguendo qui le valutazioni di assetto del comprensorio in relazione al volume di acqua assegnato, resta determinato anche il mix-colturale da attivare.

2.3.3. Come si è già detto, il problema della definizione della configurazione ottimale di ciascun sistema idrico (principale), viene affrontato ricorrendo a modelli di programmazione matematica.

Anzi, almeno in teoria, ci si avvarrebbe di un unico modello «intertemporale», nel cui sistema di vincoli sono esaminati gli elementi del sistema nelle loro relazioni spaziali (relazioni di continuità, nello stesso «istante», dei flussi idrici) e temporali (continuità nei livelli di dimensione delle varie strutture idrauliche) in tutto l'orizzonte di piano prefissato per la completa realizzazione del sistema di opere (nel nostro caso il periodo 1980-2000). Le variabili intere, del tipo 0 o 1, sono utilizzate per esprimere la decisione di realizzare o meno un'opera o parte di opera in un determinato periodo realizzativo. Le dimensioni delle opere sono in generale indeterminate sia nei loro valori finali (cioè al-

l'anno 2000) che intermedi. I volumi d'acqua consegnati alle varie utilizzazioni sono pre-determinati come fabbisogni, come nel caso degli usi industriali e potabili, oppure sono anch'essi indeterminati, ma generalmente non decrescenti (cioè, come si è detto, vale in particolare negli usi agricoli) e se ne ricercano quindi i valori insieme alle dimensioni delle opere, massimizzando la funzione obiettivo della differenza tra benefici e costi attualizzati. È opportuno rilevare che la formulazione matematica di tale funzione richiede che si fissi un tasso di preferenza nel tempo a cui vengano scontati i costi e i benefici per essere resi fra loro omogenei.

La struttura matematica del modello è inoltre caratterizzata da ipotesi o scelte di base quali: 1) fissazione di un arco temporale per la realizzazione del sistema e di una sua vita economica (periodo in cui è limitato il confronto tra costi e benefici); 2) caratteristiche di sviluppo costruttivo delle singole opere (modularità o meno, tempi di realizzazione); 3) discretizzazione dell'arco temporale di riferimento in periodi elementari (mesi) e in loro multipli, in cui rimangono costanti i benefici (anni) e l'assetto delle opere (quinquenni); 4) ritardo tra attrezzatura di un'area irrigua ed effettiva utilizzazione dell'acqua da parte degli agricoltori; 5) dipendenza dei benefici dal livello annuo di acqua utilizzata e non dal tempo di calendario; 6) scomponibilità dei costi di realizzazione delle opere in costi fissi e costi variabili proporzionali alle dimensioni delle opere (i costi di manutenzione, ammortamento ed esercizio sono proporzionali alle dimensioni).

Purtroppo, la risoluzione di un modello di questo genere presenta insormontabili difficoltà pratiche, anche con l'uso dei più sofisticati codici di programmazione matematica, se non per piccoli sistemi, a causa del gran numero di variabili intere e di equazioni che lo compongono. Per l'analisi dei nostri sistemi idrici principali, si è cercato di ovviare a ciò utilizzando dapprima un modello stazionario (o di lungo periodo) e quindi ricercando lo scaglionamento nel tempo della dimensione delle opere con il medesimo modello intertemporale, in cui però le dimensioni finali delle opere risultano generalmente pari ai valori ottenuti dal modello stazionario.

Il vantaggio di questo approccio di sub-ottimizzazione risiede nel fatto che dalla soluzione del modello stazionario si hanno indicazioni sulla opportunità di eliminare dal sistema le strutture non attivate a regime, ottenendo così una semplificazione complessiva del sistema ed, eventualmente, la possibilità di decomporlo successivamente in parti disgiunte, che siano facilmente coordinabili, per l'analisi dello scaglionamento del tempo.

Alternativamente, si può tentare di risolvere il problema della soluzione ottimale intertemporale ricorrendo al modello di assetto finale (che sarà indicato anche come modello stazionario o di lungo termine): si tratta di fissare dei limiti superiori su capitale disponibile e capacità tecnica di realizzazione per quanto attiene all'offerta di acqua e livelli di fabbisogno differenziati – ancorati a prefissati orizzonti temporali – per la domanda. Dal confronto delle soluzioni così ottenute per i diversi orizzonti temporali e dall'esame della loro coerenza interna si può quindi pervenire ad una soluzione involuppo coerente, i cui elementi siano espressi nel loro sviluppo temporale. Si tratta ancora, comunque, di una sub-ottimizzazione. È altresì possibile utilizzare un modello intertemporale semplificato (cfr. cap. 3) che conserva le ipotesi del modello intertemporale globale a cui si è già accennato, ma con notevole semplificazione della struttura dei vincoli.

2.3.4. I modelli di simulazione sono utilizzati in questa metodologia soprattutto come verifica delle soluzioni in corrispondenza della considerazione di serie idrologiche opportunamente lunghe e rappresentative, oltre che di espressione degli input (si consideri, ad esempio, l'evaporazione nei serbatoi) non utilizzabili nei modelli di programmazione matematica.

In seguito si procederà ad una presentazione più dettagliata della modellistica adoperata.

2.4. Studi settoriali

La quantificazione dei dati di base, necessari alle analisi per la definizione del progetto ottimale di sistema idrico, richiede un insieme di indagini atte a valutare sia le quantità di risorsa (offerta) disponibile, sia l'entità e le modalità dei fabbisogni per i diversi usi (domanda).

Ad evitare i rischi di una inutile dispersione di energie umane, intellettuali e finanziarie nella conduzione di campagne di indagini a tappeto, si è preferito, in coerenza con la metodologia generale di analisi adottata, ancorare le varie indagini – sia nella qualità che

nei tempi di realizzazione – alla gerarchia dei problemi decisionali e di studio da affrontare. In tal senso il processo di affinamento successivo delle soluzioni progettuali di sistema si rivela una sicura fonte di orientamento: ad esempio, già l'elaborazione di analisi preliminari ha permesso di focalizzare l'indagine conoscitiva sulla possibilità di modulazione di alcune falde sotterranee piuttosto che sulla fattibilità di strutture di regolazione alternative e, inoltre, di studiare con modelli quantitativi accurati alcune strutture idrogeologiche piuttosto che altre a priori altrettanto interessanti.

Naturalmente, questi studi settoriali sono impostati in modo da fornire sia dati di base (attraverso campagne di sondaggio e misure nel caso della valutazione dell'offerta, o indagini statistiche nel caso della domanda), organizzati sotto forma di archivio elettronico in modo che ne risulti pratica e flessibile l'utilizzazione, sia i modi di utilizzare tali informazioni per l'esame di fenomeni più complessi, quali ad esempio la determinazione dei deflussi superficiali o la identificazione degli acquiferi principali dal lato dell'offerta, oppure la valutazione dei benefici nell'uso dell'acqua in agricoltura, o quella dei fabbisogni idrici potabili e industriali dal lato della domanda.

Ci si avvale a tale scopo ancora di una serie di modelli matematici.

In particolare, nel campo della valutazione delle risorse sono utilizzati modelli di tipo statistico e di tipo deterministico, per la valutazione delle relazioni afflussi-deflussi superficiali, e modelli di identificazione degli acquiferi per la valutazione delle risorse sotterranee.

Per lo studio della domanda, invece, si è metodologicamente scelto di far ricorso a un modello statistico per le previsioni dell'andamento demografico (valutazione della domanda potabile), a un modello di ottimizzazione basato su ipotesi di uso razionale dell'acqua per ciascun comprensorio agricolo (valutazione dei mix-colturali ottimali e, quindi, dei benefici associati all'uso dell'acqua e dei conseguenti consumi idrici), a modelli statistico-economici per la valutazione dei costi delle opere e delle produzioni energetiche (valutazione dei benefici nel settore idroelettrico) e, infine, a un modello economico di benefici-costi che, in relazione al complesso delle relazioni socio-economiche esistenti tra i singoli settori di impiego delle risorse, determini una valutazione d'insieme degli assetti programmatici emergenti e quindi la validità del progetto nel suo complesso.

2.5. Supporto elaborativo

È opportuno sottolineare che, data la mole delle informazioni raccolte e la complessità degli strumenti modellistici impiegati, la metodologia adottata risulta operativa e praticamente perseguibile solo grazie ad un uso estremamente massiccio dell'elaboratore.

È stata, quindi, predisposta tutta una serie di procedure elaborative che consentono in modo rapido sia la soluzione, eventualmente desiderata, dei vari modelli considerati, sia elaborazioni ad essi complementari, quali la preparazione di dati di input ai modelli e il recupero o l'aggregazione dei risultati, o ancora successive valutazioni (analisi costi-benefici a posteriori).

Tali procedure sono generalmente gestite in modo informatico tramite terminale video e ciò rende estremamente facile e immediato il loro uso; per questa via gli strumenti modellistici assumono così, sempre più, un ruolo attivo quali utili strumenti di lavoro.

Al fine di coordinare l'uso di tali procedure con i numerosi dati di ingresso necessari si sta, infine, procedendo alla organica raccolta di tutte le informazioni disponibili in un disegno complessivo di «banca dati», confacente alle attuali e future esigenze modellistiche e di documentazione.

3 l'analisi di un sistema idrico complesso

- ottimizzazione statica
- ottimizzazione intertemporale
- simulazione
- dimensionamento di uno schema acquedottistico

nel campo di applicazione, come è il caso dei problemi decisionali e di studio da affrontare. La tecnica di elaborazione dei dati, che ha permesso di ottenere soluzioni progettuali di sistema si rivela una buona tecnica di programmazione: ad esempio, già l'elaborazione di analisi preliminari ha permesso di individuare i collegamenti essenziali, sulla possibilità di modulazione di alcune funzioni, di individuare le strutture di regolazione alternative e, inoltre, di sviluppare dei modelli qualitativi e quantitativi di alcune strutture geologiche piuttosto che altre, e così altrettanto interessanti.

Naturalmente, questi studi settoriali sono proposti in modo da essere basati sui dati di base disponibili, sia per la domanda che per l'offerta, o per la produzione e l'uso dell'acqua. In particolare, si può dire che l'uso di strumenti elettronici di calcolo ha permesso di realizzare, in modo flessibile e utilizzabile, sia i modi di utilizzare tali informazioni, sia i modi di organizzare i dati, sia, quando è necessario, la determinazione dei benefici, sia dal lato dell'offerta, sia dal lato della domanda, o quella del fabbisogno e industriale dal lato della domanda.

Ci si riferisce a tale scopo ancora di più, si possono utilizzare modelli di tipo statistico e di tipo deterministico, per la valutazione delle relazioni afflussi-deflussi superficiali, e modelli di tipo deterministico per la valutazione delle risorse sotterranee.

Per lo studio della domanda, invece, si è messo in evidenza di far ricorso a un modello statistico per le previsioni (per la valutazione della domanda potabile), a un modello di ottimizzazione basato su ipotesi di uso razionale dell'acqua per ciascuno dei settori (per la valutazione delle risorse idriche), a modelli statistico-economici per la valutazione dei costi delle opere e delle produzioni energetiche (valutazione dei benefici nei confronti delle opere), a un modello economico di benefici-costi che, in relazione al complesso delle relazioni socio-economiche esistenti tra i singoli settori di produzione e consumo, determini una valutazione d'insieme degli aspetti programmatici e progettuali e quindi la scelta del progetto nel suo complesso.

3.2. Metodologia

È necessario, per la valutazione delle informazioni raccolte e la conduzione degli studi, una metodologia operativa e pratica, estremamente semplice e immediata dell'elaboratore.

È stata, quindi, sviluppata una serie di procedure elaborative che consentono in modo rapido e flessibile la selezione, eventualmente desiderata, dei vari modelli considerati, sia elaborazioni ad essi complementari, quali la preparazione di dati di input per i modelli e il recupero o l'aggregazione dei risultati, o ancora, eventualmente, valutazioni (analisi costi-benefici e potabilità).

Tali procedure sono generalmente gestite in modo interattivo, tramite terminale video e ciò rende estremamente facile e immediato il lavoro, sia che si usino gli strumenti modellistici, sia che si usino gli strumenti di lavoro.

Al fine di coordinare l'uso di tali procedure, per la valutazione delle informazioni necessarie si è proceduto alla organica raccolta e alla organizzazione delle informazioni in un database complessivo di «banca dati», conforme alle future esigenze modellistiche e di documentazione.

L'analisi di un sistema idrico complesso

Abbiamo visto nel capitolo secondo quale sia il ruolo affidato ai modelli di ottimizzazione e di simulazione per l'analisi di ciascuno dei sistemi idrici complessi in cui si scompone strumentalmente l'intero sistema idrico allo studio del progetto speciale n. 29.

Ne tratteremo qui più specificamente.

In particolare, verranno presentati due modelli di ottimizzazione: a) modello «statico» e modello intertemporale «semplificato»; b) modello di simulazione parametrico, cioè con diverse opzioni possibili per la scelta delle politiche di esercizio.

È inoltre presentato un ulteriore modello di ottimizzazione finalizzato al dimensionamento di schemi acquedottistici.

3.1. Ottimizzazione statica

3.1.1. Il modello «statico» è lo strumento cardine per la ricerca delle configurazioni progettuali su cui orientare il dibattito del momento decisionale o, ai vari livelli di analisi, l'affinamento delle ipotesi di base e l'individuazione dei modi critici.

Naturalmente, come si è già accennato in precedenza, un tale modello è basato su notevoli semplificazioni del problema reale, a partire, *in primis*, dalla atemporalità della formulazione, in quanto cioè si prescinde dal considerare lo sviluppo della realizzazione del sistema nel tempo e, quindi, dai limiti sulle possibilità tecniche e finanziarie – sempre nella loro puntualizzazione temporale – per la realizzazione delle singole opere e, infine, dalla evoluzione della domanda da soddisfare.

In altri termini, ciò equivale ad assumere che il confronto tra le diverse alternative di realizzazione sia ancorato ad un unico istante temporale, del tutto indeterminato ma comune a tutte le alternative.

Il funzionamento del sistema è inoltre seguito per un limitato periodo – ancora comune a tutti gli elementi del sistema – esteso quanto basti a cogliere le principali caratteristiche delle disponibilità idrologiche: ad esempio, l'anno.

Si intende quindi che i parametri idrologici e il funzionamento del sistema stesso si ripetano ciclicamente per tutta la vita economica del sistema, considerata quindi come un susseguirsi di cicli standard.

Un'altra limitazione, che risulta immediatamente evidente, consiste nella considerazione esplicita di un solo obiettivo o meglio di una sola funzione obiettivo, attraverso la cui massimizzazione si cercherà la soluzione «ottimale» rispetto al complesso degli obiettivi perseguiti.

Di questo aspetto in generale abbiamo già discusso; giova però ricordare che nell'uso del modello statico si deve cercare, da un lato, di includere il più possibile il complesso degli obiettivi all'interno della funzione obiettivo stessa, mediante un complesso di pesi definibili a priori, e, d'altro canto, di tener conto degli obiettivi residui sotto forma di vincoli da soddisfare a prefissati livelli (cfr., a questo proposito, 19).

Da ciò scaturisce, anche, l'importanza della parametrizzazione in quanto momento interno al processo di ottimizzazione, piuttosto che analisi post-ottimale.

Un'ulteriore limitazione consiste nel carattere discreto della formulazione rispetto ai flussi idrici.

Il flusso idrico non viene, cioè, considerato come continuo o nei suoi valori istantanei, ma sotto forma di volumi complessivi corrispondenti a determinati sottoperiodi (mesi, stagioni) del periodo (anno, o più anni consecutivi) in ragione del quale viene rappresentato il comportamento del sistema, mediante il complesso dei vincoli di continuità.

Si deve inoltre procedere ad una schematizzazione del sistema reale in forma di sistema logico, i cui elementi risultano dalla semplificazione e aggregazione di differenti processi e grandezze reali.

Un tale procedimento di astrazione dalla realtà fisica del sistema è inevitabile, sia perché una descrizione dettagliata può non essere necessaria ai fini dell'analisi da sviluppare,

sia perché i legami fra le variabili non sono sempre riconducibili in termini di relazioni utilizzabili direttamente nel modello, sia, infine, perché l'introduzione di un eccessivo numero di parametri e di variabili appesantirebbe il modello rendendolo di non facile maneggevolezza, a causa dell'incremento nei tempi di calcolo e della difficoltà di interpretazione dei dati elaborati.

Oltre a quelle relative ai processi idrologici le principali semplificazioni generalmente utilizzate consistono, ad esempio, nell'aggregazione di piccole utenze ovvero di risorse e strutture idrauliche (ad esempio i canali di gronda afferenti ad un serbatoio), sia dal punto di vista della disponibilità idrica che del costo o beneficio totale; o ancora nel non tener conto di fenomeni quali il ritorno in falda di parte dell'acqua utilizzata in agricoltura o l'evaporazione negli invasi.

In sintesi dalla schematizzazione che ne deriva, si individuano:

- a - le aste fluviali
- b - le sezioni di interesse della rete idrografica, ovvero quei luoghi ove può essere localizzata un'opera idraulica o una risorsa (invasi, traverse, sorgenti, falde, impianti di depurazione,.....)
- c - le dimensioni massime e minime degli invasi e delle utenze non prefissabili a priori
- d - l'idrologia sottesa da ciascuna sezione di interesse per ogni periodo che caratterizza la scala temporale (ad es. il mese). Purtroppo, la scelta di quale idrologia debba essere assunta come tipica e soddisfacente, ai fini dell'analisi, è un problema quanto mai arduo. Generalmente si adotta quella di un anno storico o ricostruito, che con probabilità 70-80% abbia deflussi inferiori a quelli di un altro anno scelto a caso. Ora, anche se risulta possibile precisare questo concetto in riferimento ad una particolare sezione di interesse, assai problematica ne è l'estensione ad un complesso di sezioni, per cui sorge immediata l'esigenza di procedere a più tentativi con diverse basi idrologiche, oltre poi a verificare più attentamente la validità delle soluzioni dal punto di vista delle disponibilità idriche, mediante l'uso di lunghe serie idrologiche e della simulazione
- e - le utenze potabili, industriali, agricole ed ecologico-sanitarie. Il grado di dettaglio del modello suggerisce anche come accorpate tali utenze; per ciascun tipo di utenza viene inoltre considerata la sua modulazione sulla scala temporale prescelta
- f - possibili collegamenti tra risorse ed utenze
- g - gli impianti di pompaggio che eventualmente debbono essere introdotti con le relative prevalenze
- h - gli impianti di produzione di energia elettrica; tali impianti, reali o fittizi, permettono di pesare in modo diverso risorse che sono individuate a quote differenti.

Il sistema è, quindi, caratterizzato da una serie di archi e nodi, mentre, per ciascun arco, è scelto un verso di percorrenza positivo e conseguentemente associato un nodo iniziale ed uno finale; quei collegamenti in cui il verso di percorrenza del fluido non può essere definito a priori sono schematizzati con due archi in parallelo con verso opposto di percorrenza.

Confrontando le figg. 3.1. e 3.2. si può osservare, in particolare, come, da una tradizionale corografia di un sistema idrico complesso, con più unità strutturali e più usi, si passi al corrispondente schema logico ottenuto in base al processo di astrazione e semplificazione del sistema reale.

Nulla tale schema ci dice sui valori dei parametri strutturali da considerare a base del modello di sistema da formulare. Diverse scelte dei parametri porteranno, infatti, a rappresentazioni diverse di uno stesso modello, cioè in pratica a modelli e soluzioni differenti.

Ancor più, è bene notare che per assunzioni differenti della funzione obiettivo, le soluzioni che ne derivano, anche se si riferiscono allo stesso sistema e sono quindi pienamente confrontabili, rispondono a criteri di ottimalità del tutto diversi, di cui occorrerà sempre tener conto per dare un senso alla loro concreta validità.

3.1.2. Funzione obiettivo

Consideriamo ora dapprima la struttura della funzione obiettivo (f.o.) da massimizzare, che in generale, a prescindere dal significato da attribuire ai singoli costi e benefici, sarà espressa dalla differenza tra benefici e costi complessivi:

$$F.O. = BI + BU - CC - CI - CS$$

[1]

Figura 3.1 - Il sistema idrico Abruzzo Sud-Molise.

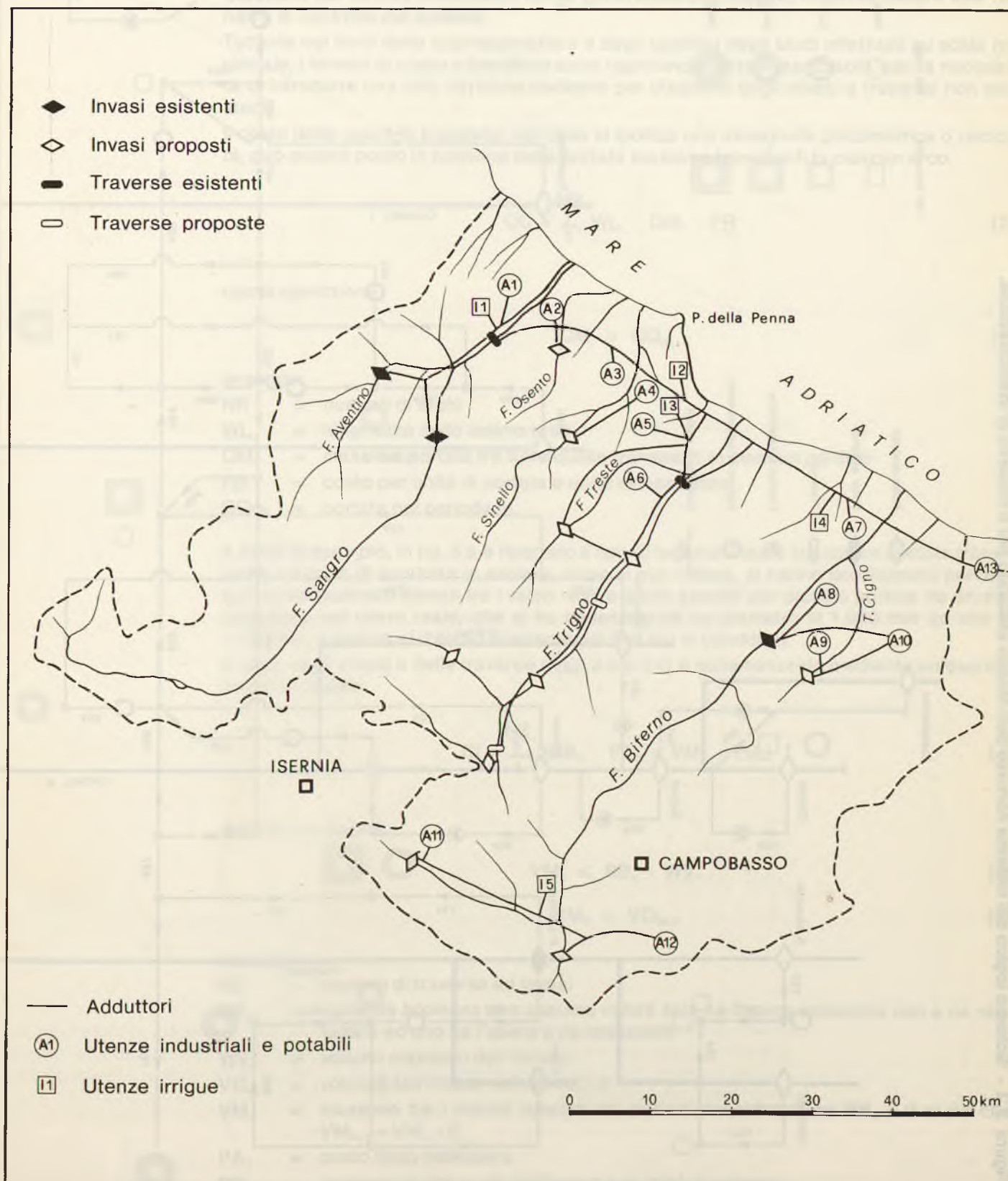
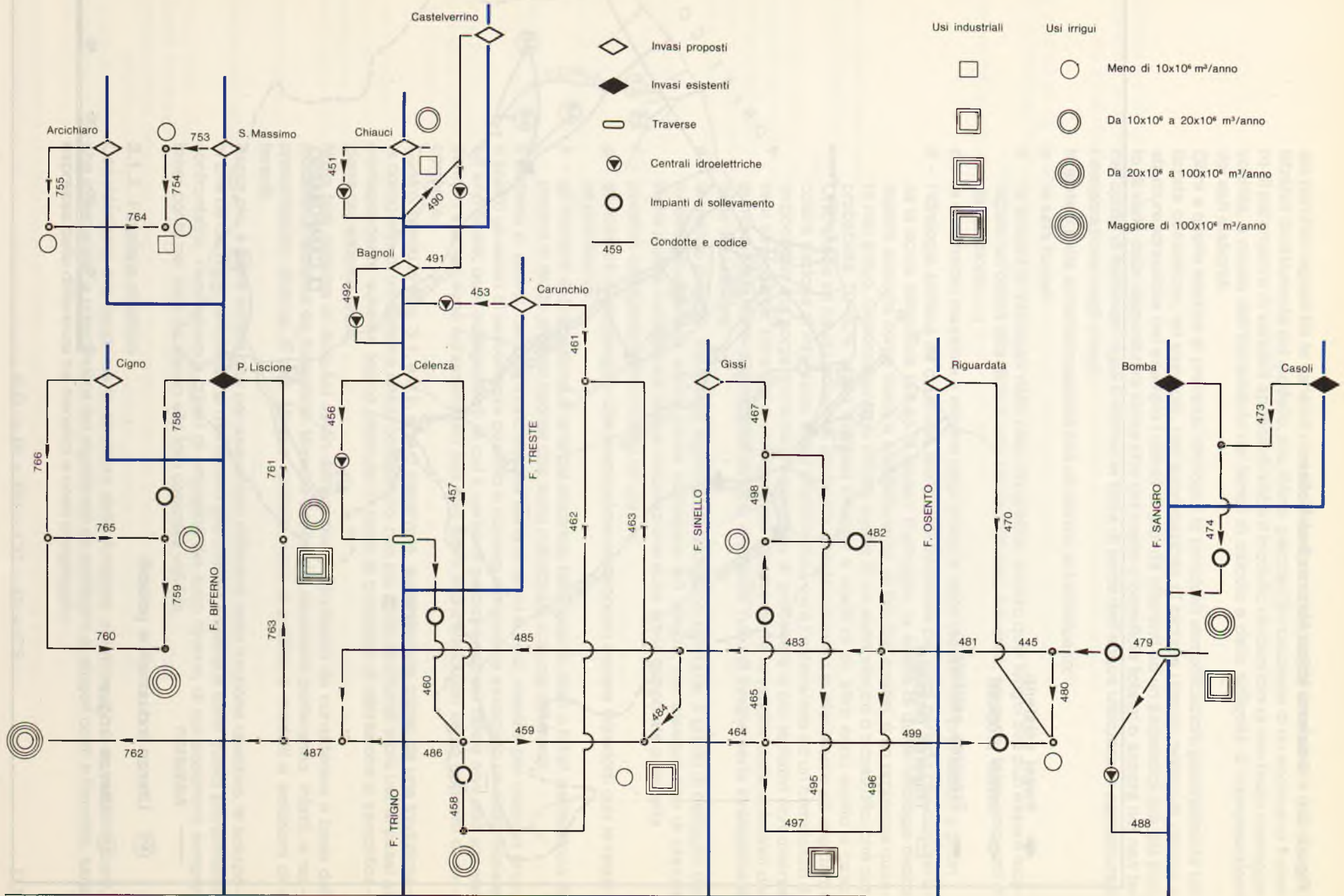


Figura 3.2 - Schema logico del sistema Abruzzo Sud-Molise utilizzato per il modello di ottimizzazione.



ove:

- CC sono i costi delle opere di trasporto
- CI sono i costi degli invasi e traverse
- CS sono i costi degli impianti di sollevamento
- BI sono i benefici ottenuti nella produzione di energia elettrica
- BU sono i benefici collegati alla utilizzazione delle risorse idriche.

Ciascuno dei termini considerati non è generalmente collegato in forma lineare alle variabili di controllo del sistema.

Tuttavia nei limiti delle approssimazioni e degli obiettivi degli studi effettuati su scala regionale, i termini di costo e beneficio sono ragionevolmente linearizzabili, con la necessità di introdurre una sola variabile *booleana* per ciascuno degli invasi e traverse non esistenti.

Il costo delle opere di trasporto, nel caso si ipotizzi una assegnata piezometrica o velocità, può essere posto in funzione delle portate massime transitanti in ciascun arco:

$$CC = \sum_1^{NR} WL_i \cdot QM_i \cdot PR \quad [2]$$

con la condizione

$$QM_i \geq QQ_{m,i} \quad [3]$$

essendo:

- NR = numero di archi
- WL_i = lunghezza dello *i*-esimo arco
- QM_i = massima portata tra tutte quelle transitanti in ciascun periodo
- PR = costo per unità di portata e unità di lunghezza
- $QQ_{m,i}$ = portata nel periodo *m*.

A titolo di esempio, in fig. 3.a è riportato il tipo di legame lineare tra costi e portata transitante nel caso di condotte in acciaio; come si può notare, si hanno scostamenti percentualmente piuttosto elevati tra i valori reali e quelli assunti per piccole portate (la brusca variazione nel costo reale, che si ha passando da un diametro di 1.600 mm ad uno di 1.700 mm, è dovuta al diverso spessore dei due tipi di condotta).

Il costo degli invasi e delle traverse (figg. 3.b e 3.c) è schematizzato mediante un'espressione binomiale:

$$CI = \sum_1^{NZ} (BB_n \cdot PA_n + VM_n \cdot PB_n) \quad [4]$$

sotto le condizioni

$$VM_n \leq BB_n \cdot WV_n \quad [5]$$

$$VM_n \geq VO_{m,n} \quad [6]$$

essendo:

- NZ = numero di traverse ed invasi
- BB_n = variabile *booleana* che assume valore zero se l'opera *n*-esima non è da realizzare ed uno se l'opera è da realizzare
- WV_n = volume massimo dell'invaso
- $VO_{m,n}$ = volume dell'invaso nel periodo *m*
- VM_n = massimo tra i volumi assunti nei periodi considerati, se $BB_n = 0$ si ha che $VM_{m,n} = VM_n = 0$
- PA_n = costo fisso dell'opera
- PB_n = incremento del costo dell'opera per unità di volume.

Figura 3.a - Costo dei collegamenti in funzione della portata
(\varnothing = diametro in millimetri).

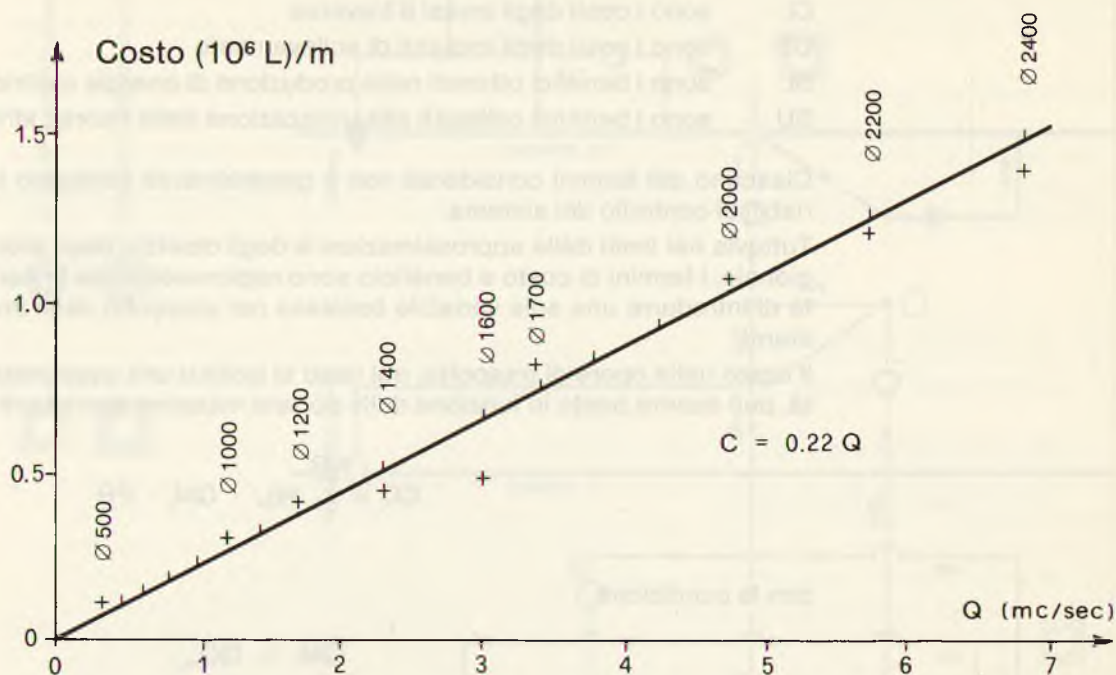
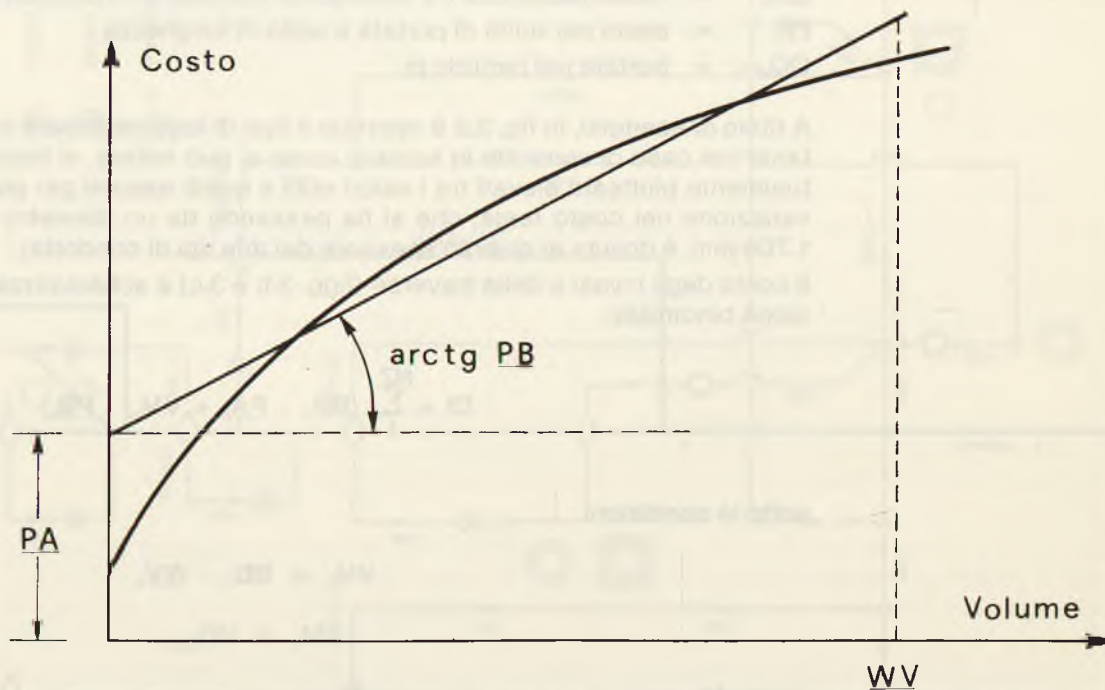


Figura 3.b - Costo di un invaso in funzione del volume.



Più in generale, si è nella situazione che, se si deve realizzare l'invaso, la dimensione di questo non può essere inferiore ad un livello minimo (capacità destinate ad interrimento o a laminazione delle piene, opportunità tecniche,...) WA_n . Alla [5] si dovrà allora aggiungere l'ulteriore condizione

$$VM \geq BB_n \cdot WA_n \quad [5']$$

e la curva di costo assumerà l'andamento in fig. 3.c.

Figura 3.c - Approssimazione mediante una spezzata del costo di un invaso.

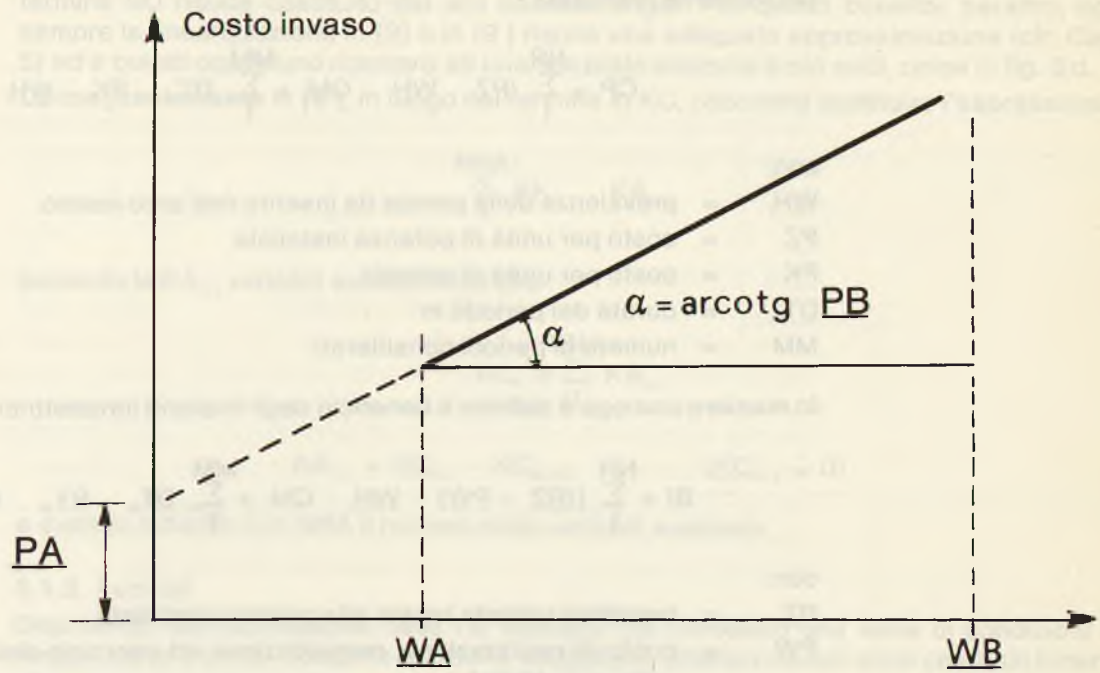
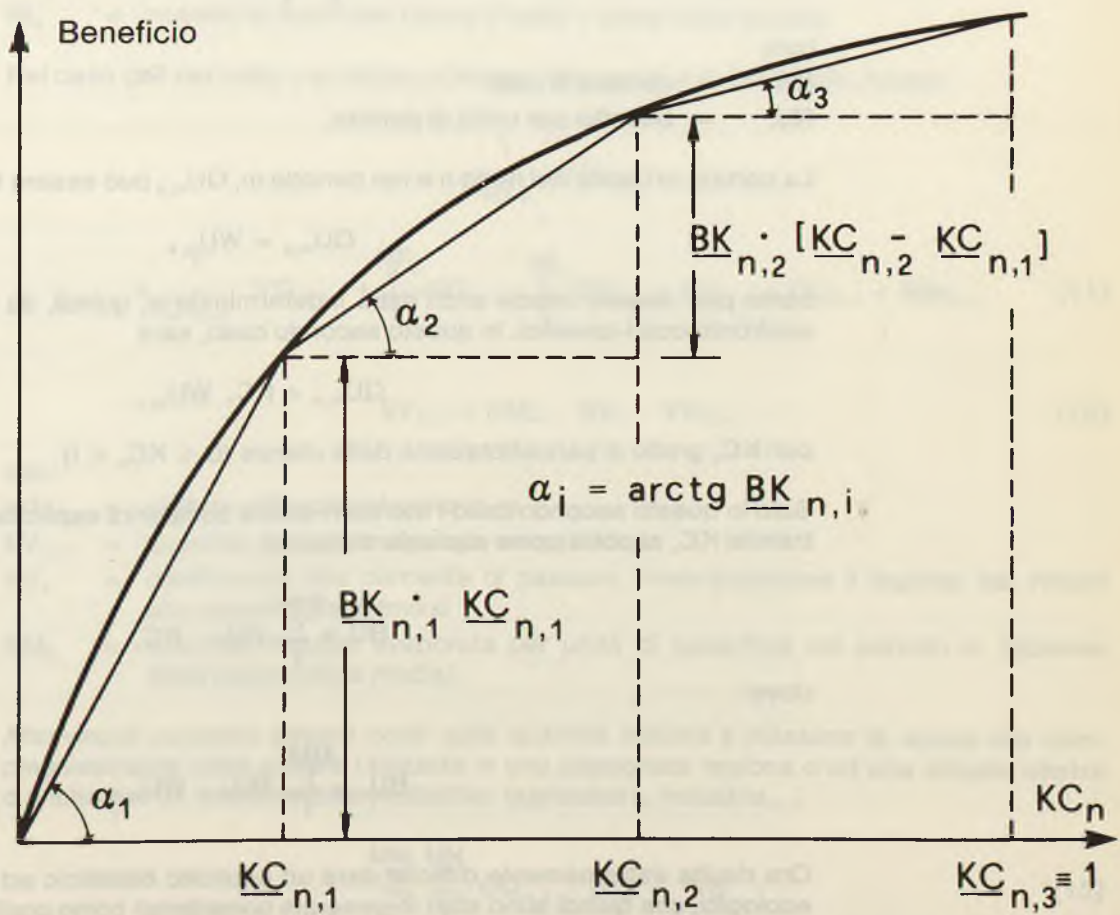


Figura 3.d - Beneficio della n-sima utenza irrigua.



Il costo di eventuali impianti di sollevamento (comprensivo del costo di realizzazione, manutenzione ed esercizio della centrale) è legato alla potenza installata ed all'energia effettivamente impiegata

$$CP = \sum_1^{NR} (PZ \cdot WH_i \cdot QM_i + \sum_1^{MM} DT_m \cdot PK \cdot WH_i \cdot QQ_{m,i}) \quad [7]$$

con:

WH_i = prevalenza della pompa da inserire nell'arco iesimo

PZ = costo per unità di potenza installata

PK = costo per unità di energia

DT_m = durata del periodo m

MM = numero di periodi considerati.

In maniera analoga è definito il beneficio degli impianti idroelettrici

$$BI = \sum_1^{NR} [(RZ - PW) \cdot WH_i \cdot QM_i + \sum_1^{MM} DT_m \cdot RY_m \cdot WH_i \cdot QQ_{m,i}] \quad [8]$$

con:

RZ = beneficio unitario legato alla potenza installata

PW = costo di realizzazione, manutenzione ed esercizio della centrale per unità di potenza installata

RY_m = beneficio per unità di energia prodotta, diverso nei vari periodi.

I benefici legati alla utilizzazione delle risorse idriche sono supposti proporzionali alla quantità di acqua consegnata, QU,

$$BU = \sum_1^{NN} \sum_1^{MM} RU_n \cdot QU_{m,n} \quad [9]$$

con:

NN = numero di nodi

RU_n = benefici per unità di portata.

La portata in uscita nel nodo n e nel periodo m, $QU_{m,n}$ può essere fissata a priori,

$$QU_{m,n} = WU_{m,n}$$

come può essere invece anch'essa indeterminata e, quindi, da definire sulla base del confronto costi-benefici. In questo secondo caso, sarà

$$QU_{m,n} = KC_n WU_{m,n}$$

con KC_n grado di parzializzazione delle utenze ($0 \leq KC_n \leq 1$).

Solo in questo secondo caso l'utenza n-esima comparirà esplicitamente nella f.o., e per il tramite KC_n si potrà porre equivalentemente:

$$BU = \sum_1^{NN} BU_n \cdot KC_n \quad [9']$$

dove:

$$BU_n = \sum_1^{MM} RU_n \cdot WU_{m,n}$$

Ora risulta estremamente difficile dare un esplicito beneficio ad usi potabili, industriali, ecologici, che quindi sono stati in generale considerati come prefissati (anche se si sono

fatte analisi in cui si è considerato, ad esempio, il beneficio dell'acqua all'industria come pari al mancato costo necessario ad attuare processi di riciclo). Usualmente, quindi, il termine BU risulta costituito dai soli benefici irrigui. Per questi benefici, peraltro, non sempre la linearizzazione in [9] o in [9'] risulta una adeguata approssimazione (cfr. Cap. 5) ed è quindi opportuno ricorrere ad una spezzata concava a più nodi, come in fig. 3.d. Conseguentemente in [9'], in luogo del termine in KC, occorrerà sostituire l'espressione

$$\sum_1^{NNA} \underline{BK}_{n,j} \cdot KA_{n,j}$$

essendo le $KA_{n,j}$ variabili ausiliarie tali che

$$KC_n = \sum_1^{NNA} KA_{n,j}$$

$$KA_{n,j} = \underline{KC}_{n,j} - KC_{n,j-1} \quad (\underline{KC}_{n,0} = 0)$$

e avendo indicato con NNA il numero delle variabili ausiliarie.

3.1.3. I vincoli

Discutendo dell'espressione della f.o. abbiamo già introdotto una serie di condizioni o vincoli, cui le diverse incognite debbono soddisfare. Ulteriori vincoli sono costituiti innanzitutto dalle equazioni di continuità ai nodi

$$\sum_1^{NF_n} QQ_{m,i} - \sum_1^{NI_n} QQ_{m,i} - QU_{m,n} = 0 \quad [10]$$

con:

NF_n = numero di archi che hanno il nodo n come nodo finale

NI_n = numero di archi che hanno il nodo n come nodo iniziale.

Nel caso che nel nodo n si abbia un invaso, l'equazione di continuità diviene

$$\begin{aligned} & \frac{1}{DT_m} \cdot VO_{m,n} = \\ & = \frac{1}{DT_{m-1}} VO_{m-1,n} + \sum_1^{NF_n} QQ_{m,i} - \sum_1^{NI_n} QQ_{m,i} - EV_{m,n} - QU_{m,n} + \underline{WM}_{m,n} \end{aligned} \quad [11]$$

$$EV_{m,n} = \underline{KM}_m \cdot \underline{KV}_n \cdot VO_{m,n} \quad [12]$$

con:

$\underline{WM}_{m,n}$ = portate affluenti nel periodo m

$EV_{m,n}$ = quantità d'acqua evaporata nel periodo m

\underline{KV}_n = coefficiente che permette di passare, linearizzandone il legame, dai volumi alle superfici degli invasi

\underline{KM}_m = quantità d'acqua evaporata per unità di superficie nel periodo m (dipende dalla temperatura media).

Altri vincoli possono essere posti sulle quantità minime e massime di acqua che complessivamente deve essere utilizzata in una assegnata regione o ad una singola utenza o anche per un intero settore produttivo (agricoltura, industria,...)

$$\sum_m^{MM} \sum_n^{NN} QQ_{m,n} \cdot DT_m \leq \underline{VB} \quad [13]$$

$$\sum_{m=1}^{MM} \sum_{n=1}^{NN} Q_{m,n} \cdot DT_m \geq VA \quad [14]$$

con DT_m opportuni coefficienti a valori compresi tra 0 e 1.

Nei rami immediatamente a valle delle traverse può essere imposto un limite sulla portata massima transitante per tener conto delle capacità massime di captazione dell'opera:

$$QM_i \leq BB_n \cdot WC_i \quad [15]$$

Ulteriori vincoli possono essere introdotti per tener conto esplicitamente di fatti quali la mutua esclusione di alternative contrastanti.

Infine, altri vincoli, quali il [13] e [14], devono essere introdotti per tener conto di determinati obiettivi, da soddisfare a determinati livelli. Se non saremo sicuri di tali valori e vorremo studiare gli effetti che variazioni in essi hanno sulla funzione obiettivo, non faremo che calcolare le soluzioni del modello corrispondenti a distinti valori del vincolo.

In ciò consiste, in sostanza, la tecnica della parametrizzazione.

Tra le grandezze di cui si vorrà tener conto potrà esserci anche la disponibilità di capitale per la realizzazione delle opere, oppure necessario per provvedere alla gestione, manutenzione ed esercizio annuale del sistema. Utilizzeremo in tal caso i vincoli aggiuntivi

$$R_1 \cdot CC + R_2 \cdot CI + R_3 \cdot CS \leq KR$$

$$G_1 \cdot CC + G_2 \cdot CI + G_3 \cdot CS \leq KG$$

dove i coefficienti R_i , G_i rappresentano le quote di costo complessivo corrispondenti alla realizzazione e alla gestione del sistema.

Dell'uso della parametrizzazione si tratterà ancora nel capitolo quarto. Notiamo ancora, però, che, se tutte le utenze, ad eccezione del solo uso idroelettrico, sono prefissate a priori, il nostro modello rappresenterà in effetti non tanto un problema di massimizzazione del beneficio netto, quanto piuttosto un problema di minimizzazione dei costi. Come si vedrà nel prosieguo, questo problema può essere ancora di grande interesse pratico, anche perché risulta possibile avvicinarsi per questa via alle soluzioni corrispondenti al criterio del beneficio netto. In tal caso si farà uso del vincolo [14] con specifico riferimento al settore irriguo, parametrizzandone opportunamente il livello da soddisfare.

3.1.4. Un esempio di applicazione del modello

Il modello illustrato è stato utilizzato per le analisi dei sei sistemi idrici di fig. 2.2 in cui è stato scomposto il territorio interessato al progetto speciale n. 29. Le indagini sono state compiute sia utilizzando diverse funzioni obiettivo (minimizzazione dei costi e/o massimizzazione dei benefici netti), sia effettuando opportune parametrizzazioni su alcune grandezze significative (fabbisogni, costi); nelle pagine che seguono vengono riportati, a titolo esemplificativo, alcuni risultati ottenuti per il sistema idrico Abruzzo Sud-Molise (vedi fig. 3.1), il cui schema logico è riportato in fig. 3.2.

Tali risultati si riferiscono ad una delle soluzioni ottimali di minimo costo, in particolare a quella relativa ai fabbisogni previsti per il lungo termine. Più in dettaglio, nella tabella 3.1 sono riportati i risultati circa le dimensioni prescelte per le opere di accumulo (invasi), mentre nella tabella 3.2 si presentano i risultati relativi alle dimensioni per le principali opere di adduzione, con la esplicitazione della relativa legge di gestione.

Nella tabella 3.3, invece, sono riportate alcune grandezze di interesse, caratteristiche della soluzione, atte a consentire una valutazione tecnico-economica complessiva della stessa, mentre la figura 3.3 mostra graficamente, a livello dello schema logico del sistema, le opere che nella soluzione risultano realizzabili (tali opere in figura sono contraddistinte da un tratto colorato).

3.2. Ottimizzazione intertemporale

Il modello statico non è per sua natura finalizzato allo studio dello sviluppo nel tempo da adottare per un sistema idrico. Un modo per ottenere indicazioni su quest'ultimo proble-

Figura 3.3 - Rappresentazione (in colore azzurro) della soluzione ottimale di lungo termine ottenuta con il modello di ottimizzazione (minimizzazione dei costi) per il sistema idrico Abruzzo Sud-Molise.

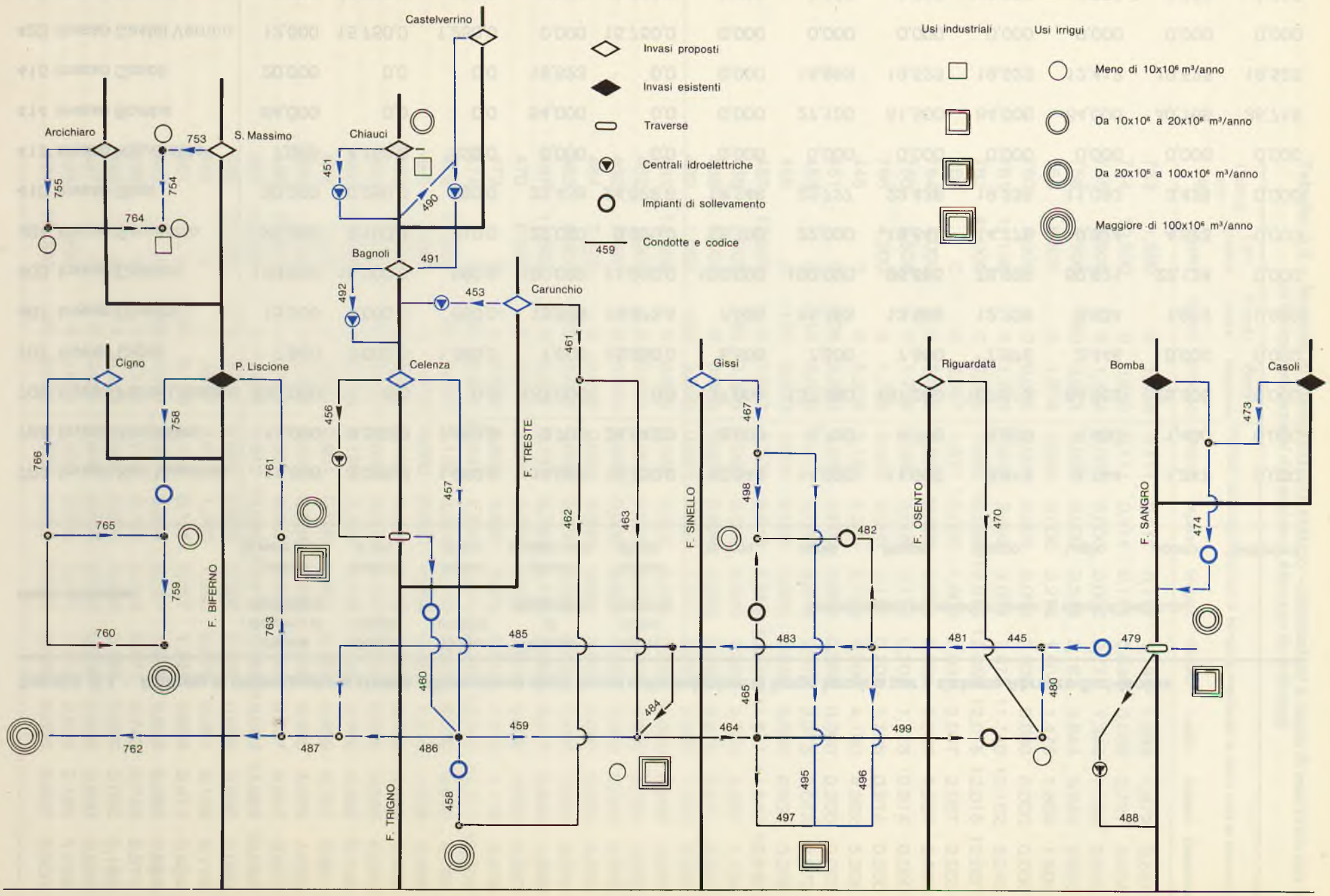


Tabella 3.2 - Modello di ottimizzazione statico - Dimensioni e leggi di esercizio per le principali adduzioni del sistema Abruzzo Sud-Molise

Codice condotta	Lunghezza (metri)	Prevalenza (metri)	Portata massima (mc/sec)	Portata nei singoli periodi di tempo considerati in metri cubi al secondo						
				Inverno	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre
753	1.500	0	1,993	0,111	0,111	0,111	1,191	1,993	1,679	0,867
754	10.500	0	0,850	0,111	0,111	0,111	0,535	0,850	0,727	0,408
755	4.000	0	1,344	0,000	0,000	0,000	0,772	1,344	1,120	0,540
758	4.500	150	3,644	0,000	0,000	0,539	3,162	3,644	3,644	2,523
759	9.500	0	1,804	0,000	0,000	0,276	1,804	1,475	1,804	1,505
760	5.300	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
761	11.100	0	11,740	1,818	3,385	3,054	7,873	11,740	10,162	6,243
762	41.000	0	12,050	7,965	12,050	12,015	12,050	12,015	12,015	12,050
763	0	0	2,067	1,577	0,000	1,603	2,032	2,067	2,067	2,032
764	4.000	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
765	2.500	0	1,728	0,000	0,000	0,112	0,202	1,728	0,914	0,000
766	4.200	0	1,728	0,000	0,000	0,112	0,202	1,728	0,914	0,000
445	0	0	5,306	5,136	2,204	5,136	5,306	4,790	4,992	5,306
451	0	-205	2,250	2,250	0,000	0,568	0,000	0,000	0,000	0,000
453	0	-210	2,073	0,477	0,000	2,073	2,073	2,073	2,073	2,073
456	0	-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
457	12.500	0	11,647	5,307	8,919	7,666	10,824	11,647	11,647	10,846
458	1.000	50	2,823	0,000	0,000	0,000	1,620	2,823	2,352	1,134
459	5.000	0	0,978	0,000	0,898	0,000	0,360	0,978	0,671	0,251
460	1.000	100	2,000	0,000	1,827	1,717	1,003	2,000	1,223	0,386
461	13.000	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
462	1.000	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
463	7.500	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
464	7.500	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
465	3.000	70	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
467	11.500	0	3,377	0,743	0,740	0,743	2,083	3,377	2,938	1,630
470	6.000	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
473	0	0	8,625	8,625	1,330	5,574	5,517	7,210	1,116	3,279
474	0	-160	28,842	28,842	1,330	5,574	10,378	13,557	13,711	10,358
479	11.500	80	6,000	5,136	2,204	5,136	6,000	6,000	6,000	5,792
480	2.000	0	1,210	0,000	0,000	0,000	0,694	1,210	1,008	0,486
481	1.500	0	5,306	5,136	2,204	5,136	5,306	4,790	4,992	5,306
482	1.500	40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
483	13.000	0	5,136	5,136	2,204	5,136	5,136	4,790	4,992	5,136
484	1.000	0	0,901	0,901	0,000	0,901	0,901	0,555	0,757	0,901
485	9.000	0	4,235	4,235	2,204	4,235	4,235	4,235	4,235	4,235
486	11.500	0	9,847	5,307	9,847	9,383	9,847	9,847	9,847	9,847
487	17.000	0	14,082	9,542	12,050	13,618	14,082	14,082	14,082	14,082
488	18.500	-70	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
490	0	0	3,617	3,617	1,235	1,353	0,579	0,261	0,149	0,116
491	0	-135	6,110	6,110	3,125	2,697	1,389	0,635	0,411	0,424
492	0	-160	7,941	7,941	5,864	3,257	1,698	0,933	0,485	0,694
495	0	0	0,743	0,743	0,740	0,743	0,571	0,743	0,743	0,571
496	0	0	0,169	0,000	0,000	0,000	0,169	0,000	0,000	0,169
497	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
498	500	0	2,634	0,000	0,000	0,000	1,512	2,634	2,195	1,059
499	19.000	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabella 3.3 - Modello di ottimizzazione statico - Grandezze caratteristiche della soluzione di lungo termine per il sistema Abruzzo Sud-Molise

	Milioni di lire	Milioni di mc/anno	Milioni di kwh	Ettari	Unità lavorative
Funzione obiettivo	- 483.419				
Costo invasi-traverse	280.264				
Costo adduzioni	383.408				
Costo reti irrigue	621.589				
Costo impianti di sollevamento	76.120				
Costo totale attualizzato	1.361.380				
Acqua per usi industriali		207,300			
Acqua per usi irrigui		285,896			
Produzione energetica			331,674		
Superficie irrigata				71.038	
Occupazione agricola stabile potenziale					24.153
Occupazione industriale potenziale					55.411

ma, anche usando solo tale modello, consiste nel considerarne le soluzioni per diversi traguardi temporali: si costruiscono, cioè, gruppi di utenze ammissibili per i vari traguardi e, per ognuno di essi, si calcola la corrispondente soluzione statica. Riconsiderando, quindi, «a posteriori», l'insieme di tali soluzioni se ne ricerca una soluzione involuppo, che, cioè, nella sua evoluzione nel tempo, sia il più possibile vicina - per ogni traguardo temporale considerato - alle soluzioni ottenute: tale soluzione dovrà naturalmente essere coerente temporalmente (una diga non potrà essere realizzata in un periodo e poi abbandonata nel periodo successivo,...).

Un altro metodo è stato già illustrato nel secondo capitolo e fa ricorso ad un vero e proprio modello intertemporale, anche se utilizzato parzialmente (modello statico di lungo periodo + modello intertemporale usato per lo scaglionamento nel tempo delle opere).

Utilizzando l'approccio del modello intertemporale si è anche adottata la formulazione di un modello intertemporale globale (cfr. 11) ma con struttura vincolare estremamente semplificata. Le ragioni per una tale semplificazione risiedono nella grande complessità di un modello intertemporale, così come è stato sviluppato qualitativamente nel secondo capitolo e, quindi, nelle difficoltà pratiche della sua elaborazione.

Si è tentato, in particolare, di semplificare al massimo la formulazione analitica delle relazioni di continuità dei flussi idraulici tra gli elementi del sistema (opere e usi); vengono considerati, infatti, flussi annuali (e non mensili o stagionali), utilizzando prefissati legami funzionali per accordare il valore di tali flussi (indeterminati a priori, eccetto che per volumi idrologici annuali) con le dimensioni (anch'esse indeterminate) delle opere idrauliche.

Consideriamo ora in dettaglio la struttura del modello intertemporale che ne risulta.

Si parlerà ancora di benefici e costi indipendentemente dal loro contenuto specifico. Ad esempio, i coefficienti di beneficio potranno esprimere valori aggiunti unitari, oppure quantità equivalenti in termini monetari di incrementi di occupazione, o, ancora, una somma pesata di tali grandezze. Le costanti sono indicate ancora con una sottolineatura; gli altri simboli rappresentano le incognite del problema. Così pure non sono esplicitate le espressioni contenenti il tasso di interesse con cui si attualizzano costi e benefici relativi a tempi diversi; il loro contenuto è implicitamente considerato nei coefficienti utilizzati per tempi diversi.

Naturalmente, vale ancora la schematizzazione di base adottata per il modello statico, mentre le relazioni strutturali precedentemente scritte – con l'eccezione dei legami di continuità a livello mensile o stagionale – continuano a restare valide. Per maggiore chiarezza saranno comunque di nuovo esplicitate.

3.2.1. Funzione obiettivo

L'obiettivo che si intende raggiungere con una programmazione intertemporale di sistemi idrici complessi è quello di massimizzare la differenza tra i benefici prodotti e il costo di realizzazione e gestione delle opere, per assegnate disponibilità finanziarie.

L'utenza è suddivisa in agricola, industriale e potabile; siano rispettivamente $BA_{n,t}$, $BI_{n,t}$, $BP_{n,t}$ i benefici unitari medi attualizzati nel nodo n , dal periodo t a tutta la vita prevista delle opere, indicati con $UA_{n,t}$, $UI_{n,t}$ e $UP_{n,t}$ i corrispondenti volumi utilizzati, risulta che il beneficio totale è dato da:

$$\begin{aligned} \text{BENU} = & \sum_{n=1}^{NN} \sum_{t=1}^{NT} (UA_{n,t} - UA_{n,t-1}) BA_{n,t} + \\ & + (UI_{n,t} - UI_{n,t-1}) BI_{n,t} + (UP_{n,t} - UP_{n,t-1}) BP_{n,t} \end{aligned} \quad [16]$$

essendo NN il numero dei nodi del sistema, NT il numero dei periodi considerati, quando $t=1$ risulta

$$UA_{n,t-1} = UI_{n,t-1} = UP_{n,t-1} = 0$$

I costi, COSTT , delle opere di trasporto possono considerarsi funzioni lineari del volume $VA_{i,t}$ trasferito dalla risorsa alla utilizzazione; indichiamo $VX_{i,t}$ una variabile ausiliaria che assume il valore $VA_{i,t}$ nel periodo in cui l'opera è realizzata e il valore zero negli altri periodi in cui rimane costante la portata in transito (1); ne risulta

$$\text{COSTT} = \sum_{i=1}^{NR} \sum_{t=1}^{NT} VX_{i,t} \cdot WL_i \cdot WC_t \quad [17]$$

$$VA_{i,t} = \sum_{\tau=TR_i}^{NT} VX_{i,t} \quad [18]$$

essendo NR il numero degli archi del sistema:

WL_i = la lunghezza dello i -esimo arco

WC_t = il costo unitario nel periodo t

TR_i = il periodo a partire dal quale la condotta può essere realizzata.

Per le condotte già realizzate o per gli archi che schematizzano tratti di alveo il costo del collegamento va considerato nullo. Anche il costo degli invasi, COSTI , è supposto essere funzione lineare del volume regolato dall'invaso $VV_{n,t}$ dal suo valore minimo WA_n al suo valore massimo WB_n (come già visto in fig. 3.c). Sia $BB_{n,t}$ una variabile *booleana* che assume valore unitario nel periodo in cui l'invaso deve essere realizzato e $VZ_{n,t}$ una variabile ausiliaria che assume valore diverso da zero e pari a $VV_{n,t}$ solo se $BB_{n,t} = 1$, risulta:

$$VZ_{n,t} \geq BB_{n,t} \cdot WA_n \quad [19]$$

$$VZ_{n,t} \leq BB_{n,t} \cdot WB_n \quad [20]$$

$$VV_{n,t} = \sum_{\tau=TN_n}^{NT} VZ_{n,t} \quad [21]$$

$$\text{COSTI} = \sum_{n=1}^{NN} \sum_{t=1}^{NT} (BB_{n,t} \cdot WC_n + VZ_{n,t} \cdot WD_n) \quad [22]$$

con TN_n il periodo a partire dal quale l'opera può essere realizzata.

(1) Le opere di trasporto possono essere realizzate in modo articolato nel tempo (raddoppi, interconnessioni).

I valori dei costi unitari \underline{WD}_n e del costo iniziale \underline{WC}_n è diverso da zero solo per quei nodi ove sono localizzati gli invasi. Le traverse sono trattate come invasi di capacità nulla e quindi con un costo indipendente dalle quantità derivabili. Analoghe ipotesi vengono assunte per le prese sorgentizie e per gli altri tipi di captazione. Il costo del trattamento delle acque reflue da riutilizzare è anch'esso riconducibile ad una funzione lineare della quantità d'acqua trattata e del costo specifico del trattamento.

Il costo associato ad eventuali impianti di sollevamento (COSTS) può considerarsi funzione lineare della quantità di fluido che transita nel ramo in cui tale impianto è previsto e della prevalenza \underline{WP}_i

$$\text{COSTS} = \sum_{i=1}^{\text{NR}} \sum_{t=1}^{\text{NT}} \text{VX}_{i,t} \cdot \underline{WP}_i \cdot \underline{WH}_t \quad [23]$$

\underline{WH}_t rappresenta il costo complessivo (costo impegno di potenza e di energia capitalizzati e di realizzazione della centrale) per unità di volume e di prevalenza.

Nei rami in cui, invece, è previsto lo sfruttamento ai fini della produzione di energia elettrica di un salto \underline{WP}^* il beneficio prodotto risulta:

$$\text{BENI} = \sum_{i=1}^{\text{NR}} \sum_{t=1}^{\text{NT}} \text{VX}_{i,t} \cdot \underline{WP}_i^* \cdot \underline{WH}_t^* \quad [24]$$

\underline{WH}_t^* è il beneficio unitario attualizzato a cui è detratto il costo dell'impianto.

In definitiva, la funzione obiettivo che si intende massimizzare è data da:

$$\text{O.F.} = \text{BENU} + \text{BENI} - \text{COSTT} - \text{COSTI} - \text{COSTS} \quad [25]$$

3.2.2. Equazioni di vincolo

Un primo vincolo cui sono soggette le variabili di controllo è di natura economica sulla risorsa finanziaria \underline{WK}_t che si rende disponibile fino al periodo t ; in base a quanto definito nel precedente paragrafo risulta:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{\text{NR}} \sum_{k=1}^t \text{VX}_{i,k} \underline{WL}_i \underline{WC}_k + \\ & + \sum_{n=1}^{\text{NN}} \sum_{k=1}^t (\text{BB}_{n,k} \underline{WC}_n + \text{VZ}_{n,k} \underline{WD}_n) + \\ & + \sum_{i=1}^{\text{NR}} \sum_{k=1}^t \text{VX}_{i,k} \underline{WP}_i \underline{CH}_k + \\ & + \sum_{i=1}^{\text{NR}} \sum_{k=1}^t \text{VX}_{i,k} \underline{WP}_i^* \underline{CH}_k^* \leq \underline{WK}_t \end{aligned} \quad [26]$$

i quattro gruppi di sommatorie sono relativi rispettivamente al costo delle condotte, degli invasi, degli impianti di sollevamento e delle centrali idroelettriche, ove \underline{CH}_k e \underline{CH}_k^* sono pari al costo di realizzazione delle centrali di sollevamento e di produzione di energia elettrica.

Per ogni nodo n del sistema va scritta l'equazione di continuità delle risorse disponibili:

$$\sum_{i=1}^{\text{NF}_n} \text{VA}_{i,t} - \sum_{i=1}^{\text{NI}_n} \text{VA}_{i,t} - \text{UA}_{n,t} - \text{UI}_{n,t} + \text{UP}_{n,t} + \text{VV}_{n,t} = 0 \quad [27]$$

NF_n e NI_n rappresentano rispettivamente il numero degli archi che hanno il nodo n rispettivamente come nodo finale o come nodo iniziale.

Ciascuna utenza sarà limitata superiormente ed inferiormente

$$\underline{EA}_{n,t} \leq UA_{n,t} \leq \overline{FA}_{n,t} \quad [28]$$

$$\underline{EI}_{n,t} \leq UI_{n,t} \leq \overline{FI}_{n,t} \quad [29]$$

$$\underline{EP}_{n,t} \leq UP_{n,t} \leq \overline{FP}_{n,t} \quad [30]$$

Per l'utenza agricola il limite superiore è legato alle dimensioni del comprensorio da irrigare, il limite inferiore alle dimensioni delle zone già irrigate o in via di irrigazione. Per la utenza industriale i limiti [29] sono legati ai piani di sviluppo, alla possibilità e al costo del riciclaggio nelle industrie previste. Per l'utenza potabile i limiti di oscillazione sono solitamente molto limitati e spesso coincidono; in tale situazione l'utenza potabile risulta imposta e viene, quindi, a cadere la necessità di una difficile valutazione dei benefici ad essa collegati.

Per ogni nodo per il quale è prevista la possibilità di un invaso o di una traversa va imposto

$$\frac{NT}{TN_n} \sum_t BB_{n,t} \leq 1 \quad [31]$$

ovvero l'opera può essere realizzata in un periodo successivo a TN_n solo nel caso in cui la sommatoria a primo membro sia uguale a 1.

3.2.3. Un'applicazione: il sistema Abruzzo Sud-Molise

Il modello intertemporale descritto è stato utilizzato per l'analisi di alcuni sistemi idrici principali in cui si è suddiviso il territorio allo studio (vedi fig. 2.2). Nella fig. 3.2 si è già mostrata una delle zone esaminate, quella dell'Abruzzo Sud e del Molise. Il sistema idrico corrispondente è schematizzato per le analisi condotte con il modello intertemporale (fig. 3.4) mediante 43 archi e 39 nodi, per circa 10 invasi (1 già esistente) e 3 traverse (2 già esistenti).

L'analisi è stata condotta su tre periodi di realizzazione, corrispondentemente a breve, medio e lungo termine; i risultati ottenuti sono illustrati nelle figure 3.5, 3.6 e 3.7. I dati di base sono stati valutati con semplici analisi preliminari e l'analisi della soluzione ne mostra già chiaramente la consistenza.

3.2.4. Limiti del modello

Il principale limite del modello utilizzato è costituito da quella che è anche la sua caratteristica fondamentale: cioè dalla estrema semplificazione delle relazioni di continuità nei flussi idrici.

In particolare, nel modello non sono introdotti esplicitamente gli elementi necessari affinché le soluzioni che ne emergono siano coerenti con una strategia ottimale di accumulazione, regolazione e adduzione delle risorse, che – basata sulle irregolarità nella disponibilità di risorse nell'arco dell'anno – sia ricercata all'interno del modello simultaneamente alle decisioni di sviluppo intertemporale.

L'uso del modello è allora possibile solo in relazione alla fondatezza di ipotesi da adottare, in particolare:

- sulla composizione dei flussi per tipo di utenza per ogni singola adduzione; la differenza nei diagrammi di utenza è infatti determinante per fissare il valore del parametro di costo unitario WC , in modo da tradurre con esso adeguatamente gli effetti del volume globale annuo addotto sulla portata massima istantanea e, quindi, sul costo effettivo dell'adduzione;
- sulle caratteristiche di regolazione di ciascun invaso e sulle relazioni tra disponibilità di risorsa, diagrammi di utenza e capacità annua modulabile VV_n e, quindi, tra queste e la dimensione dell'invaso, da cui esprimere, infine, il costo in funzione di VV_n mediante il parametro WD .

Una volta ottenuta la soluzione del modello, occorrerà confrontare i valori in essa contenuti con le ipotesi implicitamente adottate nella determinazione dei parametri di costo unitario e le disponibilità di risorse idriche. Solo se tali valori risulteranno conformi alle ipotesi, si potrà essere certi della fondatezza della soluzione.

Figura 3.4 - Schema logico del sistema idrico Abruzzo Sud-Molise utilizzato per le analisi con il modello intertemporale.

50

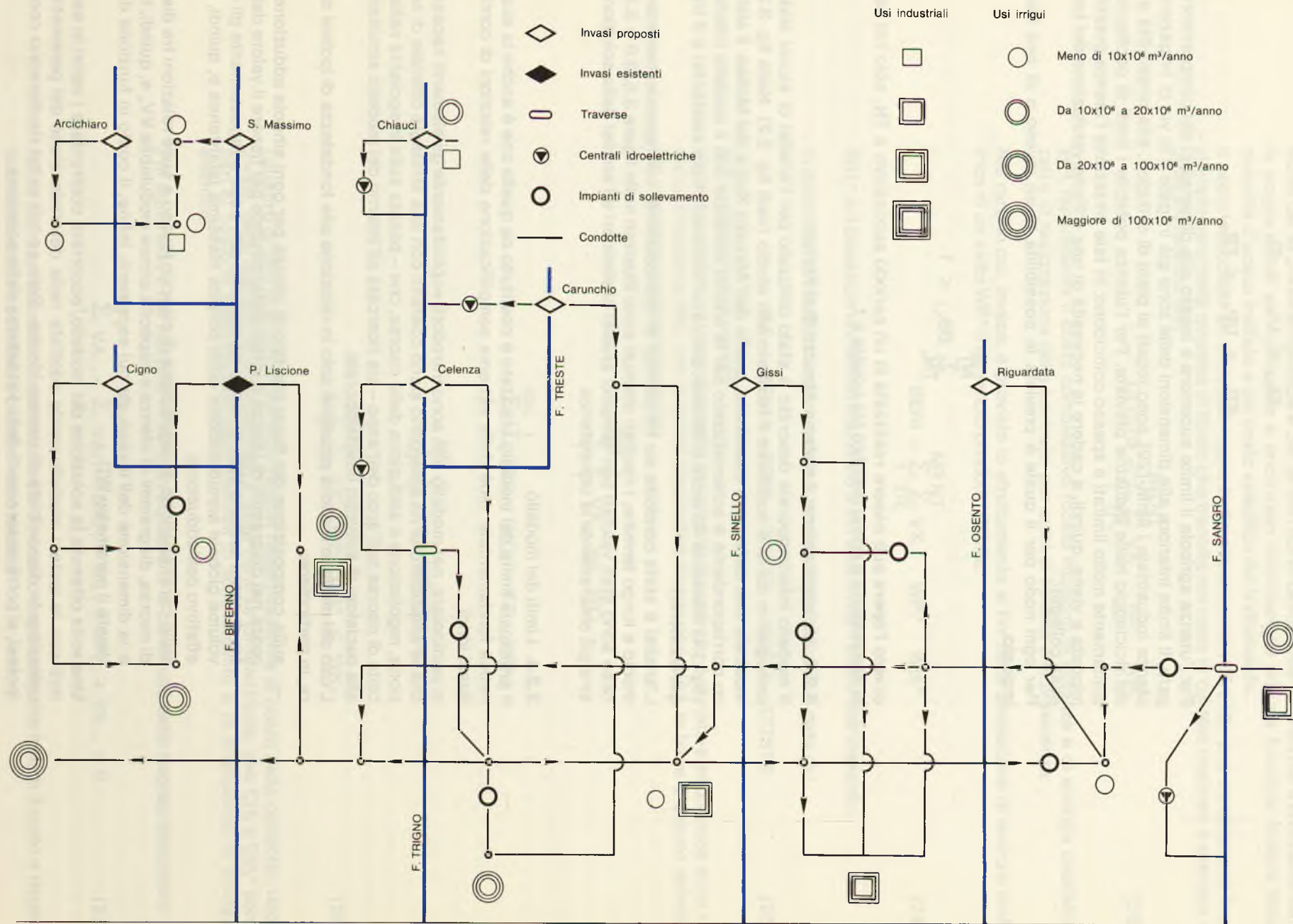


Figura 3.5 - Modello intertemporale sistema Abruzzo Sud-Molise: soluzione ottimale ottenuta per la prima fase.

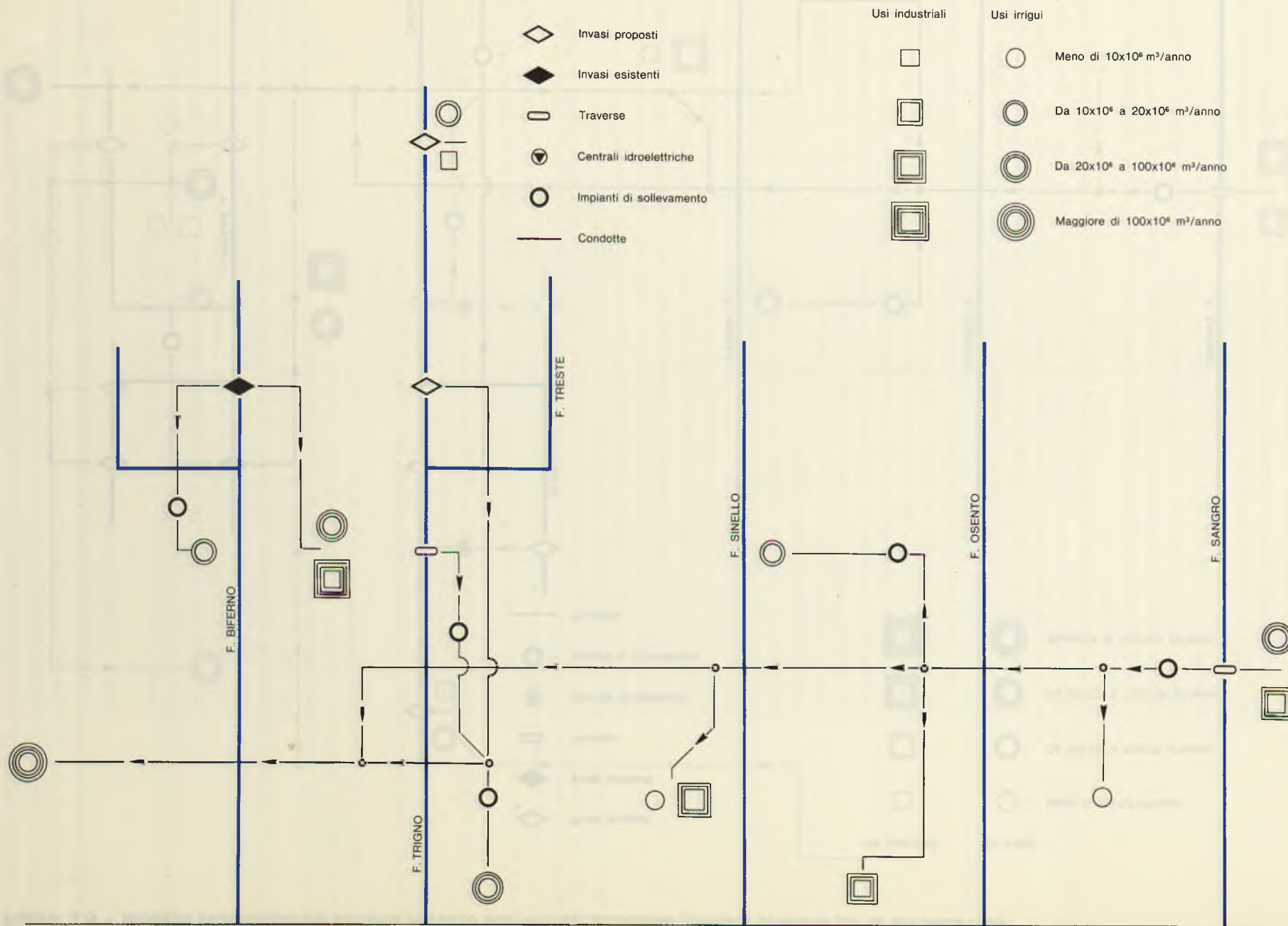


Figura 3.6 - Modello intertemporale sistema Abruzzo Sud-Molise: soluzione ottimale ottenuta per la seconda fase.

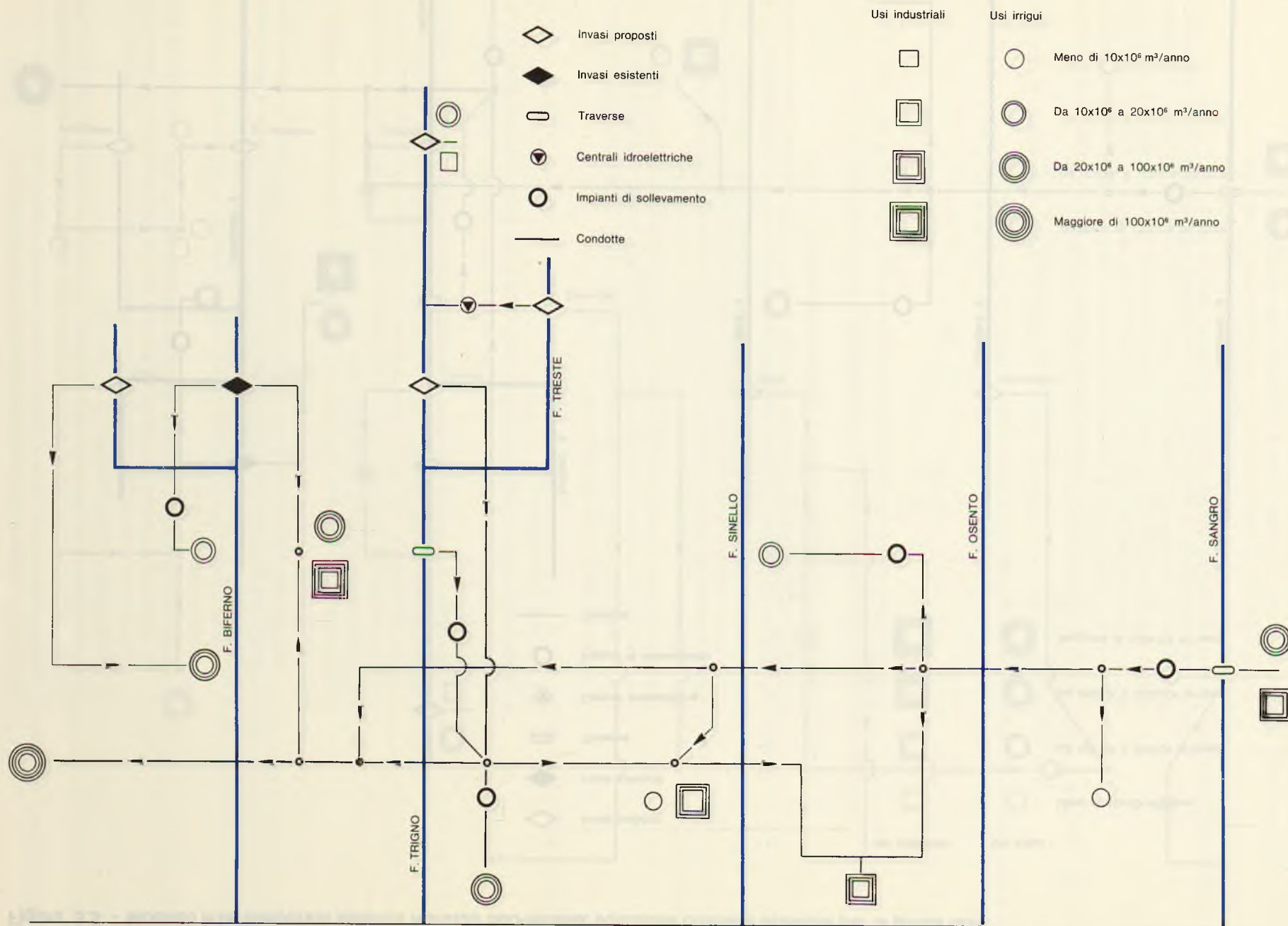
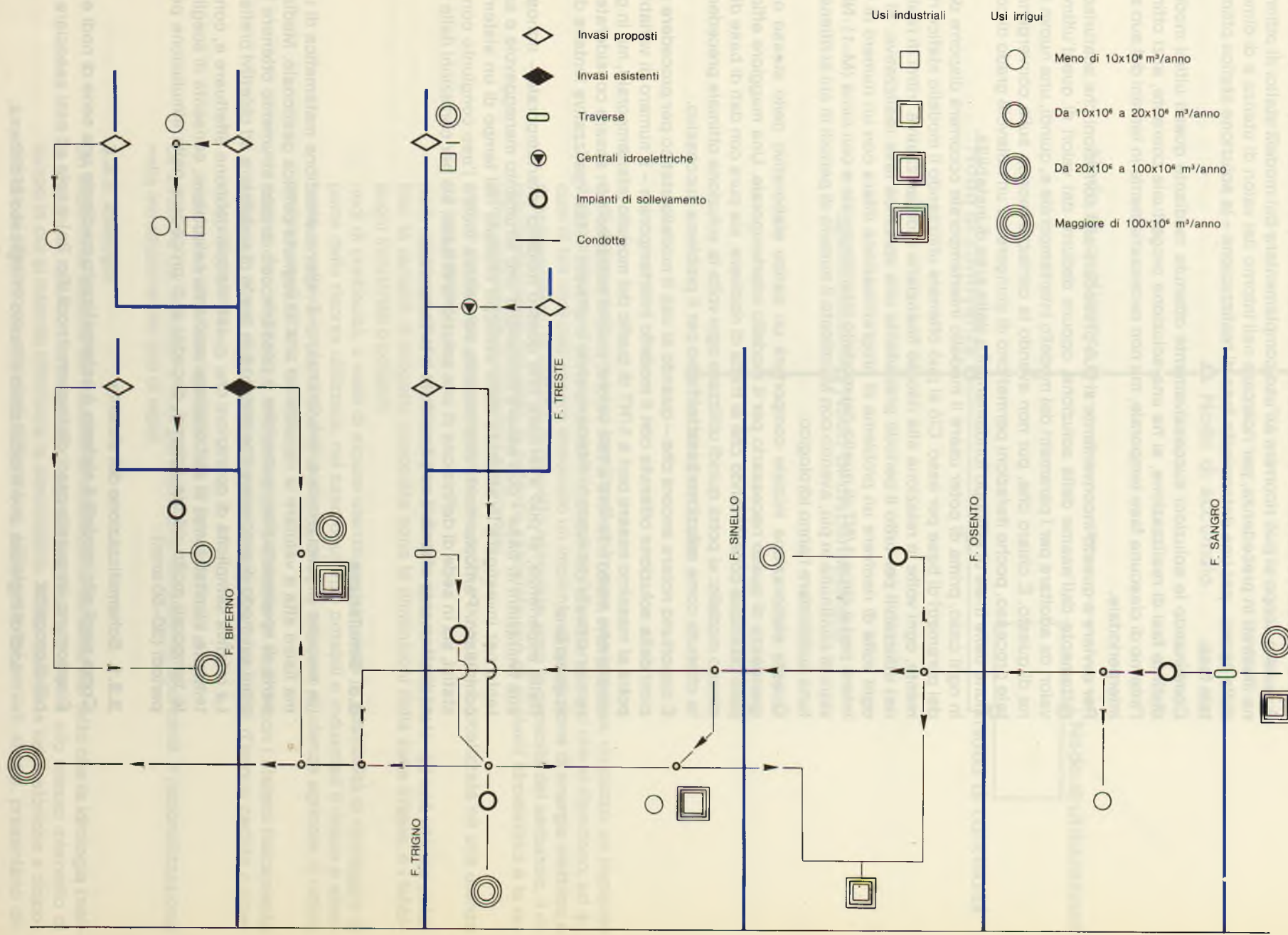


Figura 3.7 - Modello intertemporale sistema Abruzzo Sud-Molise: soluzione ottimale ottenuta per la terza fase.



È da sottolineare che spesso non tutta la soluzione si rivelerà consistente: potranno, però, avere un senso dei sottoinsiemi di soluzione e dal loro esame si potranno avere già indicazioni sulla «vera» soluzione globale. Si potrà quindi procedere – con accorgimenti diversi a seconda dei casi – a correzioni nei dati e a nuove soluzioni più accurate.

A questo scopo si può ricorrere all'uso complementare dei modelli statici di ottimizzazione illustrati in precedenza, per ricercare nell'intorno dei valori di utenza e di dimensione delle opere – per una determinata fase di realizzazione – la soluzione statica ottimale per tale fase.

Combinando le soluzioni successivamente ottenute mediante questi ultimi modelli, alle distinte fasi di realizzazione, si ha una soluzione progettuale coerente, anzi ottimale all'interno di ciascuna fase temporale, ma non necessariamente in termini del suo sviluppo interperiodale.

Per ovviare a questo inconveniente si può procedere alle correzioni che scaturiscono direttamente dall'esame della soluzione, oppure dedurre dai valori di quest'ultima nuovi valori da adottare per i parametri del modello intertemporale e, quindi, una nuova soluzione di questo. È chiaro che, pur non avendo la certezza teorica sulla convergenza di un tale processo, poche iterazioni permettono di giungere ad un notevole grado di comprensione delle linee di sviluppo fondamentali o delle aree di instabilità.

In ogni caso, prima di poter usare il modello intertemporale occorrerà disporre dei valori dei parametri di base per esso. Ciò si può ottenere utilizzando il modello statico ripetutamente, ogni volta in relazione alle risorse finanziarie e organizzative (ritmi di realizzazione) utilizzabili per tutto il periodo precedente una specifica fase realizzativa. Si tratterà ogni volta di risolvere un problema di programmazione intera con un numero di variabili intere pari a circa $1/NT$ di quello del modello intertemporale e con circa $(M-1) \cdot NN$ equazioni di continuità in più, avendo con M indicato il numero di periodi in cui si ritiene opportuno suddividere l'anno idrologico.

Questa elaborazione iniziale comporterà un carico elaborativo dello stesso ordine di grandezza di quello necessario per il modello intertemporale. Una maggiore efficienza è però ottenibile considerando che si tratta di risolvere, sia pure con dati di base diversi, lo stesso modello: si potrà quindi utilizzare ogni volta la soluzione ottimale precedentemente ottenuta come soluzione base tentativo per il problema successivo.

È opportuno notare ancora che – quando si usa il modello statico per procedere a correzioni della soluzione ottenuta con il modello intertemporale – il numero di variabili intere potrà al massimo essere pari a $1/NT$ di quello del modello intertemporale, ma in generale sarà anche molto inferiore a tale valore, poiché potranno non essere considerate le opere non attivate dal modello intertemporale o attivate in fasi realizzative lontane da quella in questione.

Dalle esperienze, si può affermare che questo modello intertemporale – nonostante le sue limitazioni di base – può essere comunque uno strumento maneggevole e assai potente per investigare la struttura dello sviluppo ottimale nel tempo di un sistema idrico complesso. Particolarmente interessante ne sembra inoltre l'uso congiunto con modelli statici, sia in sede di definizione di una soluzione di base, sia per correzioni delle soluzioni direttamente ottenibili con il modello intertemporale.

3.3. Simulazione

Un modello di simulazione è, in sostanza, una rappresentazione matematica di un sistema fisico atta a valutare la risposta ad una assegnata politica gestionale. Mediante una serie di sperimentazioni numeriche è possibile con questo strumento ottenere informazioni sul modo di procedere che meglio è in grado di soddisfare ad obiettivi prefissati.

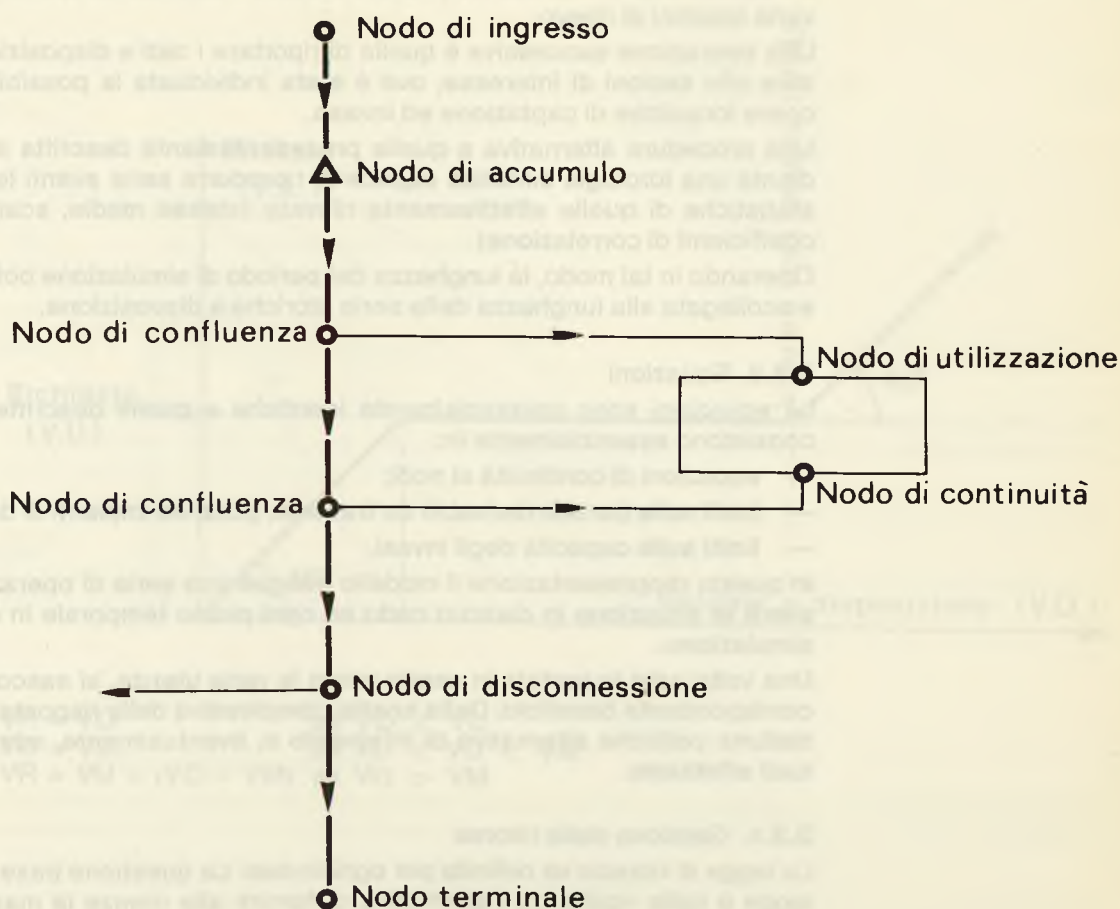
La relativa semplicità di operazioni che questi modelli debbono effettuare e, conseguentemente, i limitati tempi di elaborazione mediante calcolatore, consente di scegliere scale temporali molto ridotte (giorno, decade) e di procedere nella simulazione per lunghi periodi (30-50 anni).

3.3.1. Schematizzazione del sistema

Come negli altri modelli il sistema è schematizzato mediante una serie di nodi e di archi. È opportuno, in questo caso, distinguere i nodi (fig. 3e) e solo ad essi associare le variabili di progetto:

— nodi di ingresso, ove è localizzato il flusso in ingresso al sistema;

Figura 3.e



- nodi di accumulo, ove sono localizzati un invaso, una traversa, un pozzo, un impianto di depurazione ed in cui è possibile regolare il flusso nei rami che si dipartono; ad alcuni di tali nodi può essere associato un impianto di produzione di energia elettrica o di sollevamento; le variabili di progetto associate sono la capacità del serbatoio, il rilascio stagionale richiesto, la potenza associata con gli impianti idroelettrici e la relativa produzione (o consumo) stagionale;
- nodi di confluenza, ove convergono più archi e dove non è localizzata né una utenza né una risorsa;
- nodi di utenza, ove è localizzata una zona irrigua, o industriale, od una utenza potabile; le variabili di progetto associate sono le dimensioni della zona irrigua, o i fabbisogni industriali o potabili;
- nodi di continuità, a valle di alcune utenze per simulare la possibilità di riciclaggio di parte della risorsa utilizzata; nel caso di utenze potabili e industriali il riciclo è effettuato a valle di impianti di depurazione, mentre nel caso di utenze agricole, il riciclo avviene per il ritorno in falda;
- nodi di disconnessione che collegano il sistema in esame con i sistemi fisicamente adiacenti; in tali nodi debbono essere assegnate le quantità d'acqua cedute o ricevute dal sistema;
- nodi terminali a valle dei quali non vi sono altri rami o nodi.

La struttura del modello a nodi permette una consistente economia e razionalizzazione nella introduzione dei dati di input.

3.3.2. Idrologia

Un importante aspetto del modello di simulazione consiste nel fatto che la idrologia (nelle sezioni di misura) deve essere di eguale lunghezza e riferita allo stesso intervallo di tempo in cui si intende effettuare la simulazione. Molto spesso le serie storiche a disposizione si riferiscono a periodi differenti e, all'interno dei periodi stessi, presentano di-

scontinuità consistenti. La prima operazione consiste, quindi, nel rendere omogenei i dati a disposizione, completando le serie carenti e utilizzando le correlazioni esistenti tra le varie stazioni di rilievo.

Una operazione successiva è quella di riportare i dati a disposizione dalle sezioni di misura alle sezioni di interesse, ove è stata individuata la possibilità di ubicazione delle opere idrauliche di captazione ed invaso.

Una procedura alternativa a quella precedentemente descritta è quella di operare mediante una idrologia sintetica capace di riprodurre serie aventi le stesse caratteristiche statistiche di quelle effettivamente rilevate (stesse medie, scarto quadratico medio e coefficienti di correlazione).

Operando in tal modo, la lunghezza del periodo di simulazione potrebbe essere arbitraria e scollegata alla lunghezza delle serie storiche a disposizione.

3.3.3. Equazioni

Le equazioni sono sostanzialmente identiche a quelle descritte nel modello statico e consistono essenzialmente in:

- equazioni di continuità ai nodi;
- limiti sulle portate derivabili da traverse, pozzi ed impianti di depurazione;
- limiti sulle capacità degli invasi.

In questa rappresentazione il modello esegue una serie di operazioni che permettono di avere la situazione in ciascun nodo ad ogni passo temporale in cui è stata articolata la simulazione.

Una volta note le portate in uscita verso le varie utenze, si associa a ciascuna di esse il corrispondente beneficio. Dalla analisi complessiva della risposta del sistema è possibile dedurre politiche alternative di intervento e, eventualmente, adeguare le scelte progettuali effettuate.

3.3.4. Gestione delle risorse

La legge di rilascio va definita per ogni invaso. La questione base nella definizione di tale legge è nella scelta tra l'alternativa di fornire alle utenze la massima quantità d'acqua (politica di tipo A) e l'alternativa di procedere, in certe situazioni, ad una parzializzazione in modo da ridurre future potenziali carenze (politica di tipo B).

Il primo modo di operare (*Standard operation rule*) consiste nel rilasciare la quantità richiesta se disponibile, o in alternativa l'acqua rinvasata (fig. 3.f).

Nel secondo modo di operare (*Final storage rule*) il rilascio va calibrato, periodo per periodo, a seconda della quantità invasata (fig. 3.g).

I valori dei parametri VX_i e VY_i possono essere determinati sulla base di ripetute sperimentazioni numeriche, scegliendo quella politica di gestione che meglio risponde all'obiettivo che si intende perseguire.

Il secondo modo di operare distribuisce al sistema una quantità d'acqua inferiore. Tuttavia, poiché il beneficio non è una funzione lineare della quantità complessivamente erogata, ma dipende dal periodo in cui la risorsa viene effettivamente utilizzata, il tipo di politica «*Final storage rule*» è il più delle volte consigliabile, se sorretto da una ripetuta analisi del sistema sulla base delle serie storiche a disposizione.

3.3.5. Comportamento dell'utenza

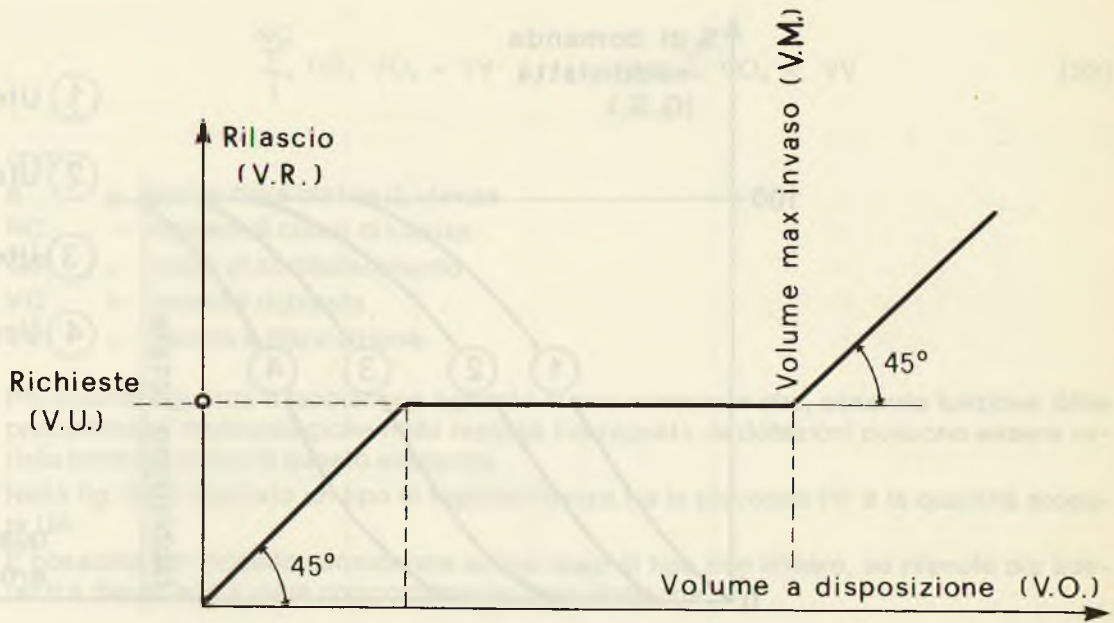
Tra le utenze del sistema va individuata una gerarchia nel soddisfacimento della domanda. Se la quantità d'acqua a disposizione è inferiore a quella necessaria per il soddisfacimento di tutte le classi di utenza, il grado di parzializzazione può essere differente classe per classe.

In fig. 3.h è riportato qualitativamente l'andamento del grado di soddisfacimento della domanda, supponendo di avere a che fare con quattro classi di utenza:

- utenza potabile che va prioritariamente soddisfatta;
- utenza industriale;
- utenza agricola di tipo A, con esigenze prioritarie rispetto a quella di tipo B;
- utenza agricola di tipo B.

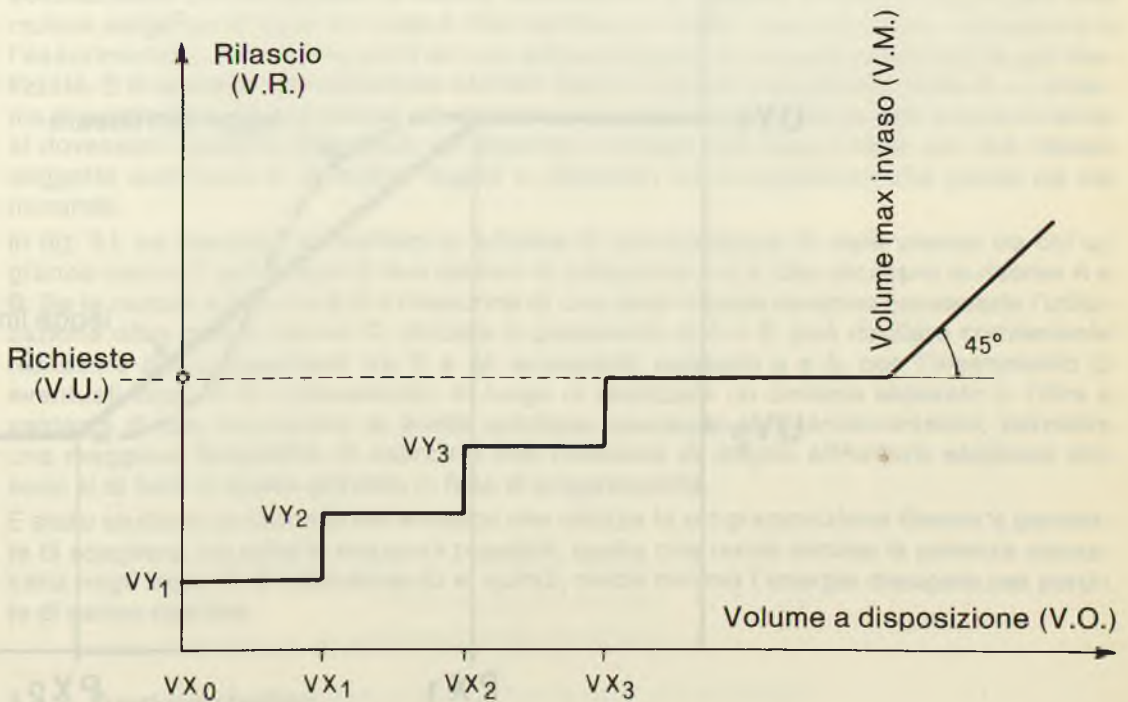
I diagrammi di fig. 3.h sono in generale differenti da periodo a periodo; una classe di utenza, che risulta prioritaria nell'ordine gerarchico stabilito in un determinato periodo, potrebbe non esserlo in un altro.

Figura 3.f



$$\begin{aligned}
 VR &= VO && \text{se } VO < VU \\
 VR &= VU && \text{se } VU < VO < VM \\
 VR &= VU + (VO - VM) && \text{se } VO > VM
 \end{aligned}$$

Figura 3.g



$$\begin{aligned}
 VR &= VY_i && \text{se } VX_{i-1} < VO < VX_i && i = 1 \dots n-1 \\
 VR &= VU && \text{se } VX_n < VO < VM \\
 VR &= VU + (VO - VM) && \text{se } VO > VM
 \end{aligned}$$

Figura 3.h

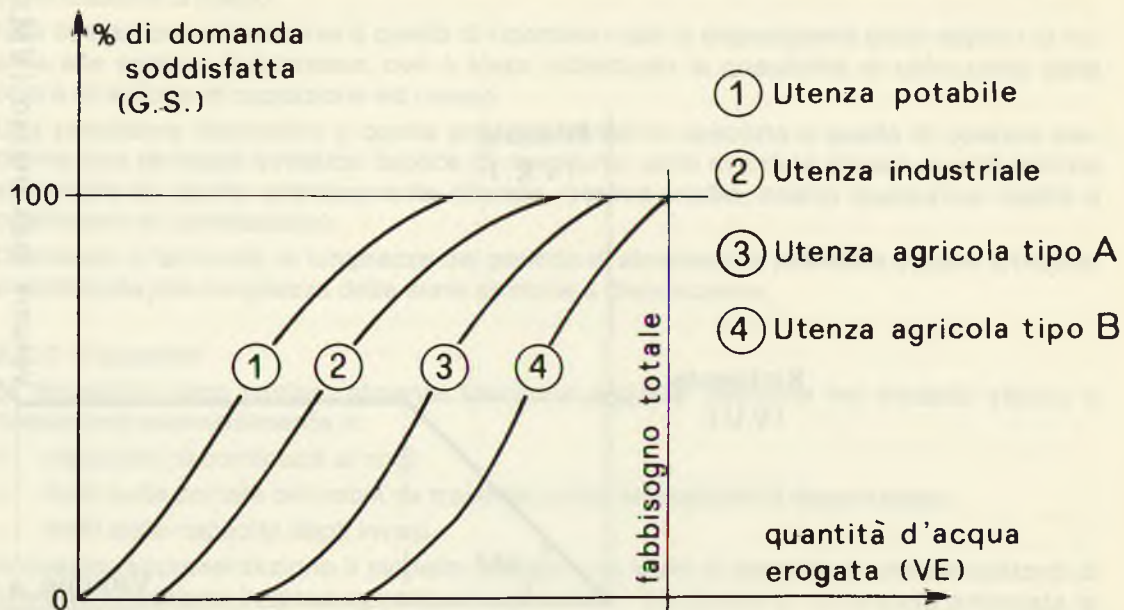
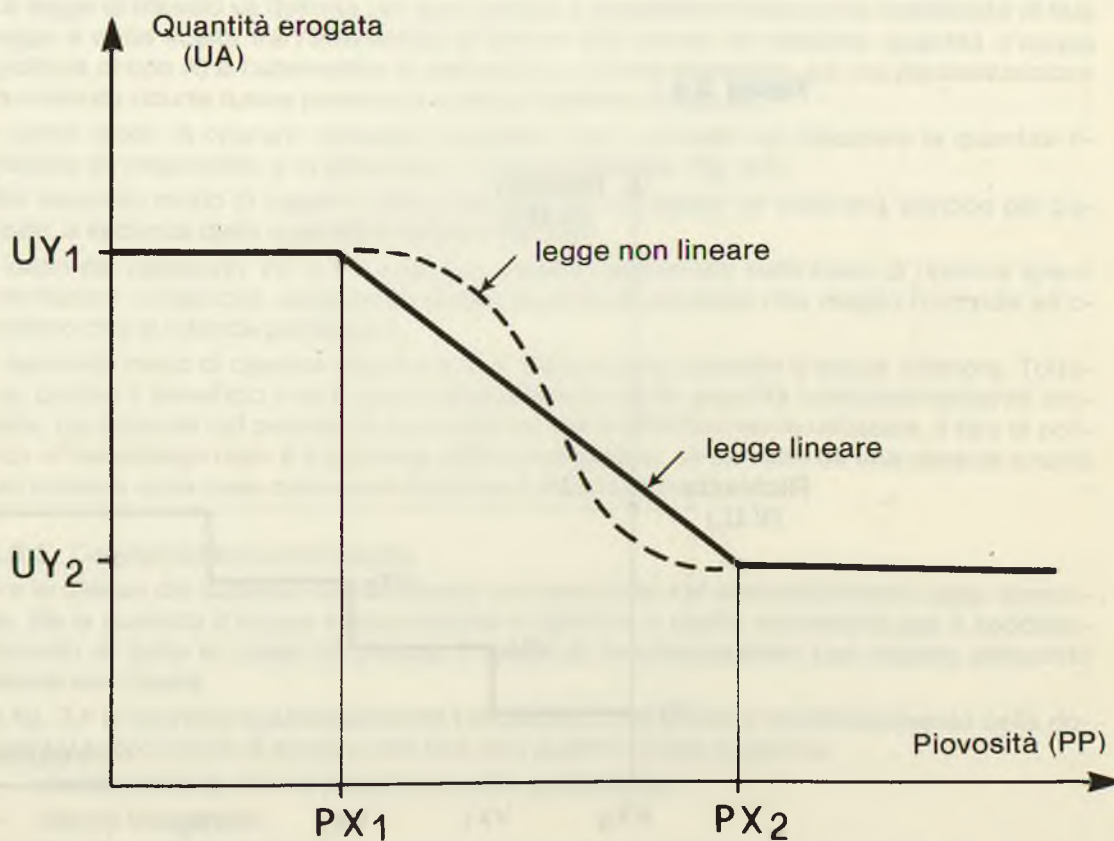


Figura 3.i



$$\begin{aligned}
 UA &= AA - BB \cdot PP \\
 UA &= UY_1 \\
 UA &= UY_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{se } PX_1 \leq PP \leq PX_2 \\
 &\text{se } PP < PX_1 \\
 &\text{se } PP > PX_2
 \end{aligned}$$

Per ciascun periodo i diagrammi debbono essere costruiti in modo da soddisfare la seguente relazione:

$$\sum_{e=1}^{NC} GS_e VO_e = VV \quad \text{per } \sum VO_e < VV \quad [32]$$

con:

- e = indice della classe di utenza
- NC = numero di classi di utenza
- GS = grado di soddisfacimento
- VO = quantità richiesta
- VV = volume a disposizione.

Per quanto riguarda il fabbisogno agricolo si può osservare che, essendo funzione delle precipitazioni meteorologiche nella regione interessata, le dotazioni possono essere variate tenendo conto di questo elemento.

Nella fig. 3.i è illustrato un tipo di legame lineare tra la piovosità PP e la quantità erogata UA.

È possibile nel modello considerare anche leggi di tipo non lineare, se ritenute più aderenti a descrivere il reale comportamento della domanda.

3.4. Dimensionamento di uno schema acquedottistico

3.4.1. Caratteristiche generali

Il modello qui considerato fa riferimento alla particolare situazione realizzativa ed amministrativa degli schemi acquedottistici potabili per lo più già realizzati secondo le previsioni del vigente piano regolatore generale degli acquedotti (P.R.G.A.).

Gli schemi di alimentazione idrica potabile sono stati molto spesso studiati senza tener presente la possibilità di interconnessione che rende il sistema più flessibile in relazione all'andamento delle domande. Collegamenti di più schemi, con inserimento di impianti di sollevamento o di dissipatori di carico, permettono al sistema di meglio rispondere alle mutate esigenze di input ed output. Può verificarsi, infatti, che una errata valutazione o l'esaurimento di una risorsa porti ad una sottoutilizzazione di opere di adduzione già realizzate. È in questo caso opportuno che tali opere vengano considerate parte di un sistema di acquedotti più complesso ed utilizzate per addurre altre risorse che eventualmente si dovessero rendere disponibili. Un discorso analogo può essere fatto per una utenza soggetta anch'essa a variazioni legate a parametri socio-economici che vanno via via mutando.

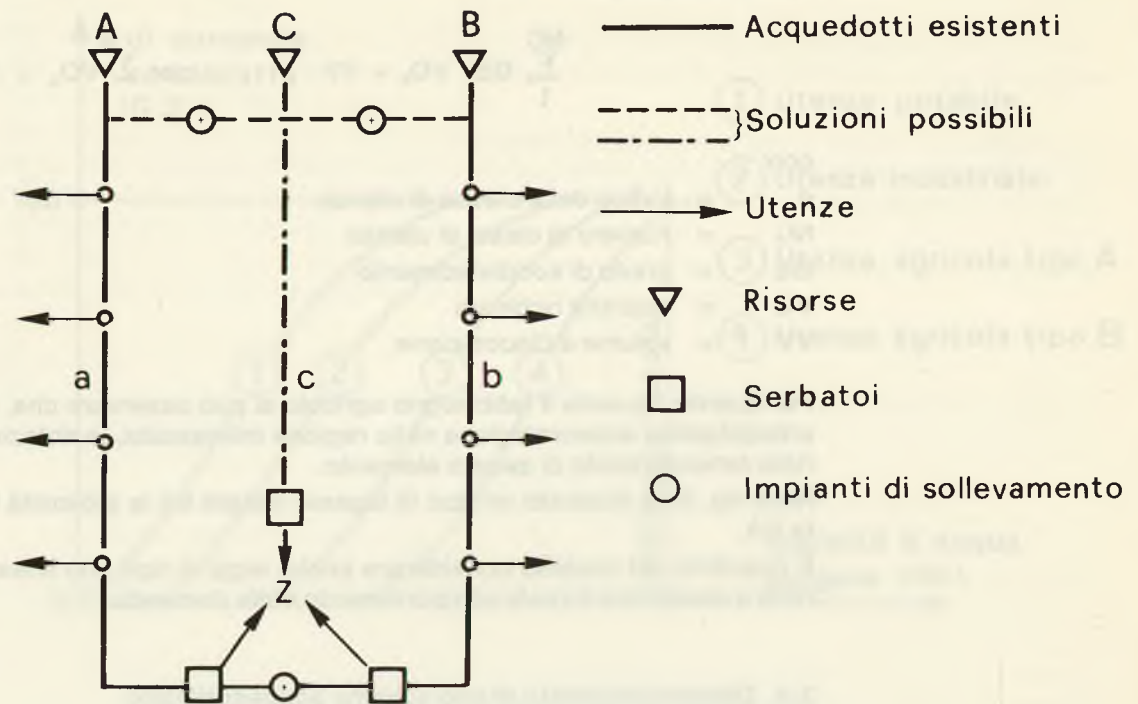
In fig. 3.i, ad esempio, è riportato lo schema di alimentazione di varie utenze tra cui un grande centro Z per mezzo di due sistemi di adduzione a e b, che sfruttano le risorse A e B. Se le mutate esigenze di Z o l'esaurirsi di una delle risorse rendono necessaria l'utilizzazione della nuova risorsa C, ubicata in prossimità di A e B, può risultare conveniente realizzare dei collegamenti tra C e gli acquedotti esistenti a e b, con l'inserimento di eventuali impianti di sollevamento, in luogo di realizzare un sistema separato c. Oltre a vantaggi di tipo economico la scelta adottata, operando le interconnessioni, permette una maggiore flessibilità di esercizio che consente di meglio affrontare esigenze che sono al di fuori di quelle previste in fase di progettazione.

È stato studiato un modello matematico che utilizza la programmazione lineare e permette di scegliere, tra tutte le soluzioni possibili, quella che rende minima la potenza necessaria negli impianti di sollevamento e, quindi, rende minima l'energia dissipata per perdite di carico ripartite.

3.4.2. Funzione obiettivo

La rete costituita dagli acquedotti esistenti e dalle possibili interconnessioni è, in generale, di tipo misto (a maglie ed aperta). Per ogni ramo i della rete va scelto un verso di percorrenza positivo, ad esempio quello che presumibilmente va dai nodi a quota più elevata a quelli di quota inferiore (fig. 3m). Prescindendo dalle perdite di carico localizzate vanno individuate le prevalenze H_i e i rami ove inserire eventuali impianti di sollevamento

Figura 3.I - Possibili collegamenti tra sistemi di alimentazione.



nel caso in cui l'acqua vada nel senso opposto a quello prescelto. La scelta dei versi positivi per gli archi della rete non è univoca, come non è univoca la scelta della posizione ove inserire i sollevamenti (figg. 3.m, 3.n), tuttavia (cfr. 12), tale scelta influisce solo sul valore della funzione obiettivo e non sulla distribuzione della portata all'interno del sistema. Ad esempio, si considerino due serbatoi collegati da una condotta con erogazioni in alcuni punti e si supponga che l'acqua fluisca dal serbatoio a quota più bassa a quello a quota più elevata (fig. 3.o). Se nei punti di erogazione non sono fissate delle quote piezometriche minime, la soluzione che rende minima la potenza da erogare è quella che prevede l'impianto di sollevamento il più vicino possibile al serbatoio posto a quota più elevata. Nel caso in cui siano, invece, fissate delle quote piezometriche minime nei punti di erogazione, per esempio crescenti nel verso della portata q , la soluzione che rende minima la potenza necessaria è quella che prevede un impianto per ogni ramo; tale soluzione, tuttavia, potrebbe sotto altri versi essere meno conveniente di quella con un unico impianto in prossimità del serbatoio a quota inferiore. Tutte le soluzioni esaminate, pur mutando la distribuzione delle quote piezometriche (quindi variando il valore assunto dalla funzione obiettivo) non influiscono sulla portata transitante.

Caratterizzate con i pedici 1 e 2 rispettivamente le portate positive e negative, per quei rami dove è previsto l'impianto la potenza necessaria per il sollevamento è data da:

$$H_i q_{2i}$$

e per tutti i rami le potenze dissipate per perdite di carico ripartite (cfr. 12) risultano da:

$$\gamma(D_i) l_i (q_{1i}^3 - q_{2i}^3)$$

con:

$\gamma(D_i)$ = perdite di carico per unità di lunghezza ed unità di portata

D_i = diametro della condotta

l_i = lunghezza della condotta.

Quindi la funzione obiettivo risulta essere:

$$FO = \sum_1^{NR} [H_i q_{2i} + \gamma(D_i) l_i (q_{1i}^3 + q_{2i}^3)] \quad [33]$$

con NR il numero complessivo dei rami della rete.

Figura 3.m - Possibile scelta di versi di percorrenza degli archi ed inserimento di impianti di sollevamento.

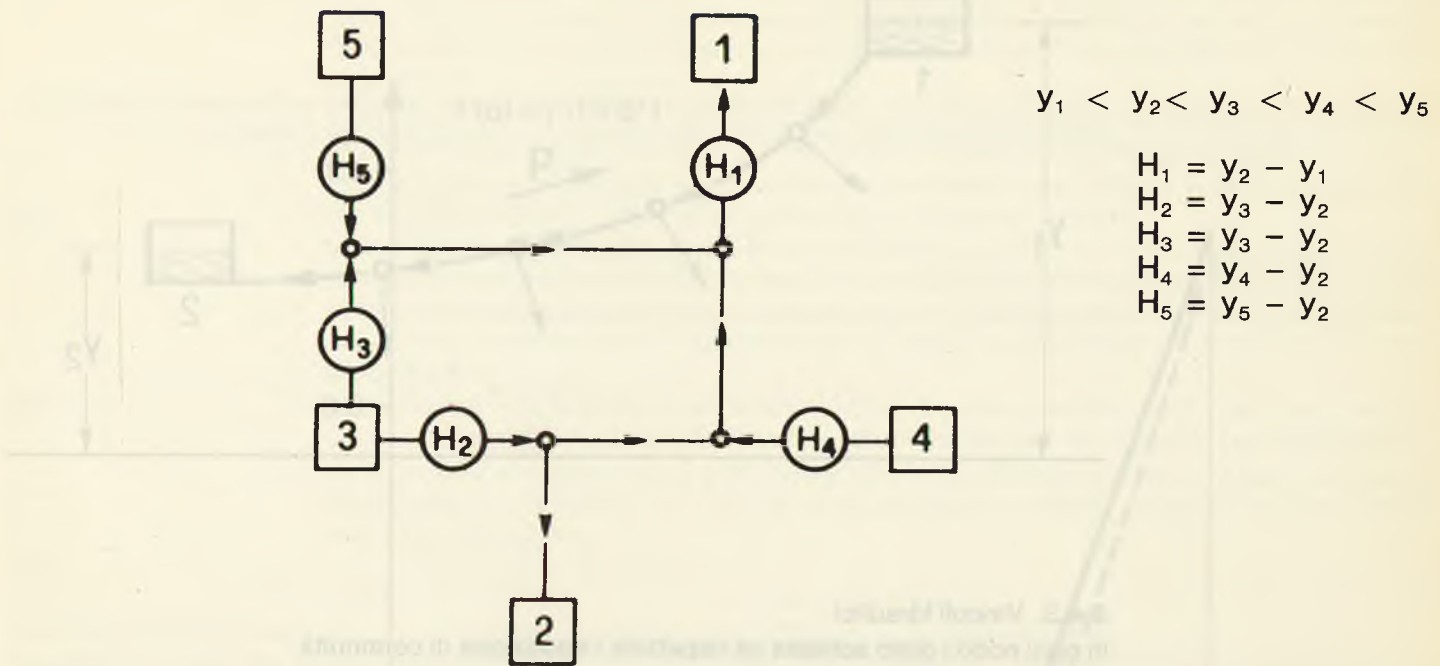


Figura 3.n - Possibile scelta di versi di percorrenza degli archi ed inserimento di impianti di sollevamento.

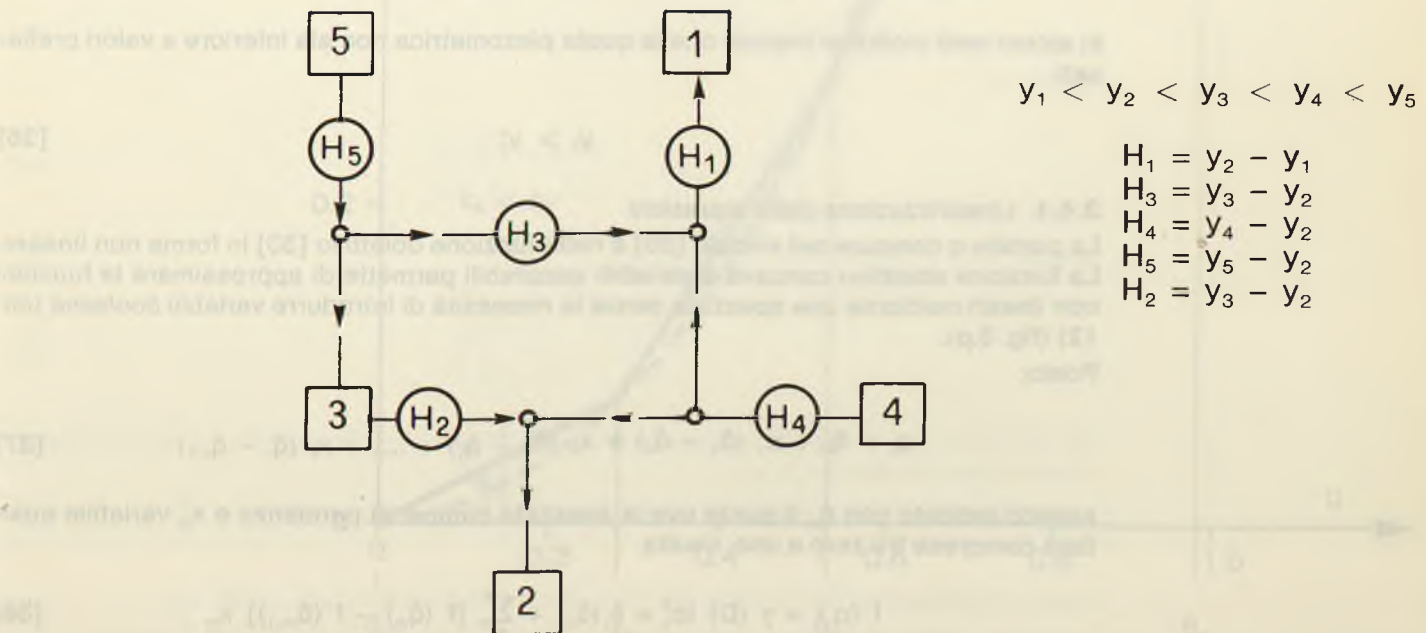
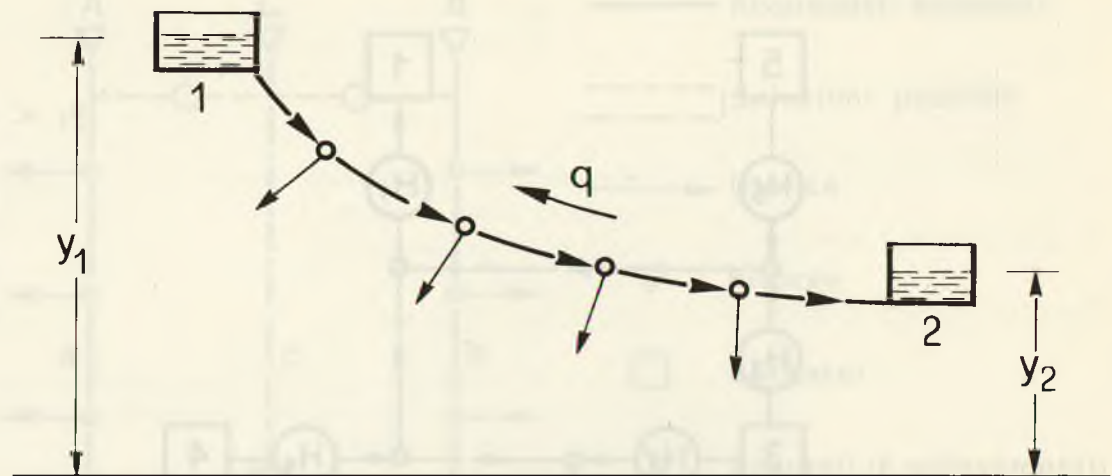


Figura 3.o - Collegamento tra due serbatoi a quota fissata.



3.4.3. Vincoli Idraulici

In ogni nodo j dello schema va rispettata l'equazione di continuità

$$\sum_1^{NE_j} (q_{1k} - q_{2k}) - \sum_1^{NU_j} (q_{1k} - q_{2k}) = q_j^* \quad [34]$$

dove q_j^* rappresenta la portata in uscita dal nodo, NE_j e NU_j rappresentano rispettivamente il numero di archi aventi il nodo j come nodo iniziale o finale. Per ogni ramo è scritta l'equazione delle perdite di carico

$$y_{mi} - y_{vi} = \gamma (D_i) l_i (q_1^2 - q_2^2) + P_i - H_i \quad [35]$$

con:

y_m e y_v rispettivamente la quota piezometrica di monte e di valle del ramo considerato
 P_i e H_i rispettivamente la perdita di carico e la prevalenza nel caso di $q_1 \neq 0$, l'inverso nel caso di $q_2 \neq 0$.

In alcuni nodi inoltre si impone che la quota piezometrica non sia inferiore a valori prefissati

$$y_i \geq y_i^* \quad [36]$$

3.4.4. Linearizzazione delle equazioni

La portata q compare nel vincolo [35] e nella funzione obiettivo [33] in forma non lineare. La funzione obiettivo concava a variabili separabili permette di approssimare le funzioni non lineari mediante una spezzata senza la necessità di introdurre variabili *booleane* (cfr. 12) (fig. 3.p).

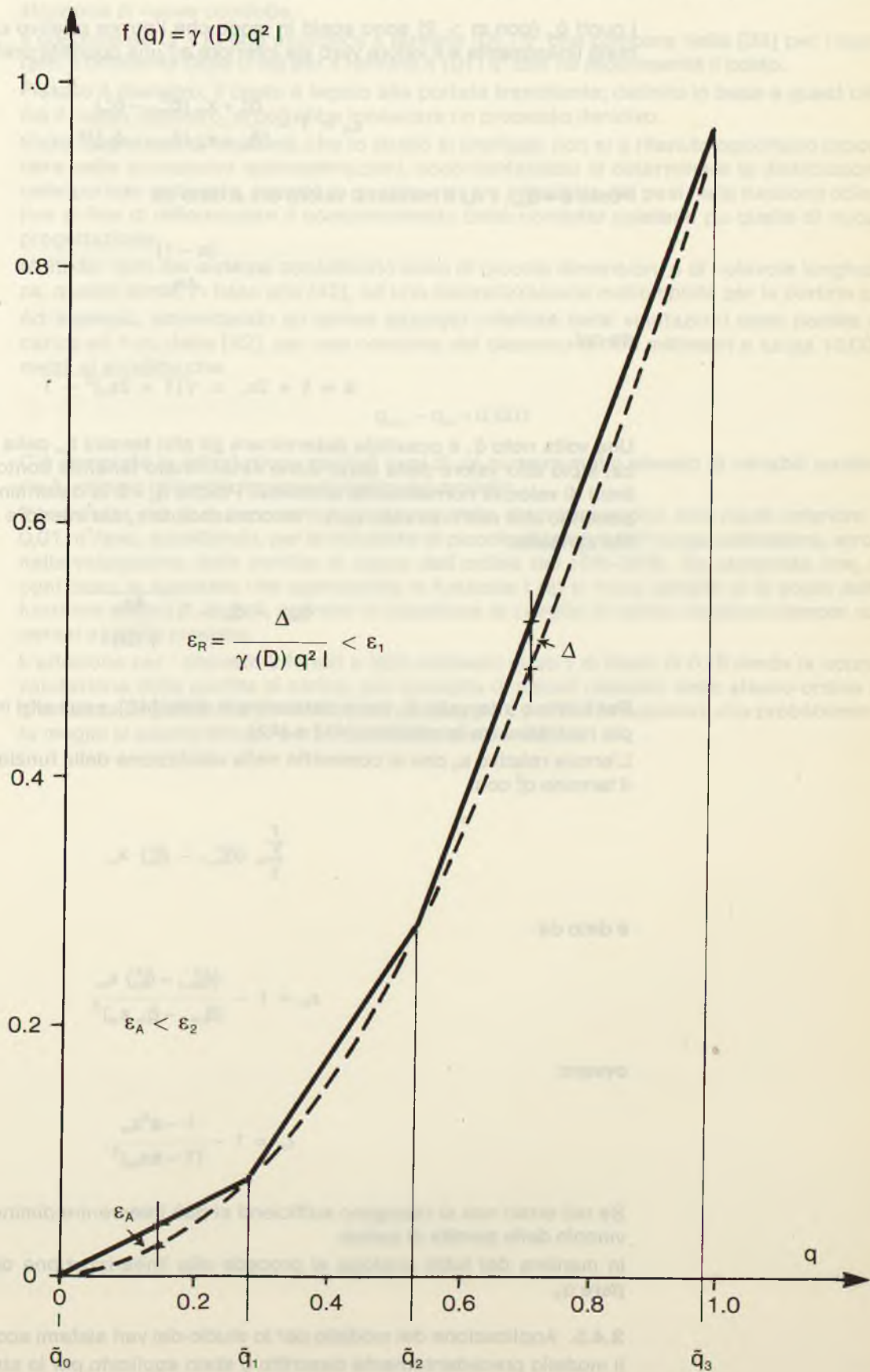
Posto:

$$q_1 = \bar{q}_0 + x_1 (\bar{q}_1 - \bar{q}_0) + x_2 (\bar{q}_2 - \bar{q}_1) + \dots + x_r (\bar{q}_r - \bar{q}_{r-1}) \quad [37]$$

avendo indicato con \bar{q}_m il punto ove la spezzata cambia di pendenza e x_m variabile ausiliare comprese tra zero e uno, risulta

$$f(q_1) = \gamma (D) l q_1^2 = f(\bar{q}_0) + \sum_1^s [f(\bar{q}_m) - f(\bar{q}_{m-1})] x_m \quad [38]$$

Figura 3.p - Approssimazione della funzione $y(D)q^2 I$ con una spezzata.



con $s < r$

$$\begin{aligned} x_m &= 1 && \text{per } m < s \\ 0 \leq x_m \leq 1 &&& \text{per } m = s \\ x_m &= 0 && \text{per } m > s \end{aligned}$$

I punti \bar{q}_m (con $m > 2$) sono scelti in modo che l'errore relativo ε_R tra funzione approssimata linearmente e il valore vero sia inferiore ad una quantità prefissata ε_1

$$\varepsilon_R = 1 - \frac{\bar{q}_m^2 + x_m (\bar{q}_{m+1}^2 - \bar{q}_m^2)}{[\bar{q}_m + x_m (\bar{q}_{m+1} - \bar{q}_m)]^2} \quad [39]$$

Posto $a = \bar{q}_{m+1} / \bar{q}_m$ il massimo valore di ε è dato da

$$\varepsilon_1 = \frac{(a-1)}{4a} \quad [40]$$

da cui

$$a = 1 + 2\varepsilon_1 \pm \sqrt{(1 + 2\varepsilon_1)^2 - 1} \quad [41]$$

Una volta noto \bar{q}_1 è possibile determinare gli altri termini \bar{q}_m della progressione geometrica; il più alto valore della serie viene determinato tenendo conto, per ogni condotta, dei limiti di velocità normalmente ammessi. Poiché $\bar{q}_0 = 0$ la determinazione di \bar{q}_1 avviene imponendo che nell'intervallo $\bar{q}_0 \bar{q}_1$ l'errore assoluto ε_A sia inferiore ad una prefissata quantità ε_2 risulta:

$$\bar{q}_{m+1} - \bar{q}_m = \sqrt{\frac{4\varepsilon_2}{\gamma(D) i}} \quad [42]$$

Per il primo intervallo \bar{q}_1 viene determinato dalla [42], negli altri intervalli dalla condizione più restrittiva tra le relazioni [41] e [42].

L'errore relativo ε_R che si commette nella valutazione della funzione obiettivo sostituendo il termine q_1^3 con

$$\sum_1^r (\bar{q}_{m-1}^3 - \bar{q}_m^3) x_m$$

è dato da:

$$\varepsilon_R = 1 - \frac{(\bar{q}_{m-1}^3 - \bar{q}_m^3) x_m}{(\bar{q}_{m-1} - \bar{q}_m x_m)^3} \quad [43]$$

ovvero:

$$\varepsilon_R = 1 - \frac{1 - a^3 x_m}{(1 - a x_m)^3} \quad [44]$$

Se tali errori non si ritengono sufficienti si può intervenire diminuendo gli errori relativi al vincolo delle perdite di carico.

In maniera del tutto analoga si procede alla linearizzazione delle funzioni in cui compare q_2 .

3.4.5. Applicazione del modello per lo studio dei vari sistemi acquedottistici

Il modello precedentemente descritto è stato applicato per lo studio dei 5 sistemi acque-

dottistici del progetto speciale n. 29, nell'ambito delle regioni Marche, Abruzzo, Lazio, Molise e Campania. Per rendere il modello in grado di rispondere alle particolari esigenze dei vari sistemi in esame sono stati adottati alcuni opportuni accorgimenti.

Al fine di poter sfruttare sino in fondo le capacità della rete esistente ed evitare, ove possibile, l'introduzione di nuovi rami, nella funzione obiettivo è stato introdotto un termine di penalità che in qualche misura tiene conto dei costi che si debbono affrontare nella costruzione di nuove condotte.

Il coefficiente $(1 + k)$ che moltiplica il termine $(D) l q^3$ che compare nella [33] per i nuovi rami è differente dalla unità per il termine $k (D) l q^3$ che ne rappresenta il costo.

Fissato il diametro, il costo è legato alla portata transitante; definito in base a quest'ultima il nuovo diametro, si potrebbe innescare un processo iterativo.

Visto il carattere di massima che lo studio si prefigge, non si è ritenuto opportuno procedere nelle successive approssimazioni, accontentandosi di determinare la distribuzione delle portate nella rete, avendo in qualche misura introdotto dei pesi nella funzione obiettivo al fine di differenziare il comportamento delle condotte esistenti da quelle di nuova progettazione.

Molti dei rami del sistema considerato sono di piccole dimensioni e di notevole lunghezza; questo porta, in base alla [42], ad una discretizzazione molto spinta per le portate q_m .

Ad esempio, ammettendo un errore assoluto inferiore nelle valutazioni delle perdite di carico ad 1 m, dalla [42], per una condotta del diametro di 100 millimetri e lunga 10.000 metri, si avrebbe che

$$q_{m+1} - q_m = 0,001$$

Ciò comporta la introduzione per tali rami di un numero molto elevato di variabili ausiliarie \bar{q}_m con un notevole appesantimento del modello.

Per evitare ciò si è imposto che il passo nella discretizzazione non risulti inferiore a 0,01 m³/sec, accettando, per le condotte di piccolo diametro e di lunga estensione, errori nella valutazione delle perdite di carico dell'ordine del 10%-20%. Va osservato che, in ogni caso, la spezzata che approssima la funzione $f(q)$ si trova sempre al di sopra della funzione stessa e, quindi, nei rami in questione le perdite di carico risultano sempre superiori a quelle previste.

L'adozione per i diametri inferiori a 500 millimetri di un γ di *Bazin* di 0,16 rende la sopravvalutazione delle perdite di carico, per condotte di piccoli diametri, dello stesso ordine di grandezza di quella che si avrebbe nel passaggio a γ di *Bazin* superiori, che probabilmente meglio si adatterebbero per le condotte considerate.

...dottistoi del progetto speciale n. 29, nell'ambito delle regioni Marche, Abruzzo, Lazio, Molise e Campania. Per rendere il modello in grado di rispondere alle particolari esigenze dei vari sistemi in esame sono stati adottati alcuni opportuni accorgimenti.

Al fine di poter sfruttare sino in fondo la capacità della rete esistente ed evitare, ove possibile, l'introduzione di nuovi rami, nella funzione obiettivo è stato introdotto un termine di penalità che in qualche misura tiene conto dei costi che si debbono affrontare nella costruzione di nuove condotte.

Il termine λ è stato scelto in modo da penalizzare l'apertura di nuovi rami e di limitare dunque, limitando il termine λ (0), la possibilità di costruire nuovi rami.

Fissato il diametro, il costo è legato alla portata trasportata, definito in base a quest'ultimo ma il nuovo diametro, si potrebbe ignorare un processo iterativo.

Visto il carattere di massima che lo studio si prefigge, non si è ritenuto opportuno procedere nelle successive approssimazioni, scontentandosi di determinare la distribuzione delle portate, ma si è preferito introdurre nei pesi nella funzione obiettivo al fine di differenziare il comportamento delle condotte esistenti da quelle di nuova progettazione.

Molti dei rami del sistema considerato sono di piccole dimensioni e di notevole lunghezza; questo comporta, ad una discretizzazione molto spinta per le portate Q_m , un errore assoluto inferiore nelle valutazioni delle perdite di carico ad 1 m, dalle [42], per una condotta di diametro di 100 millimetri e lunga 10.000 metri, si avrebbe che

$$a = 1 + 2\epsilon_1 + 2\epsilon_2 - 1 \quad [41]$$

$$P_{m+1} - P_m = 0,001$$

Una volta noto ϵ , è possibile determinare il termine q_m della progressione geometrica che rappresenta la introduzione per tutti i rami del sistema di un diametro di variabilità ausiliaria.

Per quanto riguarda la scelta del diametro, si è osservato che, in una condotta di diametro di 100 millimetri e di lunghezza di 10.000 metri, non risulta un errore superiore ad una prefissata quantità.

0,01 m/sec, accettando per le condotte di piccolo diametro, di lunga estensione, un errore nella valutazione delle perdite di carico dell'ordine del 10%-20%. Va osservato che, in ogni caso, la spazzata che approssima la funzione $f(p)$ si trova sempre al di sopra della funzione stessa e quindi, in questione di costi di carico risultano sempre superiori a quelli previsti.

L'adozione per i diametri inferiori a 500 millimetri di un γ di Bazin di 0,16 rende la sopra- valutazione delle perdite di carico, per condotte di piccoli diametri, dello stesso ordine di grandezza.

La scelta di un γ di Bazin di 0,16 rende la sopra- valutazione delle perdite di carico, per condotte di piccoli diametri, dello stesso ordine di grandezza.

Con la sostituzione della funzione obiettivo alla condizione di minimo, si può intervenire diminuendo gli errori relativi al vincolo delle perdite di carico.

$$L = \sum_{m=1}^n x_m$$

$$\dots = 1 - \frac{R_1 - R_2}{R_1 - R_2} \quad [43]$$

$$\dots = \frac{1 - R_2}{R_1 - R_2} \quad [44]$$

Se tali errori non si ritengono sufficienti si può intervenire diminuendo gli errori relativi al vincolo delle perdite di carico.

In maniera del tutto analoga si procede alla linearizzazione delle funzioni in cui compare Q_2 .

3.4.5. Applicazione del modello per lo studio di vari sistemi idraulici. Il modello precedentemente descritto è stato applicato per lo studio di vari sistemi acque-

4 l'uso dei modelli di sistema

- sensitività e parametrizzazione
- minimizzazione dei costi e massimizzazione dei benefici netti
- analisi costi-benefici

Il primo passo è quello di definire il modello di sistema da utilizzare. Questo modello deve essere in grado di rappresentare il sistema in modo accurato e di fornire risultati che siano utili per la decisione. La scelta del modello dipende dalle caratteristiche del sistema e dalle risorse disponibili. Una volta scelto il modello, il prossimo passo è quello di parametrizzare il modello. Questo significa definire i valori dei parametri del modello. I parametri possono essere definiti in base a dati storici, a dati di campo o a dati di laboratorio. La parametrizzazione è un processo iterativo che richiede la collaborazione di esperti del sistema e di esperti del modello. Una volta parametrizzato il modello, il prossimo passo è quello di eseguire il modello. Questo significa eseguire il modello per un periodo di tempo sufficiente a ottenere risultati significativi. I risultati del modello possono essere visualizzati in forma di grafici, di tabelle o di rapporti. Una volta ottenuti i risultati, il prossimo passo è quello di analizzare i risultati. Questo significa interpretare i risultati del modello e valutare l'accuratezza del modello. L'analisi dei risultati è un processo iterativo che richiede la collaborazione di esperti del sistema e di esperti del modello. Una volta analizzati i risultati, il prossimo passo è quello di utilizzare i risultati per la decisione. Questo significa utilizzare i risultati del modello per prendere decisioni sul sistema. L'utilizzo dei risultati del modello per la decisione è un processo iterativo che richiede la collaborazione di esperti del sistema e di esperti del modello.

4 l'uso dei modelli di sistema

- sensibilità e parametrizzazione
- minimizzazione dei costi e massimizzazione dei benefici netti
- analisi costi-benefici

L'uso dei modelli di sistema

Consideriamo ora alcuni aspetti rilevanti dell'uso dei modelli descritti nel precedente capitolo. Il riferimento più diretto è ai modelli di ottimizzazione a livello di sistema, ma quanto si dirà vale anche in buona parte per la simulazione – che anche se usata prevalentemente come strumento di controllo, può costituire un passo di una procedura di ricerca ottimale – e, in una certa misura, per il modello di dimensionamento degli acquedotti.

4.1. Sensitività e parametrizzazione

Sono queste le analisi classicamente note come post-ottimali. Con analisi di stabilità o di sensitività si intende lo studio degli effetti di variazioni nei valori di grandezze incontrollabili e assunte come dati sulla soluzione ottenuta. In particolare, si sarà interessati a conoscere le zone di stazionarietà o indifferenza – cioè l'insieme dei valori dei dati per i quali la soluzione ottenuta risulta praticamente costante – ovvero i valori critici o di instabilità, nell'intorno dei quali a «piccole» variazioni nei dati corrispondono grandi variazioni nella struttura della soluzione.

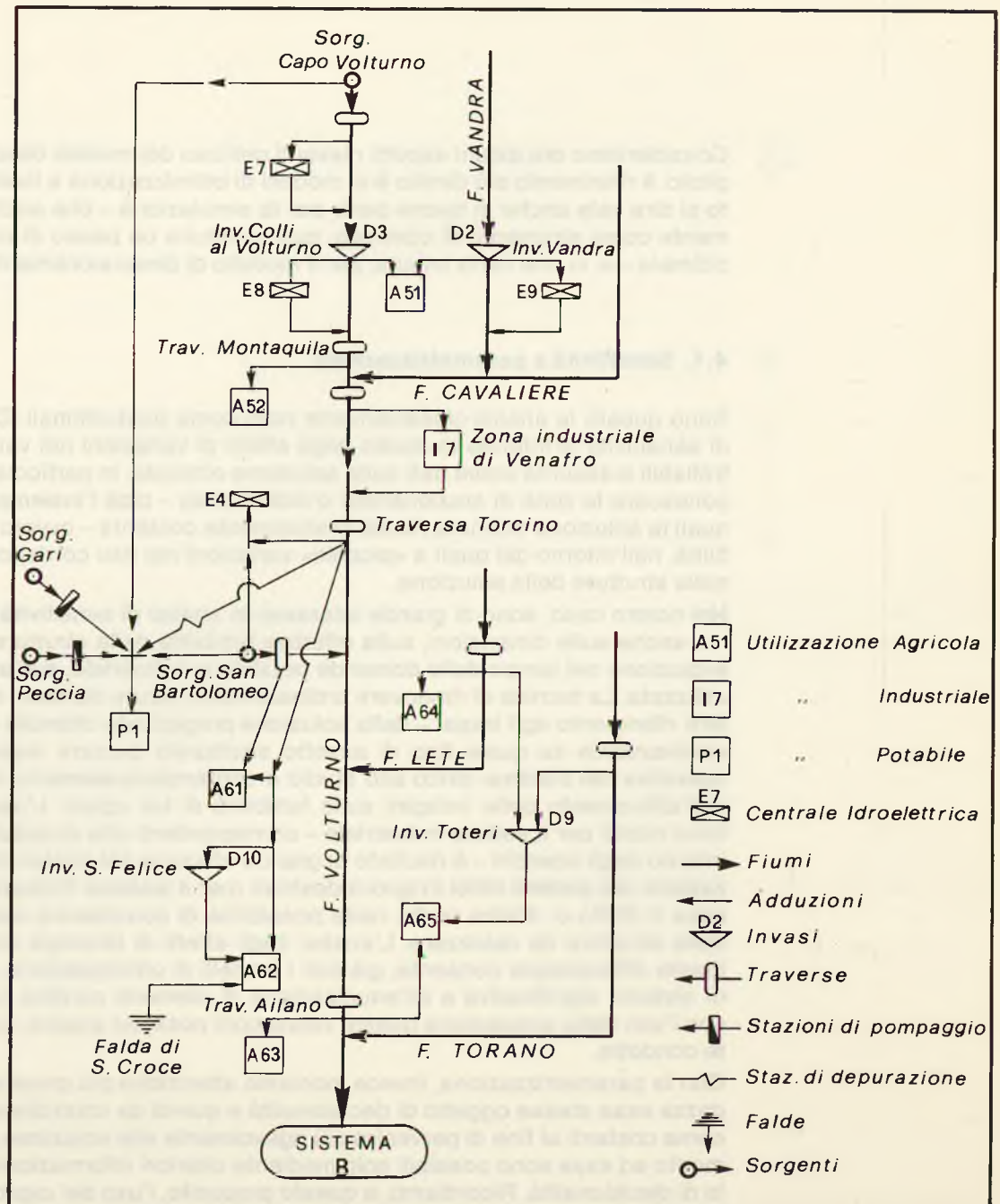
Nel nostro caso, sono di grande interesse le analisi di sensitività sui costi e sui benefici, ma anche sulle dimensioni, sulla effettiva fattibilità delle strutture idrauliche, sui livelli di evoluzione nel tempo delle domande potabile e industriale, sull'andamento dell'idrologia utilizzata. La tecnica di rimuovere ordinatamente alcuni elementi strutturali – con particolare riferimento agli invasi – dalla soluzione progettuale ottenuta consente di capire preventivamente su quale tipo di assetto strutturale occorre impostare la progettazione operativa del sistema idrico allo studio e contemporaneamente di identificare le priorità nell'affinamento delle indagini sulla fattibilità di tali opere. L'uso di ipotesi di consumi idrici ridotti per il settore industriale – corrispondenti alla possibilità di politiche di riciclo interno degli scarichi – è risultato di grande efficacia nel contenimento dei costi di realizzazione dei sistemi idrici irriguo-industriali (per il sistema Volturno si arriva a riduzioni di circa il 20%) o, d'altra parte, nella possibilità di considerare maggiori flessibilità d'uso delle strutture da realizzare. L'analisi degli effetti di idrologie con caratteristiche fortemente differenziate consente, già con i modelli di ottimizzazione, di pervenire a strutture di sistema significative e all'enucleazione di elementi cardine comunque da realizzare: con l'uso della simulazione queste valutazioni possono essere, quindi, più compiutamente condotte.

Con la parametrizzazione, invece, poniamo attenzione più propriamente ai valori di grandezze esse stesse oggetto di decisionalità e quindi da controllare, che sono considerate come costanti al fine di pervenire più agevolmente alla soluzione, o perché le decisioni in merito ad esse sono possibili solo mediante ulteriori informazioni o ad un superiore livello di decisionalità. Ricordiamo, a questo proposito, l'uso del capitale spendibile come parametro di controllo al 2° livello dello schema generale di ottimizzazione presentato nel secondo capitolo: solo al 3° livello, allorché ci si chiederà quale sia la allocazione ottimale della risorsa capitale tra i diversi sistemi, risulta possibile esprimere quale debba essere il valore del parametro capitale da utilizzare per ciascun sistema considerato.

Analogamente si procede al 1° livello per il modello di comprensorio irriguo (vedi capitolo quinto) in relazione al volume idrico disponibile.

Un ulteriore uso della parametrizzazione si ha in relazione alle interconnessioni tra due sistemi. Consideriamo esemplificativamente il sistema Alto-Volturno, A, quale è riportato schematicamente in fig. 4.1.; tale sistema risulta connesso con il sistema B, Basso Volturno, in modo prefissato attraverso l'uso P1 – utenza potabile di Napoli – e l'eventuale riuso delle corrispondenti fluenze reflue (problema interno al sistema B) e in modo da definire mediante il deflusso a valle lungo l'alveo del Volturno, che risulti utilizzabile per gli usi del sistema B. Poiché questi ultimi risultano di fatto essere solo irrigui e poiché il deflusso da A a B non può essere regolato da invasi in B, la variabile di interconnessione è determinata dal deflusso annuo D reso disponibile da A a B secondo il diagramma di utilizzazione proprio della domanda irrigua, cioè in definitiva una grandezza scalare. Para-

Figura 4.1 - Schema del sistema Alto Volturno (sistema A).

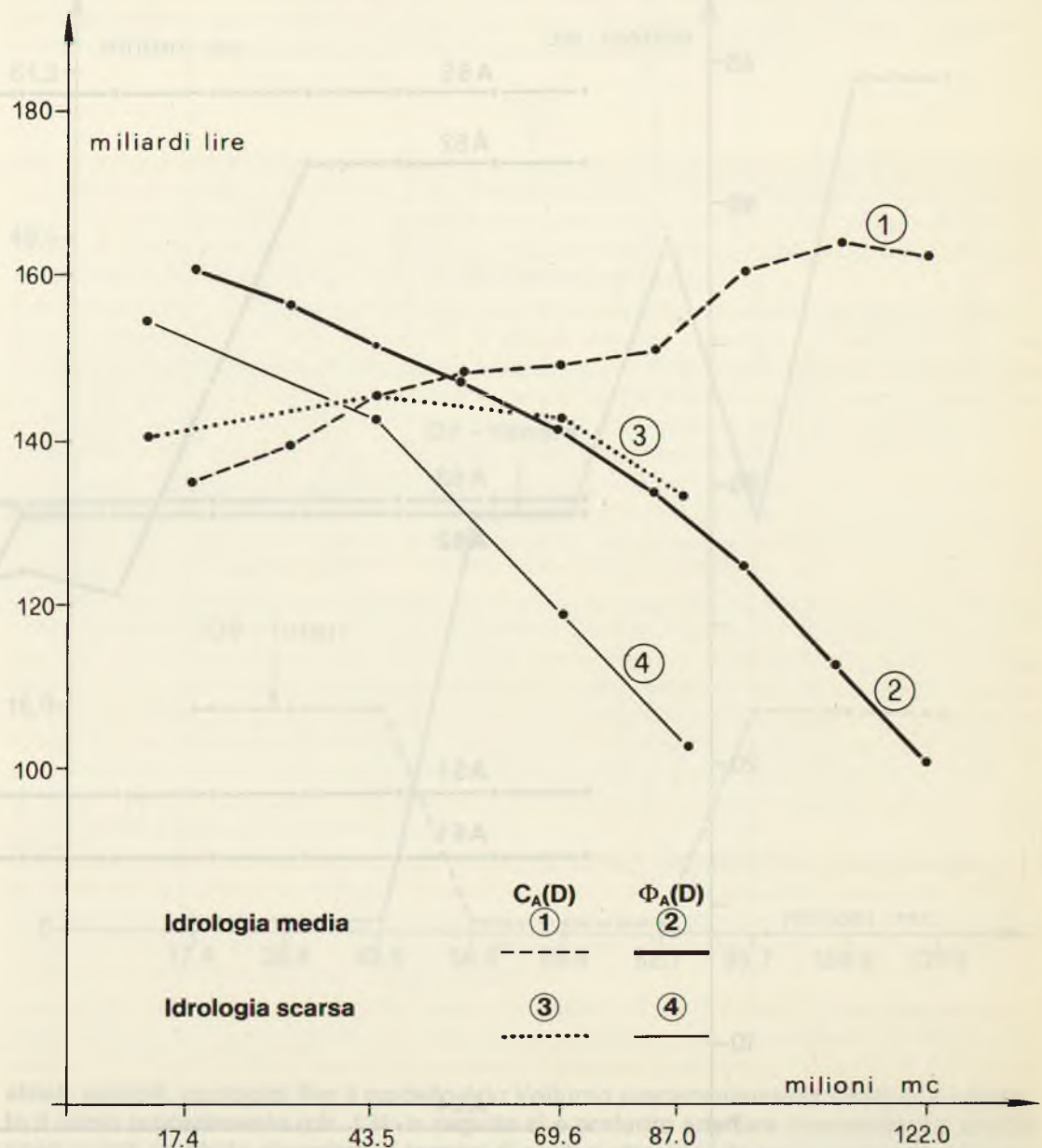


metrizziamo tale valore per il sistema A: si avranno soluzioni ottimali differenti, e, corrispondentemente, curve di beneficio netto e di costo. In fig. 4.2. è riportato sinteticamente l'effetto delle variazioni di D su tali curve per due diverse idrologie adottate (un'idrologia «media» e una di «magra»), mentre nelle figg. 4.3. e 4.4. sono riportati gli andamenti delle dimensioni di alcuni usi e degli invasi nel caso dell'idrologia media (gli invasi D10, D3 non sono attivati in nessun caso): se ne deducono immediatamente i relativi punti critici.

Tali valori sono peraltro ottenuti in relazione ad un'ipotesi teorica di riduzione delle distrazioni idriche verso il sistema Garigliano a scopo idroelettrico; alterando tale ipotesi tutte le soluzioni ne subiscono effetti.

La decisione su quale debba essere il deflusso D da rilasciare a valle può essere presa non appena nota la corrispondente curva dei benefici netti $\Phi_D(B)$ per il sistema B: al su-

Figura 4.2 - Confronto dei valori di $\Phi_A(D)$, beneficio netto del sistema Alto Volturno, e di $C_A(D)$, costo globale del sistema Alto Volturno, in ipotesi di idrologia annua «media» e «scarsa».



periore livello di analisi, corrispondente al confronto delle curve $\Phi_A(D)$, $\Phi_B(D)$ e alla costruzione della curva somma

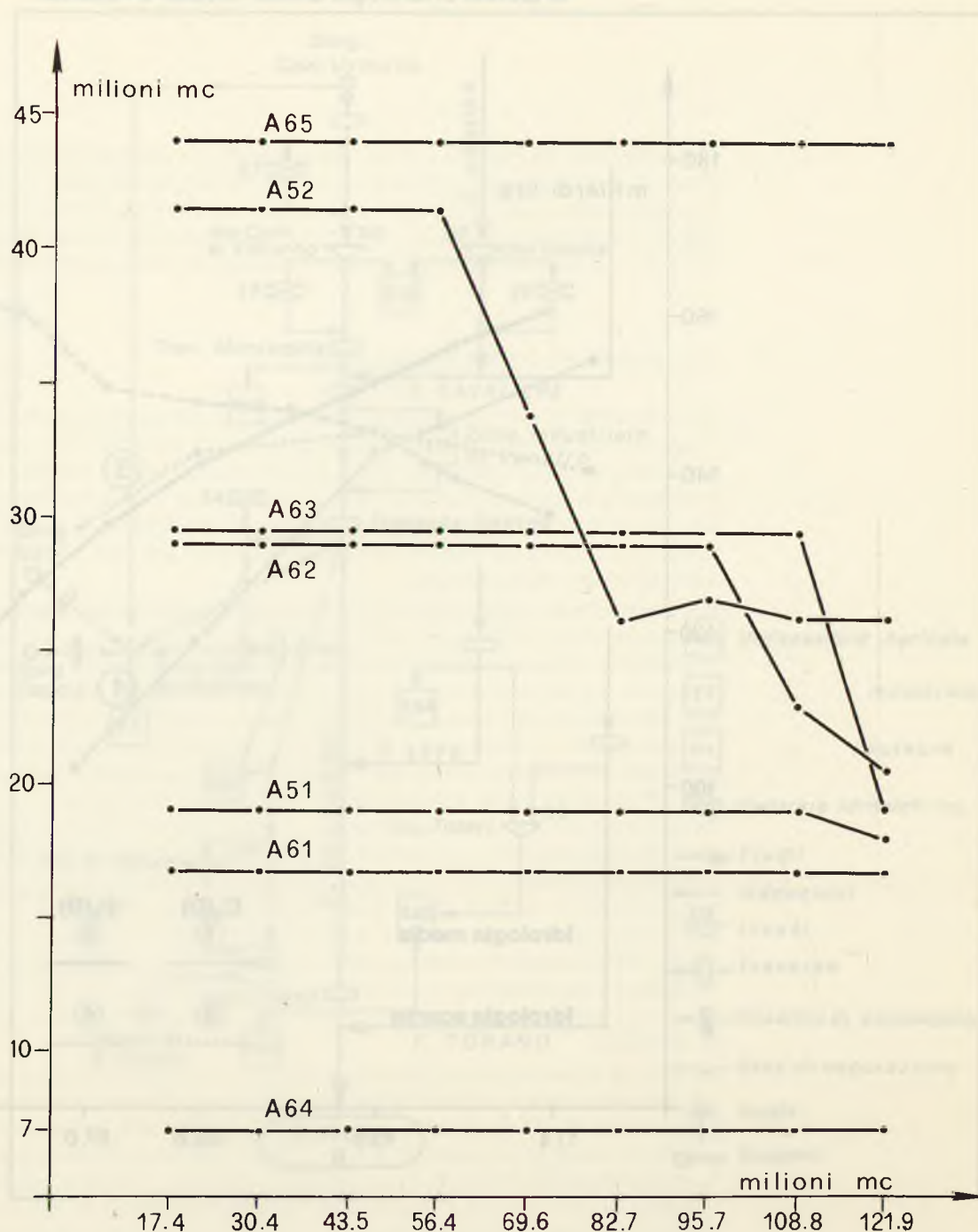
$$\Phi(D) = \Phi_A(D) + \Phi_B(D),$$

sarà possibile definire D^* , quale punto di massimo per $\Phi(D)$.

4.2. Minimizzazione dei costi e massimizzazione dei benefici netti

Consideriamo ora un ulteriore problema di interesse concreto, relativo alla scelta della funzione obiettivo. Nei modelli di sistema abbiamo prevalentemente parlato di massimizzazione di benefici netti, in quanto formulazione più naturale del criterio dell'efficienza

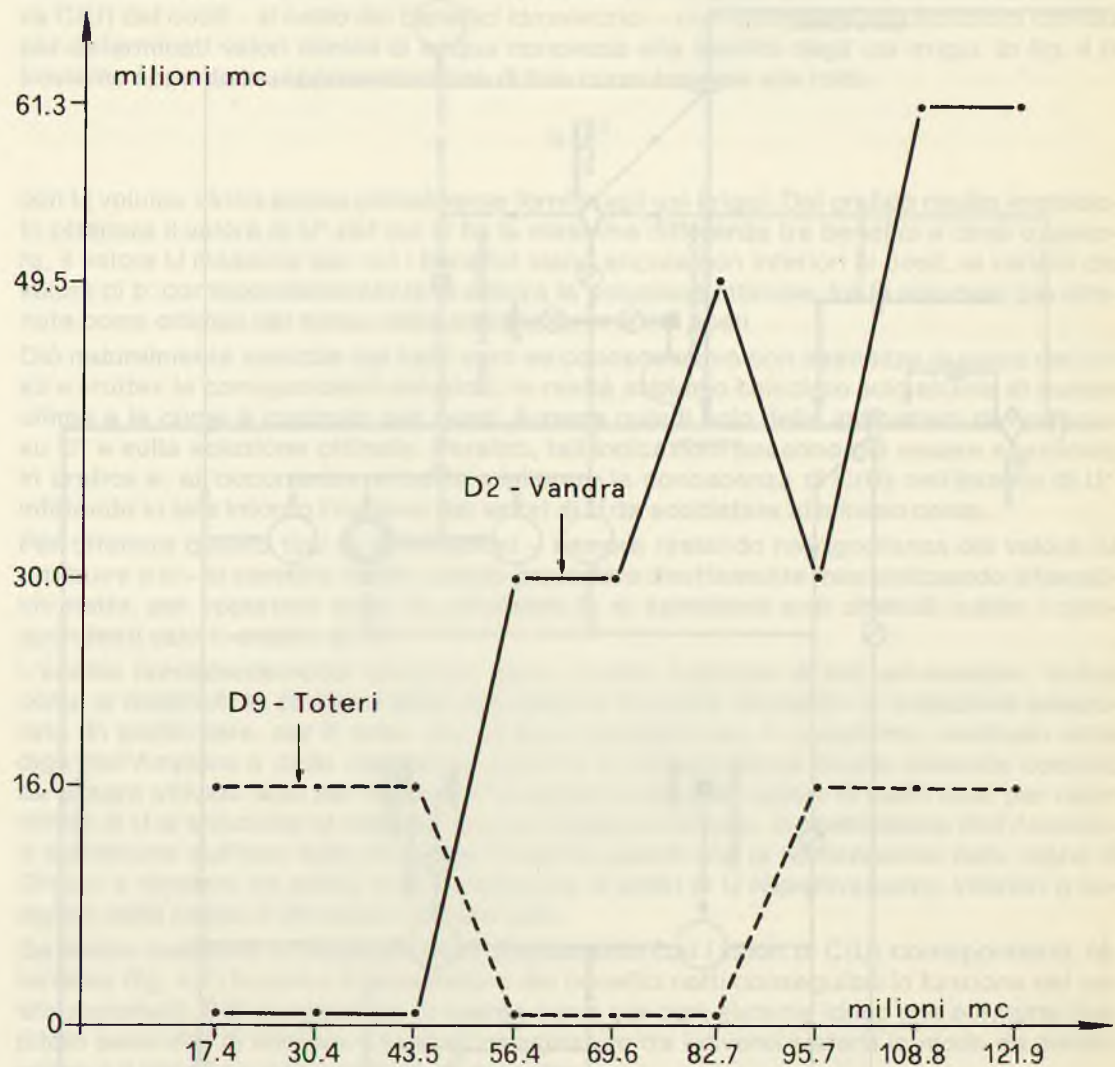
Figura 4.3 - Fabbisogni irrigui assicurati per il sistema Alto Volturno nell'ipotesi di idrologia media al variare del vincolo di consegna d'acqua all'esterno del sistema.



economica dell'intervento. In pratica però, si possono ottenere stime omogenee e relativamente sicure dei costi (anche se non è semplice il problema di riconoscere i costi reali per la collettività, in luogo dei meri costi finanziari) in tempi piuttosto rapidi: non altrettanto vale per i benefici, la cui valutazione - al di là di stime sommarie - è ben più ardua e assai meno scevra da dubbi e da aleatorietà (si pensi all'evoluzione nel tempo dei prezzi delle colture irrigue). Ci si trova, spesso, quindi, dinanzi alla circostanza di non possedere contemporaneamente stime significative di costi e benefici e di dover trattare comunque con maggiore delicatezza le valutazioni dei benefici.

Si può procedere allora costruendo comunque il sistema delle relazioni vincolari e adottando il criterio della massimizzazione dei benefici netti, come stime preliminari dei benefici, oppure direttamente il criterio della minimizzazione dei costi (con la considerazione dei soli benefici idroelettrici) per prefissati valori negli usi irrigui oltre che in quelli indu-

Figura 4.4 - Dimensioni delle opere di invaso nell'ipotesi di idrologia media al variare del vincolo di consegna d'acqua all'esterno del sistema.



striali, potabili, ecologici. Per il modello Alto Volturno precedentemente citato si è adottato il primo procedimento (cfr. 13); in seguito si è preferito adottare il secondo. Le analisi sono quindi condotte dapprima in termini di costi e «*targets*» da raggiungere, in seguito; essendo disponibili i valori dei benefici, basterà soltanto modificare la funzione obiettivo e riottenere soluzioni più accurate.

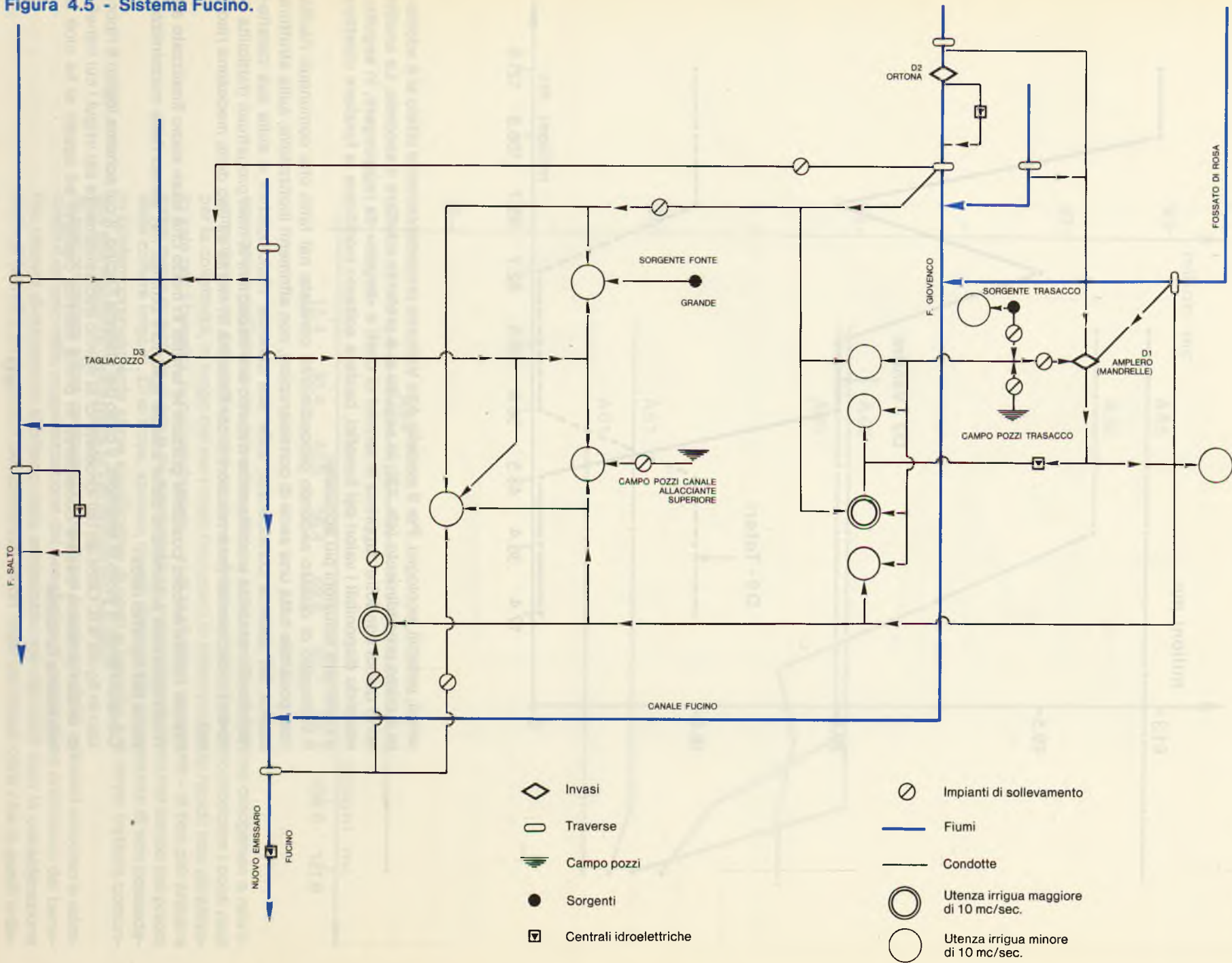
Il vantaggio di questo secondo procedimento consiste nel fatto che comunque risulta così possibile tutta una serie di considerazioni, non altrimenti ipotizzabile, sulla struttura basilica del sistema considerato, sulle sue carenze «fisiologiche» e sulle sue caratteristiche di instabilità e indifferenza rispetto alle risoluzioni di nodi progettuali (fattibilità di opere) o decisionali (interrelazioni e conflittualità in merito all'uso della medesima risorsa).

Risulta inoltre ancora possibile guidare le analisi in modo che esse siano finalizzate all'individuazione preliminare delle stesse soluzioni ottimali nel senso della massimizzazione dei benefici netti.

Consideriamo, a titolo di esempio, il caso del sistema Fucino, il cui schema logico è riportato in figura 4.5. Oltre ad usi idroelettrici si hanno esclusivamente usi irrigui i cui benefici unitari possono essere considerati in prima istanza costanti ed uguali: si ha cioè la medesima funzione

Figura 4.5 - Sistema Fucino.

74



ad espressione del beneficio lordo dell'uso irriguo (U essendo il volume idrico annuo consegnato). È quindi irrilevante considerare esplicitamente il beneficio per decidere se un dato uso irriguo debba essere attivato in alternativa ad un altro uso ancora irriguo: sarà rilevante considerare invece la curva dei costi marginali, cioè l'andamento della curva $C(U)$ dei costi – al netto dei benefici idroelettrici – corrispondenti alle soluzioni ottimali per determinati valori minimi di acqua concessa alla totalità degli usi irrigui. In fig. 4.6. troviamo appunto la rappresentazione di tale curva insieme alla retta

b U

con U volume idrico annuo globalmente fornito agli usi irrigui. Dal grafico risulta immediatamente ottenere il valore di U^* per cui si ha la massima differenza tra benefici e costi o, ancora, il valore U massimo per cui i benefici siano ancora non inferiori ai costi, al variare del valore di b : corrispondentemente si otterrà la soluzione ottimale, fra le soluzioni già ottenute come ottimali nel senso della minimizzazione dei costi.

Ciò naturalmente sarebbe del tutto vero se conoscessimo con esattezza la curva dei costi e «tutte» le corrispondenti soluzioni. In realtà abbiamo calcolato solo alcune di queste ultime e la curva è costruita per punti. Avremo quindi solo delle indicazioni di «intorno» su U^* e sulla soluzione ottimale. Peraltro, tali indicazioni possono già essere esaminate in pratica e, all'occorrenza, si potrà migliorare la conoscenza di $C(U)$ nell'intorno di U^* , infittendo in tale intorno l'insieme dei valori di U da soddisfare al minimo costo.

Per ottenere questo tipo di informazioni – sempre restando nell'ignoranza del valore da attribuire a b – si sarebbe anche potuto procedere direttamente massimizzando il beneficio netto, per opportuni valori di parametro b : si sarebbero anzi ottenuti subito i corrispondenti valori «esatti» di U .

L'analisi precedentemente condotta, però, ci dice qualcosa di più; ad esempio, indica come si modifichi la struttura della soluzione in funzione del livello di irrigazione assicurato. In particolare, per il caso che stiamo considerando, il complesso costituito dalla diga dell'Amplero e dalle connesse condotte di alimentazione risulta talmente costoso da essere attivato solo per valori di U superiori a circa 28 milioni di metri cubi: per valori minori di U la soluzione si basa sul piccolo invaso di Ortona, in sostituzione dell'Amplero, e soprattutto sull'uso delle falde. Ne discende quindi che la realizzazione delle dighe di Ortona e Amplero ha senso solo in relazione a valori di U rispettivamente inferiori o superiori della soglia di 28 milioni di metri cubi.

Se inoltre mettiamo in relazione $B(U)$ direttamente con i valori di $C(U)$ corrispondenti, otterremo (fig. 4.7) la curva di espansione dei benefici netti conseguibili in funzione del costo sostenuto. È la conoscenza di queste curve per ogni sistema idrico che permette (capitolo secondo) di allocare il budget complessivo tra i diversi sistemi in modo da massimizzare il beneficio totale dell'intero progetto.

A prescindere, poi, dallo studio dei restanti sistemi, la fig. 4.7 mostra molto chiaramente i valori di $C(U)$ cui corrisponde una forte crescita oppure una stazionarietà di $B(U)$: così per $b = 3$, il valore di $B(U)$ è massimo quando è massimo anche $C(U)$ (cioè a 70 miliardi di lire) ma con un incremento assai ridotto rispetto ai valori raggiunti per valori assai inferiori di $C(U)$ (ad esempio, per circa 19 miliardi di lire): per costi compresi tra 20 e 60 miliardi di lire, $B(U)$ risulta infatti praticamente costante e la produttività marginale del capitale pressoché nulla. In tal caso, dato che il capitale è una risorsa scarsa, sapremo già che dovremo collocarci non nell'ottimo, ma, al più, a circa 19 miliardi di lire per $C(U)$ o equivalentemente a circa 23 milioni di metri cubi per U , onde tener conto della necessità di un uso efficiente del capitale sia in relazione agli altri sistemi idrici, che per interventi esterni allo stesso progetto speciale n. 29.

Questo esempio molto semplice si presta ancora ad altre utili considerazioni. Ad esempio cosa accade se una certa struttura – la diga dell'Amplero – dovrà comunque essere realizzata per protezione dalle piene? La curva dei costi che ne deriverà sarà naturalmente diversa, ma ancora non dipenderà dalla considerazione dei benefici: ripetendo l'analisi compiuta precedentemente si riotterranno nuovi valori per U come punto di ottimo al variare di b .

L'analisi ci dice anche – se possediamo utili ipotesi di lavoro sul sistema da realizzare e sul corrispondente valore di U – quale sia il valore minimo di b per cui, all'ottimo, si abbia almeno un assegnato volume irriguo. Questo metodo euristico ci guiderà quindi nell'approfondire l'indagine su b e sulla affidabilità nelle stime corrispondenti.

Ancora, ci si potrà chiedere se è realistico considerare un solo valore di beneficio unitario. Considerarne due distinti per differenti usi irrigui complicherà il nostro problema, ma

Figura 4.6 - Andamento dei costi C(U) al netto dei benefici idroelettrici al variare del volume U di acqua consegnata ad usi irrigui; retta bU dei benefici irrigui; B(U) beneficio totale netto al variare di b.

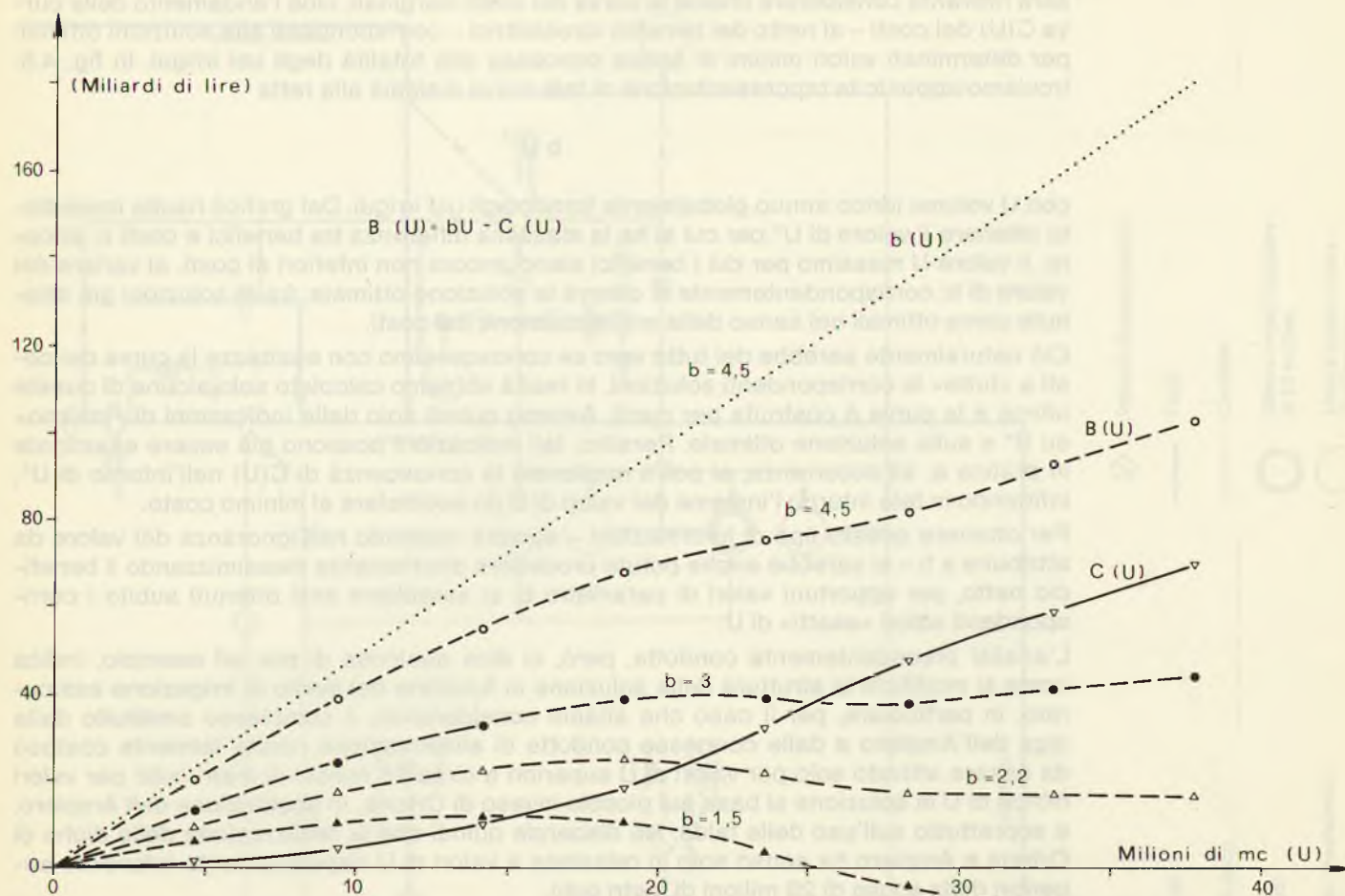
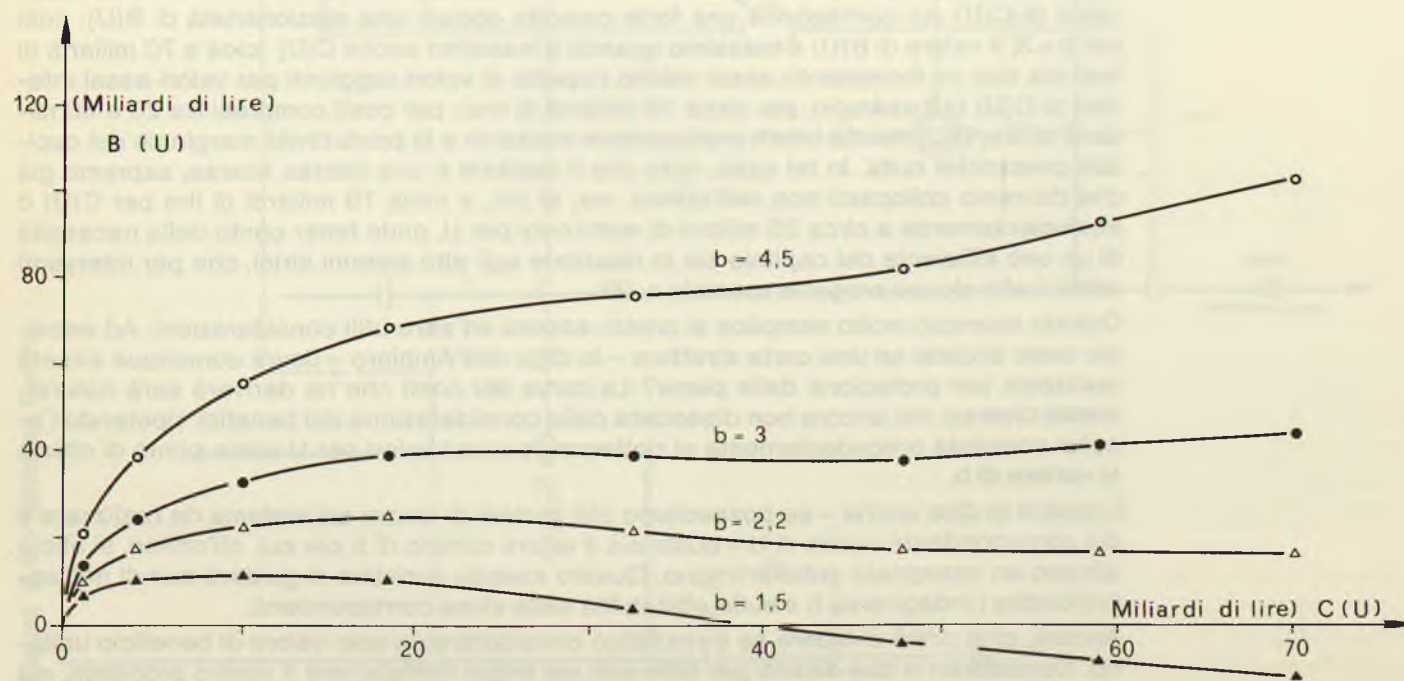


Figura 4.7 - Andamento del beneficio netto in funzione del capitale impiegato al variare del parametro b di beneficio unitario.



è interessante notare che l'analisi potrà ancora essere condotta utilizzando ulteriori curve di espansione dei costi e dell'irrigazione, che siano guidate da ipotesi alternative di attuazione prioritaria degli interventi. La considerazione dei costi con tale procedimento equivale, in un certo senso, alla considerazione di curve-soglia e alla connessa analisi per problemi urbanistico-territoriali.

Naturalmente, nel nostro caso, sarà sempre possibile successivamente considerare le correzioni introdotte dall'uso esplicito dei benefici nella funzione obiettivo. Così, però, sul piano operativo, si saranno potute anticipare decisioni di realizzazione o di approfondimento di analisi su elementi o alternative progettuali che risultino comunque strategiche.

4.3. Analisi costi-benefici

L'analisi costi-benefici in senso stretto, cioè il confronto secondo un dato criterio (differenza, rapporto, tasso di rendimento «interno») tra costi e benefici, è in realtà già implicita nel processo di ottimizzazione della funzione obiettivo per i modelli di massimizzazione del beneficio netto (criterio della differenza). In senso più lato, però, con l'analisi costi-benefici si intende il processo di valutazione economica di un progetto definito – o al più di un numero limitato di progetti alternativi – di cui siano considerati benefici e costi non solo diretti ma complessivi, i soggetti economici interessati e i relativi effetti su di essi, nonché gli effetti di ritorno di lungo termine dell'intervento una volta che esso sia realizzato.

Ora, con l'uso dei modelli di ottimizzazione si è in grado non solo di verificare la coerenza di una data soluzione progettuale rispetto a prefissati requisiti di redditività economica o di determinare la soluzione più conveniente tra un numero limitato di alternative progettuali, ma piuttosto di ricercare la soluzione economicamente ottimale tra «tutte» le soluzioni possibili. Molte delle limitazioni apparentemente intrinseche nella formulazione dei modelli di ottimizzazione possono essere infatti rimosse usando i modelli stessi secondo opportuni piani di analisi. Ciò, vale, in particolare, se si perseguono simultaneamente più obiettivi economici non omogenei: si può in tal caso tener conto di alcuni di essi direttamente nei modelli sotto forma di determinati livelli di soddisfacimento, lasciando la definizione dei pesi tra gli obiettivi residui all'esame, ad esempio, di curve di trasformazione tra coppie di obiettivi (o di soluzioni ottenute con tecniche di analisi multi obiettivo) costruite ancora mediante i modelli di ottimizzazione con la tecnica, ormai familiare, di massimizzare uno dei due obiettivi, mentre si parametrizza il livello minimo da conseguire nell'altro.

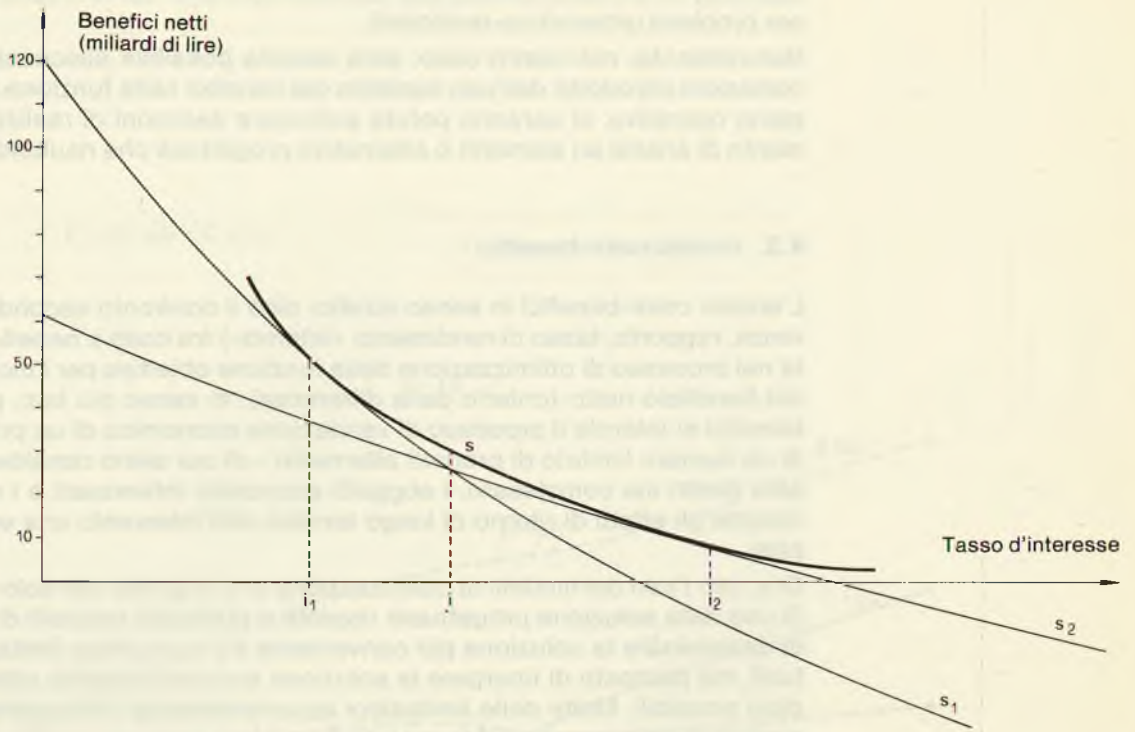
Se però gli obiettivi sono molti e se, com'è nel nostro caso, i valori per essi conseguibili sono a loro volta influenzati da delicati parametri di natura economica e decisionale, è assai più pratico cercare soluzioni che siano ottimali soltanto in relazione a pochi obiettivi principali o addirittura ad un unico obiettivo guida, in corrispondenza, inoltre, a pochi valori dei parametri di base.

Procedure complementari di valutazione economica potranno però, a questo punto, essere applicate alle soluzioni così ottenute: si tratterà, quindi, di effettuare, sugli elementi progettuali corrispondenti, la valutazione degli effetti indotti e di ritorno e, in relazione a variazioni nei parametri di base, se ne potrà analizzare la robustezza. Dai risultati ottenuti si potrà scegliere tra le soluzioni già disponibili o inferire nuove soluzioni, da ricalcolare eventualmente con i modelli secondo i procedimenti già seguiti, da sottoporre ad analisi. La potenza di queste procedure di valutazione – che possono essere rese del tutto o parzialmente automatiche e quindi trattabili con programmi elaborativi – è particolarmente evidente se si hanno a disposizione soluzioni di minimo costo: l'analisi precedentemente condotta per il sistema Fucino costituisce, in questo senso, un esempio piuttosto semplice e ridotto, ma comunque illuminante.

Preme di più, però, sottolineare l'importanza di questo tipo di analisi e di procedure laddove si potrebbe ritenere, a prima vista, di aver già condotto l'analisi economica, in quanto si possiedono soluzioni relative alla massimizzazione dei benefici netti secondo un particolare obiettivo economico guida (ad esempio il valore aggiunto della produzione). In quest'ultimo caso, infatti, sarà possibile integrare le valutazioni direttamente fornite dalla funzione obiettivo del modello con il valore dei benefici aggiuntivi – connessi ad ulteriori obiettivi – opportunamente pesati da coefficienti di *trade-off* rispetto all'obiettivo guida utilizzato nel modello.

Un aspetto di particolare interesse è fornito dall'espansione delle valutazioni ottenute utilizzando soluzioni ottimali corrispondenti a determinati tassi di preferenza nel tempo,

Figura 4.8 - Curve s_1 e s_2 del valore economico di soluzioni ottimali ai tassi i_1 e i_2 e curva involuppo s .



per una gamma di valori di tale tasso che sia ritenuta sufficientemente ampia per coprire l'intervallo di indeterminazione di quest'ultimo (vedi fig. 4.8).

È infatti opportuno ricordare la delicatezza del tasso d'interesse a cui scontare il flusso dei costi e benefici, che in quanto tasso di preferenza nel tempo della collettività (cfr. 19) è esso stesso assimilabile a un coefficiente di *trade-off* tra benefici o costi relativi a tempi diversi.

Il carattere di ottimalità di una soluzione è quindi relativo alla particolare scelta del tasso. Attualizzando più soluzioni ottimali in corrispondenza a valori distinti di questo e ricavando per ognuna di esse la curva del valore economico, si potrà interpolare una curva involuppo che rappresenta, per ciascun tasso, il valore economico della soluzione ottimale corrispondente. L'analisi comparata di questa curva con quelle ricavate per soluzioni specifiche ci fornisce indicazioni sulla sensibilità del comportamento globale del sistema in relazione al tasso di preferenza nel tempo e sull'affidabilità - in tal senso - delle singole soluzioni. Il confronto tra gli elementi strutturali di soluzioni distinte fornisce, ancora una volta, i nuclei strutturali invarianti rispetto al tasso e, quindi, nell'incertezza sulla scelta di quest'ultimo, permette di anticipare la caratterizzazione delle scelte progettuali da affinare o da realizzare in sede operativa.

5 i modelli per la valutazione della domanda d'acqua

- modello demografico
- uso razionale dell'acqua
nel settore irriguo

5.1.1 Considerazioni generali

Nell'attingere il prodotto idrico, l'agricoltore, come ogni consumatore, si avvale non solo della propria forza lavoro, ma anche di mezzi meccanici, elettrici, termici, chimici, ecc. L'uso di questi mezzi, che comporta una maggiore produttività, comporta anche un maggiore consumo idrico. Pertanto, la valutazione della domanda idrica deve tener conto anche di questi fattori.

È noto che, in ogni caso, il consumo idrico è direttamente legato al tipo di coltura che viene coltivata e al tipo di terreno su cui viene coltivata. Inoltre, il consumo idrico è anche legato al tipo di coltura che viene coltivata e al tipo di terreno su cui viene coltivata.

La valutazione della domanda idrica deve tener conto anche di questi fattori. Pertanto, la valutazione della domanda idrica deve tener conto anche di questi fattori.

L'analisi storica del fenomeno demografico, effettuato con riferimento al periodo di tempo 1971-1976, ha permesso di individuare i fattori che hanno influenzato il fenomeno demografico.

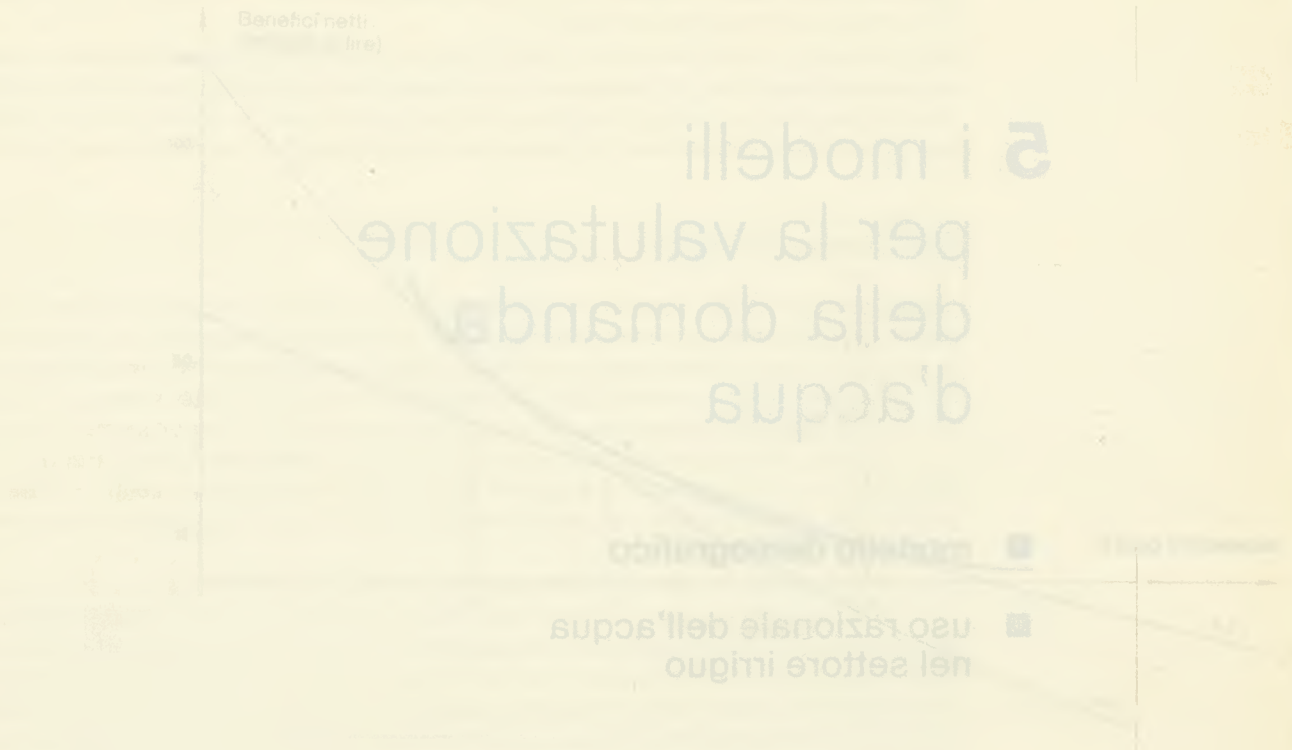
5.1.2 La stima di popolazione

Il modello di stima - del tipo di popolazione - è una formula di calcolo di tipo generale, che può essere applicata a qualsiasi situazione. Il modello di stima di popolazione è una formula di calcolo di tipo generale, che può essere applicata a qualsiasi situazione.

$$P_{t+1} = P_t + (P_t - P_{t-1}) \cdot (1 + r) \quad (1)$$

Il modello di stima di popolazione è una formula di calcolo di tipo generale, che può essere applicata a qualsiasi situazione.

Figura 4.8 Curve s_1 e s_2 dal tipo di soluzione ottimale al tasso i , s_1 e s_2 e curva involucro s .



... tale tasso che sia ritenuta sufficientemente ampio per coprire il rischio di indeterrminazione di quest'ultimo (vedi 4.3.2).

È infatti opportuno ricordare la delicatezza del tasso i a cui scontare il flusso dei costi e benefici, che in quanto tasso di preferenza nel tempo della collettività (cfr. 19) è esso stesso correlato a un coefficiente di trade-off tra costi relativi a tempi diversi.

Il carattere di ottimalità di una soluzione è quindi relativo alla scelta del tasso. Attualizzando più soluzioni ottimali in funzione di questo e ricavando per ognuna di esse la curva del valore economico, si potrà interpolare una curva involucro che rappresenta l'insieme delle soluzioni ottimali della soluzione ottimale corrispondente. L'analisi comparata di queste curve, dalle quali ricavate per soluzioni ottimali, consente di valutare l'effetto di un cambiamento globale del sistema di irrigazione, e di valutare, in tal senso, le soluzioni distinte fornite, ancora una volta, da un singolo sistema al tasso i , e quindi, nell'incertezza sulla scelta di un tasso, di valutare la caratterizzazione delle scelte progettuali da affinare o da realizzare.

I modelli per la valutazione della domanda d'acqua

Consideriamo ora i modelli di maggiore interesse utilizzati per lo studio della domanda d'acqua.

Il modello demografico in se stesso si pone esclusivamente il problema dei movimenti di popolazione. Utilizzando, però, in cascata altre analisi si può giungere dalle previsioni di popolazione alle stime di fabbisogno potabile.

Analoghi metodi sono utilizzati per fissare i fabbisogni industriali.

Il settore irriguo merita un interesse particolare, sia per le sue caratteristiche specifiche, sia perché rappresenta la gran parte della domanda di punta, cioè di quella domanda soddisfacibile con grandi opere di regolazione e, quindi, di maggior impatto per la definizione delle strutture idrauliche da realizzare.

Viene, quindi, presentato qui di seguito un modello messo a punto per valutare gli effetti economici dell'acqua a livello di comprensorio agricolo, secondo ipotesi di uso razionale di essa.

Tali effetti sono utilizzati come benefici del settore irriguo da introdurre nei modelli statico e intertemporale.

5.1. Modello demografico

5.1.1. Considerazioni generali

Nell'affrontare il problema delle previsioni demografiche occorre tener presente che spesso non è sufficiente la sola elaborazione previsionale tendente ad accertare la consistenza totale della popolazione, ma è necessario far ricorso a quegli schemi di calcolo che consentono una valutazione di importanti sottogruppi connessi alle caratteristiche demografiche cosiddette primarie, quali il sesso e l'età.

Il metodo che, in questi casi, va adoperato è quello analitico, che è stato, così, scelto per l'impostazione del modello. Detto metodo è basato su proiezioni, separatamente condotte, delle singole componenti dinamiche connesse all'evoluzione demografica, cioè:

- a) il movimento naturale per nascite e morti,
- b) il movimento migratorio per immigrazioni ed emigrazioni.

Le elaborazioni effettuate sono state articolate a livello comunale, relativamente alla popolazione residente per sesso e classi quinquennali di età, alla fine degli anni compresi tra il 1981 e il 2016.

L'analisi storica dei fenomeni demografici, preliminare alla definizione dei parametri del modello, è stata effettuata utilizzando tutti gli elementi conoscitivi disponibili relativamente al periodo 1951-1976, facendo riferimento prevalentemente ai dati anagrafici rilevati ed elaborati dall'ISTAT.

5.1.2. Lo schema di calcolo adoperato

Si è trattato di utilizzare – per ciascuna delle unità territoriali considerate e per ciascun sesso – una formula di calcolo di tipo ricorrente, le cui caratteristiche possono essere sintetizzate nel modo che segue. Se con t indichiamo un generico anno di previsione e con $P_{x, x+4}(t)$ l'ammontare della popolazione residente al 1° gennaio dell'anno t in età compresa tra x e $x + 4$ anni compiuti (per $x = 0,5, 10, \dots, 65$) (1), tale contingente darà luogo, a cinque anni di distanza, al gruppo in età $x + 5, x + 9$ che, in base alla ben nota equazione della popolazione, risulterà pari a:

$$P_{x+5, x+9}(t+5) = P_{x, x+4}(t) - m_{x, x+4}(t, t+4) + s_{x, x+4}(t, t+4) \quad [1]$$

(1) Anche se non esplicitamente indicato, il simbolo scritto – così come i seguenti – è da intendersi riferito a ciascuno dei due sessi.

dove $m_{x, x+4}(t, t+4)$ e $s_{x, x+4}(t, t+4)$ rappresentano rispettivamente il contingente dei decessi avvenuti nel quinquennio $(t, t+4)$ tra le età x e $x+4$ e il saldo migratorio nel quinquennio relativo ad individui appartenenti alle stesse classi di età. Si tenga presente che le età, in questo caso, sono da intendersi riferite anziché, come d'uso, al momento del verificarsi dell'evento (morte o migrazione), all'istante iniziale del quinquennio, cioè al 1° gennaio dell'anno t (1).

Entrambi gli aggregati ora definiti possono esprimersi in funzione del contingente iniziale della popolazione $P_{x, x+4}(t)$, cui vengono applicati opportuni tassi di mortalità e di migrazione. Più precisamente, si può scrivere:

$$s_{x, x+4}(t, t+4) = P_{x, x+4}(t) \cdot {}_5r_{x, x+4}^{t, t+4} \quad [2]$$

dove ${}_5r_{x, x+4}^{t, t+4}$ può essere definito come un tasso di «immigrazione netta» o, più brevemente, di «migrazione» riferito ad individui in età $(x, x+4)$ e ad una durata quinquennale, nonché alle condizioni di migratorietà relative al quinquennio $(t, t+4)$. Sarà inoltre

$$m_{x, x+4}(t, t+4) = [P_{x, x+4}(t) + \frac{1}{2}s_{x, x+4}(t, t+4)] \cdot {}_5q_{x, x+4}^{t, t+4} \quad [3]$$

rappresentando la quantità q la probabilità di morte riferita ad individui in età $(x, x+4)$ e ad una durata quinquennale, nonché alle condizioni di mortalità valide per il periodo $(t, t+4)$.

È da tener presente che la differenza formale di tale ultima espressione rispetto alla precedente risiede nel fatto che, al contrario del tasso r , la q è a rigore interpretabile come probabilità di morte determinata in modo «indipendente» (2) rispetto ai movimenti migratori.

Se quindi si sostituiscono le espressioni [2] e [3] nella [1], questa diviene:

$$\begin{aligned} P_{x+5, x+9}(t+5) &= P_{x, x+4}(t) \left[1 - {}_5q_{x, x+4}^{t, t+4} + {}_5r_{x, x+4}^{t, t+4} \frac{2 - {}_5q_{x, x+4}^{t, t+4}}{2} \right] = \\ &= P_{x, x+4}(t) \left[{}_5p_{x, x+4}^{t, t+4} + {}_5r_{x, x+4}^{t, t+4} \frac{1 + {}_5p_{x, x+4}^{t, t+4}}{2} \right] \end{aligned} \quad [4]$$

avendo indicato con il simbolo p il complemento all'unità della probabilità di morte, cioè la probabilità di sopravvivenza per una durata di cinque anni.

Volendo esprimere la relazione [4] in forma più compatta, si può scrivere:

$$P_{x+5, x+9}(t+5) = P_{x, x+4}(t) \cdot {}_5\tau_{x, x+4}^{t, t+4} \quad [5]$$

dove τ è quindi una combinazione della probabilità di sopravvivenza e del tasso di migrazione.

Si può notare come da un modello di tipo additivo – quale quello dell'equazione della popolazione – si è passati ad uno schema moltiplicativo che presenta, tra l'altro, il vantaggio di rendere formalmente identico il calcolo con o senza il movimento migratorio. In caso di previsioni che tengano conto della sola dinamica naturale, basterà, infatti, semplicemente porre il tasso r uguale a zero e, per conseguenza, la quantità τ pari alla probabilità di sopravvivenza.

(1) Con riferimento alla prima classe di età la [1] assume la forma:

$$P_{0, 4}(t+5) = n(t, t+4) - m_n(t, t+4) + s_n(t, t+4)$$

in cui $n(t, t+4)$ rappresenta il contingente di nati vivi del periodo $t, t+4$ ed m_n e s_n , rispettivamente, i decessi ed il saldo migratorio che competono a detto contingente.

(2) In merito alle definizioni di probabilità di eliminazione «dipendenti» e «indipendenti» si veda M.A. Coppini, *Tecnica delle assicurazioni sociali*, Veschi, Roma 1965.

L'applicazione dello schema di calcolo ora illustrato presuppone la determinazione dei parametri demografici che sono strettamente collegati all'analisi delle principali componenti del fenomeno demografico, quali la mortalità, la natalità e la migratorietà.

Le metodologie di analisi di tali componenti richiedono, quindi, una opportuna valutazione dei tassi specifici di sopravvivenza, di fecondità e d'immigrazione netta. Dei criteri adoperati per la determinazione di detti tassi specifici si darà, ora, cenno contestualmente alle metodologie di analisi delle singole componenti demografiche.

5.1.3. L'analisi delle componenti dei fenomeni demografici

A) La mortalità

Questo fenomeno viene analizzato attraverso la definizione delle probabilità «prospettive» di sopravvivenza che, non essendo definite tra età in anni compiuti, non possono ricavarsi direttamente da una tavola di mortalità, ma vanno desunte combinando opportunamente i valori di una funzione biometrica delle tavole.

Ricordando, infatti, il significato della funzione L (numero medio di individui appartenenti alla generazione fittizia di 100.000 nati vivi, di cui le tavole di mortalità descrivono il processo di graduale estinzione per effetto della mortalità, ancora in vita tra le età precise x e $x + 1$ (1)), può scriversi:

$${}_5P_{x, x+4} = \frac{L_{x+5} + L_{x+6} + L_{x+7} + L_{x+8} + L_{x+9}}{L_x + L_{x+1} + L_{x+2} + L_{x+3} + L_{x+4}} \quad [6]$$

Fondamentale risulta, allora, la definizione dei tassi di sopravvivenza. L'analisi storica ha permesso di individuare tre zone a livelli di mortalità sufficientemente differenziati. Si è, quindi, provveduto all'individuazione dei tassi, articolati per le tre zone territoriali e per sesso, con la seguente procedura:

- I) si è prima individuato un sistema di tassi di riferimento valido per tutto il territorio, l'uno valido per il primo quinquennio di previsione (1972-76) e l'altro da ritenersi come condizione limite di tendenza. A questo scopo, nel primo caso sono stati assunti i valori dei tassi desunti dalle attuali tavole di mortalità relative all'intera Italia meridionale; nel secondo caso quelli forniti dalle tavole di mortalità tipo, costruite dall'Università americana di Princeton;
- II) disponendo dei due tassi di riferimento validi per il primo e l'ultimo quinquennio di previsione, si è fatta passare per essi una curva di tipo logistico;
- III) si è provveduto ad articolare territorialmente i valori dei tassi calcolati, adoperando dei fattori correttivi costruiti relazionando i tassi storici locali a quelli tecnici determinati dai valori base per tutta l'area (media dell'area).

B) La natalità

L'insieme di individui che, nelle analisi previsionali, costituiscono il contingente relativo alla prima classe di età non sono altro che i sopravvivenuti (rispetto agli eventi morte e migrazione) alle varie epoche dei nati vivi corrispondenti. Tale entità può essere calcolata con la seguente formula:

(1) È noto che, a sua volta, L_x si calcola sulla base dei valori della funzione l_x (numero dei sopravvivenuti all'età precisa x). Se si ammette l'uniforme distribuzione dei decessi nell'ambito di ciascuna classe annuale di età, L_x risulterà pari alla media aritmetica semplice dei due successivi valori l_x e l_{x+1} cioè

$$L = \frac{l_x + l_{x+1}}{2}$$

L'ipotesi fatta è sufficientemente corretta per tutte le classi di età ad eccezione del primo anno di vita, nel quale i decessi si concentrano in gran parte nei primi giorni di vita. Per tener conto di ciò, generalmente si stima L_0 mediante la relazione $L_0 = (h - 1) l_0 + hl_1$, dove h rappresenta l'aliquota dei morti nei primi sei mesi di vita sul totale dei morti nel primo anno di vita.

$$n(t, t+4) = 5 \cdot \left[\frac{fP_{15,19}(t) + fP_{15,19}(t+5)}{2} \bar{q}_{F,15-19}^{t,t+4} + \frac{fP_{20,24}(t) + fP_{20,24}(t+5)}{2} \bar{q}_{F,20-24}^{t,t+4} + \dots + \frac{fP_{45,49}(t) + fP_{45,49}(t+5)}{2} \bar{q}_{F,45-49}^{t,t+4} \right] \quad [7]$$

dove $fP_{x,x+4}(t)$ e $fP_{x+5,x+9}(t+5)$ indicano rispettivamente la popolazione residente femminile in età $x, x+4$ e $x+5, x+9$ al 1° gennaio dell'anno t e al 1° gennaio dell'anno $t+5$ (e quindi la loro media aritmetica semplice costituisce una stima dell'ammontare della classe al 1° luglio dell'anno $t+2$), mentre $\bar{q}_{F,x,x+4}^{t,t+4}$ rappresenta il quoziente specifico di fecondità (nati vivi da donne in età $x, x+4$ per 1.000 donne della stessa classe di età) valido per il periodo $t, t+4$. La somma tra parentesi quadrata nell'espressione [7] fornisce ovviamente il numero medio di nascite annuali nel corso del quinquennio; per ottenere il numero complessivo, la somma suddetta va moltiplicata per cinque.

Per quanto attiene, poi, alla valutazione dei tassi di fecondità, anche per questi è stato adottato un modello previsionale variabile temporalmente e differenziato all'interno dell'area con la seguente procedura:

- I) si è preventivamente stabilito un criterio per passare direttamente dai tassi lordi di riproduzione ai quozienti specifici di fecondità per classi di età della madre. Ciò è stato effettuato sulla base delle condizioni di fecondità riscontrate nelle regioni italiane nel triennio 1973-75, considerando le coppie di valori tasso lordo di riproduzione e percentuale del tasso lordo spettante alle singole classi di età. Interpolando tali valori con una curva logistica, si è stati in grado di far corrispondere ad un qualsiasi valore del tasso di riproduzione una serie di valori percentuali, da cui si è risaliti ai quozienti di fecondità;
- II) si sono stimati i tassi di riferimento lordi di riproduzione relativamente al primo e all'ultimo quinquennio di previsione, applicando una sensibile diminuzione per il futuro dei tassi attuali;
- III) si sono determinati i fattori correttivi per le diverse aree territoriali in cui articolare la previsione (nove), relazionando i valori locali e quelli teorici che si otterrebbero applicando localmente il tasso lordo di riproduzione relativo all'intera area;
- IV) si sono determinati i tassi lordi di riproduzione articolati sul territorio interpolando i tassi di riferimento, valutati attraverso i fattori correttivi, con una funzione esponenziale; da questi, con il metodo descritto al punto 1), si è risaliti ai quozienti specifici di fecondità per classi di età della madre.

C) I fenomeni migratori

L'analisi dei fenomeni migratori implica lo studio delle cause socio-economiche che sono in grado di determinare quegli squilibri interregionali che presiedono al verificarsi di tali fenomeni.

Ciò, naturalmente, potrebbe essere fatto ricorrendo a opportuni modelli interpretativi delle realtà socio-economiche di relativa complessità ed esogeni agli schemi di calcolo qui presentati. L'approccio seguito, in questa analisi, è quello di introdurre nel modello alcuni parametri correttivi dei contingenti di popolazione relativi alle singole classi di età, che rappresentano gli effetti di una «propensione» migratoria relazionata alle ipotesi possibili sul grado di attivazione del fenomeno.

Tali ipotesi risultano congruenti con le realtà socio-economiche in atto e tendenzialmente prevedibili per i territori allo studio, valutate anche relativamente alle evoluzioni del fenomeno a livello nazionale.

Più precisamente si tratta di valutare il tasso di immigrazione netta $s_{x,x+4}^{t,t+4}$ mediante la relazione:

$$s_{x,x+4}^{t,t+4} = s_{P,x,x+4}^* \cdot s_{r,x,x+4}^{t,t+4} \quad [8]$$

in cui ${}_5r^{t,t+4}$ rappresenta il tasso globale di migrazione, mentre la quantità ${}_5p_{x,x+4}^*$ consiste in un coefficiente di adeguamento alla classe di età $(x, x + 4)$ supposto costante nel tempo e ottenuto sulla base di distribuzioni standard nel modo che verrà chiarito qui di seguito (1).

Trascurando d'ora innanzi, per brevità nella simbologia, la variabile temporale t , indicando le classi di età semplicemente con la lettera x , ed infine omettendo la durata quinquennale nel simbolo indicante il tasso di migrazione, è da rilevare che, se si dispone di una serie standard di tassi di immigrazione netta per età r_x^* , il saldo migratorio s_x che compete all'età x può essere calcolato nel modo che segue:

$$s_x = P_x r_x^* \frac{s}{s'} \quad [9]$$

rappresentando il simbolo s il saldo globale previsto ed s' il saldo cui condurrebbe la pura e semplice applicazione della serie di tassi standard, cioè:

$$s' = \sum_x P_x r_x^* \quad [10]$$

Se si introduce la distribuzione per età di una popolazione standard di ammontare P^* , il contingente P_x può essere approssimato nel modo seguente:

$$P_x = P_x^* \frac{P}{P^*}$$

in cui, come già detto, i simboli con asterisco sono da intendere riferiti a detta popolazione standard e quelli non asteriscati alla popolazione effettiva; per cui la [10] diviene:

$$s' = \frac{P}{P^*} \sum_x P_x^* r_x^*$$

Tenendo conto che è ovviamente $s = P r$, dopo qualche semplificazione la [9] diviene:

$$s_x = P_x r_x^* \frac{P^* r}{\sum_x P_x^* r_x^*}$$

Se si considera il tasso di immigrazione netta relativo alla serie standard ed alla popolazione standard:

$$r^* = \frac{\sum_x P_x^* r_x^*}{P^*}$$

si ottiene infine la relazione:

$$s_x = P_x \frac{r_x^*}{r^*} r$$

che giustifica pienamente l'espressione [8] ove si introduca il coefficiente:

$$p_x^* = \frac{r_x^*}{r^*}$$

e si ricordi l'eguaglianza $s_x = P_x r_x$ cioè la [2].

(1) L'asterisco nel simbolo serve ad indicare che ci si riferisce ad una distribuzione standard.

Per la determinazione del tasso di immigrazione netta, a differenza di quanto effettuato per la mortalità e la fecondità, l'articolazione territoriale per le previsioni non è stata effettuata raggruppando il territorio in zone omogenee (3 per la mortalità, 9 per la fecondità), bensì la previsione è stata attuata comune per comune. Il tasso migratorio globale è stato riferito a tre periodi 1972-76, 1977-91, 1992-2016. Per il primo periodo si sono utilizzati i dati desumibili dalle iscrizioni e cancellazioni anagrafiche.

Per il secondo periodo si è utilizzata una valutazione basata sulla componente tendenziale che risulta dall'analisi storica. Per l'ultimo periodo si è supposta una legge decrescente lineare che portasse all'annullamento del tasso in corrispondenza dell'ultimo quinquennio di previsione.

5.1.4. Uso del modello

Il modello demografico è risultato utilissimo in diverse fasi della valutazione della domanda di acqua.

Innanzitutto, l'elaborazione dei dati previsionali ha consentito di effettuare le valutazioni circa i fabbisogni idropotabili dell'area interessata e per i traguardi temporali previsti.

Tali fabbisogni, infatti, risultano determinabili in base alla popolazione prevista per i vari centri abitati, applicando gli standards di consumo che sono, a loro volta, fissati attraverso opportune analisi quantitative (dimensione) e qualitative (servizi offerti) effettuate sulle caratteristiche dei centri stessi.

Nella tabella 5.1 sono riportate le previsioni di fabbisogno idrico, per sistema idrico e regione, ottenute in relazione ad alcune delle ipotesi utilizzate per la determinazione degli standards di prelievo idrico.

Nella tabella 5.2 sono, invece, riportati in sintesi i risultati, per province, regioni e sistemi idrici, delle due fondamentali elaborazioni previsionali del modello demografico: una ottenuta in base al solo movimento naturale e l'altra tenendo conto delle ipotesi fatte circa i movimenti migratori.

Tali elaborazioni assumono un ruolo rilevante nella definizione delle alternative di sviluppo socio-economico-territoriale, che sono state evidenziate in alcuni scenari possibili, al fine di avere un quadro di riferimento per la determinazione di tutti i fabbisogni idrici.

Più in particolare risultano determinanti, ad esempio, nelle valutazioni circa i bacini della forza lavoro e, quindi, essenziali per definire i possibili assetti produttivi e le ipotesi sulla rispettiva evoluzione nel tempo.

Infine, il modello costituisce un valido strumento di pianificazione nello sviluppo delle attività progettuali, quale parametro di controllo di tutta una serie di variabili che hanno influenza, dinamicamente nel tempo, sul fabbisogno idrico nei diversi settori di uso, ma anche di quelle più prettamente relazionate alla realizzazione degli interventi operativi.

5.2. Uso razionale dell'acqua nel settore irriguo

5.2.1. Il problema della determinazione del valore della risorsa acqua impiegata nei comprensori irrigui è risolvibile facendo ricorso ad un modello matematico (cfr. 19) per la ricerca degli ordinamenti produttivi di massima convenienza nei singoli comprensori omogenei che sono individuati sul territorio.

L'unità di riferimento, il comprensorio irriguo, appunto, risulta omogenea sia rispetto alle caratteristiche agro-pedologiche dei terreni, sia rispetto agli schemi idrici di possibile approvvigionamento.

Questa particolare condizione di omogeneità rende la taglia dei comprensori molto spesso eccessivamente ridotta territorialmente, affinché la significatività economica delle analisi da effettuare risulti soddisfacente.

Per questo motivo sembra non opportuno l'uso di strumenti modellistici particolarmente raffinati e di massimo dettaglio, mentre risulta più conveniente, dato l'ordine dell'approssimazione in cui necessariamente ci si deve muovere, adoperare uno strumento semplificato e, al tempo stesso, estremamente flessibile.

In tal modo è possibile, infatti, compensare parzialmente le semplificazioni imposte con l'opportunità di vagliare, con maggiore precisione, la sensibilità del modello ai parametri utilizzati, data la rapidità d'uso che un modello semplificato ha rispetto ad altri più sofisticati.

Tabella 5.1 - Previsione del fabbisogno idropotabile urbano giornaliero articolato per sistemi idrici e regioni all'anno 2016

Ambito territoriale	Popolazione residente			Presenze giornalieri nel mese di punta	Fabbisogno turistico metri cubi/giorno	Fabbisogno civile			Fabbisogno globale		
	Previsione con solo movimento naturale	Previsione con solo movimento migratorio				Ipotesi P (metri cubi/giorno)	Ipotesi C1 (metri cubi/giorno)	Ipotesi C2 (metri cubi/giorno)	Ipotesi P (metri cubi/giorno)	Ipotesi C1 (metri cubi/giorno)	Ipotesi C2 (metri cubi/giorno)
		Tendenziale	Programmatico regionale								
Sistemi idrici											
Tronto	170.920	179.726	—	50.180	16.993,00	82.673,14	71.306,43	67.410,98	99.666,14	88.299,43	84.403,98
Velino	48.374	43.450	—	161.850	56.647,50	15.046,40	13.759,74	13.226,86	71.693,90	70.407,24	69.874,36
Abruzzo Nord	837.422	918.575	—	377.370	128.292,00	434.696,43	372.473,23	350.982,28	562.988,43	500.765,23	479.274,28
Abruzzo Sud	319.324	319.732	67.150	191.170	65.484,50	123.715,00	111.498,95	106.945,99	189.199,50	176.983,45	172.430,49
Biferno	226.515	243.919	282.900	60.765	20.662,75	118.640,70	103.918,80	98.681,40	139.303,45	124.581,55	119.344,15
Pontino	665.671	801.490	—	379.820	124.587,00	383.580,82	328.510,26	309.900,58	508.167,82	453.097,26	434.487,58
Liri-Garigliano	747.253	786.069	—	320.895	110.638,25	352.239,55	305.099,55	288.782,39	462.877,80	415.737,80	399.420,64
Volturno	6.320.881	6.560.390	83.050	597.895	204.323,25	3.355.819,57	2.832.590,13	2.662.587,44	3.560.142,82	3.036.913,38	2.866.910,69
Sele	829.766	856.167	—	441.115	147.935,25	400.521,91	343.923,56	324.391,89	548.457,16	491.858,81	472.327,14
Regioni											
Marche	170.920	179.726	—	50.180	16.993,0	82.673,14	71.306,43	67.410,98	99.666,14	88.299,43	84.403,98
Abruzzo	1.233.162	1.314.296	—	661.515	226.707,8	588.884,55	509.726,50	482.085,60	815.592,30	736.434,25	708.793,35
Lazio	1.282.394	1.460.309	—	679.540	228.546,5	679.829,72	585.032,35	552.701,54	908.376,22	813.578,85	781.248,04
Molise	352.390	376.539	433.100	143.645	49.280,8	174.273,90	153.854,40	146.470,20	223.554,65	203.135,15	195.750,95
Campania	7.127.260	7.378.648	—	1.046.180	354.035,5	3.741.272,20	3.163.160,97	2.974.241,47	4.095.307,70	3.517.196,47	3.328.276,97
Area del progetto speciale n. 29	10.166.126	10.709.518	433.100	2.581.060	875.563,5	5.266.933,51	4.483.080,65	4.222.909,80	6.142.497,01	5.358.644,15	5.098.473,30

Tabella 5.2 - Popolazione residente nell'area considerata prevista con solo movimento naturale e con movimento migratorio alla fine di alcuni anni. Ammontare e incrementi assoluti

Regioni e sistemi	Ammontare al 1991		Ammontare al 2001		Ammontare al 2016		Incrementi assoluti al 1976-1991		Incrementi assoluti al 1991-2001		Incrementi assoluti al 2001-2016	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Regioni												
LAZIO MERIDIONALE												
Latina	470.730	503.976	498.918	554.066	516.103	586.811	+ 51.664	+ 84.910	+ 28.188	+ 50.090	+ 17.085	+ 32.745
Frosinone	481.969	496.896	493.940	522.417	494.728	532.405	+29.209	+ 44.136	+ 11.971	+ 25.521	+ 788	+ 9.988
ABRUZZO												
L'Aquila	308.597	311.016	308.376	315.684	300.343	310.620	+ 7.468	+ 9.887	- 221	+ 4.668	- 8.033	- 5.064
Teramo	278.429	283.035	281.714	291.600	274.939	288.070	+ 10.720	+ 15.326	+ 3.285	+ 8.565	- 6.775	- 3.530
Pescara	299.478	320.995	303.986	342.294	297.358	346.395	+ 13.773	+ 35.290	+ 4.508	+ 21.299	- 6.628	+ 4.101
Chieti	374.861	376.320	374.481	380.441	360.522	369.211	+8.830	+ 10.289	- 380	+ 4.121	- 13.959	- 11.230
Totale	1.261.365	1.291.366	1.268.557	1.330.019	1.233.162	1.314.296	+ 40.791	+ 70.792	+ 7.192	+ 38.653	- 35.395	- 15.723
MOLISE												
Isernia	99.554	100.927	102.486	107.010	105.032	112.151	+ 4.884	+ 6.257	+ 2.932	+ 6.083	+ 2.546	+ 5.141
Campobasso	245.434	250.136	249.326	261.407	247.358	264.388	+ 9.500	+ 14.202	+ 3.894	+ 11.271	- 1.968	+ 2.981
Totale	344.988	351.063	351.812	368.417	352.390	376.539	+ 14.384	+ 20.459	+ 6.824	+ 17.354	+ 578	+ 8.122
CAMPANIA												
Caserta	839.004	835.736	913.431	917.548	987.616	997.302	+ 109.496	+ 106.228	+ 74.427	+ 81.812	+ 74.185	+ 79.754
Benevento	317.831	307.010	336.298	323.603	355.852	341.899	+ 25.229	+ 14.408	+ 18.467	+ 16.593	+ 19.554	+ 18.296
Napoli	3.342.434	3.448.347	3.667.228	3.853.258	3.996.245	4.245.103	+ 471.086	+ 576.999	+ 324.794	+ 404.911	+ 329.017	+ 391.845
Avellino	482.908	468.260	513.857	498.999	546.410	531.503	+ 44.997	+ 30.349	+ 30.949	+ 30.739	+ 32.553	+ 32.504
Salerno	1.118.295	1.118.356	1.186.817	1.199.158	1.241.137	1.262.655	+ 114.868	+ 114.929	+ 68.522	+ 80.802	+ 54.320	+ 63.497
Totale	6.100.472	6.177.709	6.617.631	6.792.566	7.127.260	7.378.648	+ 765.676	+ 842.913	+ 517.159	+ 614.857	+ 509.629	+ 586.082
Sistemi idrici												
Tronto	180.623	184.436	179.895	186.894	170.920	179.726	+ 4.884	+ 8.697	- 728	+ 2.458	- 8.975	- 7.168
Velino	53.747	50.083	51.972	47.508	48.374	43.450	- 1.626	- 5.290	- 1.775	- 2.575	- 3.598	- 4.058
Abruzzo Nord	853.285	887.421	860.040	922.962	837.442	918.575	+ 28.965	+ 63.101	+ 6.755	+ 35.541	- 22.598	- 4.387
Abruzzo Sud	334.502	331.192	332.615	331.702	319.324	319.732	+ 5.015	+ 1.699	- 1.893	+ 510	- 13.291	- 11.970
Biferno	223.756	228.885	227.641	240.120	226.515	243.919	+ 8.292	+ 14.021	+ 3.885	+ 11.235	- 1.126	+ 3.799
Pontino	603.344	666.120	641.724	746.953	666.671	801.490	+ 69.783	+ 132.559	+ 38.380	+ 80.833	+ 24.947	+ 54.537
Garigliano	724.422	737.842	744.203	772.842	747.253	786.069	+ 48.612	+ 62.032	+ 19.781	+ 35.000	+ 3.050	+ 13.227
Volturno	5.348.900	5.429.163	5.830.722	6.000.071	6.320.881	6.560.390	+ 698.960	+ 779.223	+ 481.822	+ 570.908	+ 490.159	+ 560.319
Sele	770.429	774.105	807.449	824.045	829.766	856.167	+ 67.655	+ 71.331	+ 37.020	+ 49.940	+ 22.317	+ 32.122
Area totale	19.093.014	9.289.247	9.676.261	10.073.097	10.166.126	10.709.518	+ 931.140	+ 1.127.373	+ 583.247	+ 783.850	+ 489.865	+ 636.421

A = previsioni con solo movimento naturale - B = previsioni con movimento migratorio

5.2.2. Il modello prescelto

Il modello matematico prescelto ricerca, quindi, note a priori le colture possibili nel comprensorio irriguo, gli ordinamenti produttivi compatibili con le risorse «scarse» a disposizione. Queste risorse limitate vengono individuate in Terra, Acqua e Lavoro.

Tale ricerca viene finalizzata al perseguimento dell'obiettivo di conseguire il massimo valore aggiunto possibile della produzione.

Le produzioni possibili devono, inoltre, rispettare quella che è la struttura del mercato presente nei territori in esame, al fine di equilibrare gli ordinamenti prescelti rispetto alle quantità ammissibili con le locali possibilità commerciali dei singoli prodotti.

Infine, per meglio rappresentare le relazioni esistenti tra i fattori produttivi e le possibilità colturali, il modello, che opera su base annuale, è suddiviso in sei periodi colturali.

Il modello, fin qui sommariamente descritto, viene formulato secondo il seguente problema di programmazione matematica:

$$V = \sum_i Q_i P_i - CM - CMT = \text{MAX} \quad [11]$$

$$\sum_i m_i Q_i = CM \quad [12]$$

$$\sum_i z_i Q_i = CMT \quad [13]$$

$$\sum_{i \in I} s_{i,t} Q_i \leq S_t \quad \text{per ogni } t \quad [14]$$

$$\sum_{i \in R} s_{i,t} Q_i \leq SR_t \quad \text{per ogni } t \quad [15]$$

$$\sum_i a_{i,t} Q_i \leq A_t \quad \text{per ogni } t \quad [16]$$

$$\sum_t A_t = A \quad [17]$$

$$\sum_i l_{i,t} Q_i \leq L_t \quad \text{per ogni } t \quad [18]$$

$$Q_i \leq \bar{Q}_i \quad \text{per ogni } i \quad [19]$$

$$Q_i \geq \bar{Q}_i \quad \text{per ogni } i \quad [20]$$

dove i simboli hanno il seguente significato:

- Q_i = quantità annue prodotte della coltura i-esima
- p_i = prezzo unitario (quintale) del prodotto della coltura i-esima
- CM = costo complessivo dei macchinari impiegati per la produzione realizzata nell'anno
- CMT = costo complessivo dei mezzi tecnici impiegati per la produzione realizzata nell'anno
- m_i = costo unitario dei macchinari impiegati per la produzione conseguibile a livello unitario dalla coltura i-esima
- z_i = costo unitario dei mezzi tecnici impiegati per la produzione conseguibile a livello unitario per la coltura i-esima
- $s_{i,t}$ = coefficiente di occupazione unitaria della superficie necessaria per attivare la produzione unitaria della coltura i-esima riferito al periodo t (inverso della resa per unità di superficie)
- S_t = superficie complessivamente a disposizione per coltivazioni integranti nel periodo t
- SR_t = superficie complessivamente a disposizione per coltivazioni ripetute nel periodo t
- $a_{i,t}$ = coefficiente di fabbisogno idrico per unità di produzione della coltura i-esima riferito al periodo t
- A_t = disponibilità idrica complessiva per il periodo t
- A = disponibilità idrica complessiva per l'anno di coltivazione

- $l_{i,t}$ = coefficiente di impiego di ore di lavoro umano necessarie nel periodo t per ottenere una unità di prodotto della coltura i -esima
- L_t = ore complessive di lavoro possibili nel periodo t per le produzioni del comprensorio
- Q_i = quantità minima producibile annualmente della coltura i -esima (vincolo minimo di mercato)
- Q_i = quantità massima producibile annualmente della coltura i -esima (vincolo massimo di mercato);

e sono dati i seguenti insiemi: I = insieme delle colture integranti e R = insieme delle colture ripetute.

Il modello consta di una funzione obiettivo e di 27 relazioni vincolari, cioè le equazioni [12] - [18], alle quali si aggiungono i vincoli di mercato (equazioni [19] e [20]), che variano in relazione alle colture attivabili nei singoli comprensori, da un minimo di 35 ad un massimo di 49. Si ottiene così un complesso di vincoli variabile tra 52 e 76.

Le relazioni [12] e [13] hanno lo scopo di definire i costi per macchinari e mezzi tecnici che entrano nel computo del valore aggiunto, utilizzato come funzione obiettivo, sottraendoli al valore della produzione vendibile rappresentato dalla sommatoria presente nella [11]. Le relazioni [14] e [15] rappresentano i vincoli di superficie coltivabile per l'insieme delle colture di tipo integrante e ripetute. Il vincolo [16] stabilisce che il fabbisogno irriguo delle colture del comprensorio, attivate nei diversi periodi di tempo, rappresentato dall'espressione al primo membro, deve essere inferiore o, al più, uguale alla quantità d'acqua disponibile negli stessi periodi.

La relazione [17] individua la quantità d'acqua complessivamente a disposizione nell'arco dell'anno. La relazione [18] stabilisce il vincolo sulla quantità di lavoro utilizzabile nei diversi periodi di tempo considerati. Le relazioni [19] e [20] rappresentano, invece, i vincoli di mercato.

5.2.3. Le ipotesi fatte per l'elaborazione del modello

Le ipotesi circa i parametri e la struttura del modello poste a base delle elaborazioni effettuate sono state le seguenti:

- il modello individua le colture di massima convenienza rispetto ad un anno di riferimento, a regime, suddiviso in sei sottoperiodi 1) Aprile-Maggio, 2) Giugno, 3) Luglio, 4) Agosto, 5) Settembre-Ottobre, 6) Novembre-Marzo;
- tutti i parametri di costo e di produzione sono valutati al 1980;
- il modello è finalizzato alla valutazione dell'effetto dell'acqua nei comprensori agricoli indipendentemente dai costi della trasformazione irrigua; pertanto di detti costi, pubblici o privati, non si tiene conto nella determinazione del valore aggiunto prodotto, che risulta, quindi, al netto dei soli costi per macchinari e mezzi tecnici connessi con le produzioni possibili;
- i vincoli di mercato sono stati posti in relazione alle produzioni attuali dei singoli comprensori, mentre per quelle possibili, ma non in atto, ci si è riferiti ai livelli di produzione presenti in quei comprensori, geograficamente limitrofi, dove la coltura risulta praticata. Con riferimento, quindi, a dette produzioni si è determinato un intervallo possibile di variazione, con valori diversificati per classi di colture. Più precisamente, si è posta, per le colture arboree una variazione percentuale complessiva intorno al $\pm 15\%$ delle produzioni di riferimento; per le colture industriali, il campo di variazione va dal -70% al $+100\%$ delle produzioni di riferimento, mentre per tutte le altre colture le percentuali sono $\pm 100\%$. Le colture possibili, ma non in atto, hanno, poi, sempre un vincolo di minimo pari a zero;
- l'insieme delle colture ripetute è stato scelto in base alle pratiche in atto nei singoli comprensori e in quelli omogenei, a livello agro-pedologico, considerati più evoluti dal punto di vista irriguo;
- il vincolo delle ore lavorative a disposizione nell'anno è stato fissato in relazione ai bacini di forza lavoro previsti nelle aree in esame, considerando una incidenza di impiego del lavoro umano riferita ai comprensori agricoli più evoluti. Nelle elaborazioni effettuate, tale vincolo, risulta, però, non essere stringente;
- il vincolo sul fabbisogno idrico è stato posto a livello annuale; nessun vincolo è stato posto circa la ripartizione dello stesso fabbisogno all'interno dell'anno. In pratica, si ipotizza non vincolata la capacità di regolazione della risorsa, all'interno dell'anno, da parte degli schemi idrici di cui i comprensori irrigui fanno parte.

5.2.4. La procedura per la valutazione dell'effetto dell'acqua

Al fine di ricercare la curva che descrive il valore dell'acqua al variare della disponibilità idrica, si è utilizzato più volte il programma lineare precedentemente illustrato facendo variare di volta in volta il vincolo sulla risorsa idrica annua a disposizione.

Si è, in altre parole, parametrizzato il vincolo afferente alla quantità d'acqua a disposizione per le colture irrigue del comprensorio e si sono, di volta in volta, determinate le soluzioni corrispondenti.

Per ciascuna delle soluzioni trovate si è così potuto valutare sia il beneficio direttamente conseguibile ad un fissato livello di risorsa idrica, beneficio misurabile in termini del valore aggiunto prodotto in corrispondenza dei livelli di produzione raggiunti, sia la produttività marginale della risorsa impiegata in termini del «prezzo ombra» del vincolo sulla risorsa idrica, come risulta dalla risoluzione del problema duale associato al programma lineare utilizzato.

Di entrambe le grandezze si è descritta la curva relativa in funzione della risorsa idrica impiegata, parametrizzandola a partire da un valore prossimo a quella attualmente utilizzata, fino a raggiungere un valore di saturazione, attraverso dodici soluzioni intermedie, secondo un opportuno passo, per un totale di quattordici soluzioni di riferimento.

Ciò è stato effettuato con l'ausilio del codice di elaborazione elettronica MPSX per la soluzione di problemi di P.L. (programmazione lineare), che, come è noto, fornisce automaticamente insieme alla risoluzione del problema diretto anche quella del suo duale.

Nelle tabelle che seguono vengono illustrati alcuni dei risultati ottenuti con l'uso del modello. Nelle tabelle 5.3 e 5.4 vengono presentati i risultati di sintesi per i sistemi idrici adoperati nelle analisi modellistiche effettuate; i dati si riferiscono agli assetti finali determinati dal modello confrontati con quelli in atto sia in termini del valore del beneficio conseguibile (valore aggiunto, tab. 5.3), che in relazione alla distribuzione delle colture attivabili nelle due situazioni produttive (tab. 5.4).

Seguono, poi, alcune tabelle esemplificative dei risultati ottenuti per ognuno dei 32 comprensori omogenei in cui è stato suddiviso il territorio (i dati si riferiscono al comprensorio della piana di Fondi). Dette tabelle mostrano l'andamento di alcune grandezze caratteristiche delle soluzioni del modello, ottenute parametrizzando il vincolo sulla risorsa idrica disponibile per il comprensorio (tab. 5.5) e del corrispondente mix produttivo conseguibile (tab. 5.6). La fig. 5.1 mostra, invece, la curva «tipica» del valore complessivo di beneficio conseguibile al variare del vincolo posto sulla risorsa.

Tabella 5.3 - Modello di ottimizzazione del settore agricolo.
Valori attuali previsti e incremento del valore aggiunto nella soluzione a lungo termine per sistema idrico

Sistemi idrici	Valori attuali			Valori previsti			
	Valore aggiunto	Superficie agricola utilizzata	Valore aggiunto per ettaro	Valore aggiunto	Superficie agricola utilizzata	Valore aggiunto per ettaro	Incremento del valore aggiunto per ettaro
	(milioni di lire)	(ettari)	(milioni di lire)	(milioni di lire)	(ettari)	(milioni di lire)	(milioni di lire)
Tronto-Abruzzo Nord	95.137	83.100	1,145	231.367	83.100	2,784	1,639
Abruzzo Sud-Biferno	56.070	67.659	0,829	160.237	67.659	2,368	1,539
Fucino	41.224	23.830	1,730	58.545	23.830	2,457	0,727
Pontino-Liri Garigliano	195.897	158.919	1,233	462.304	158.919	2,909	1,676
Velino	3.141	3.990	0,787	4.741	3.990	1,188	0,401
Volturno	762.579	210.500	3,623	1.322.606	210.500	6,283	2,660
Sele	192.903	67.249	2,868	479.301	67.249	7,127	4,259
Totale	1.346.951	615.247	2,189	2.719.101	615.247	4,420	2,231

**Tabella 5.4 - Modello di ottimizzazione del settore agricolo.
Ripartizione percentuale della superficie agricola utilizzata iniziale e finale delle colture per sistema idrico**

Sistemi idrici	Iniziale				Finale			
	Fruttiferi	Ortive	Industriali	Forag- gere e asciutte	Fruttiferi	Ortive	industriali	Forag- gere e asciutte
Tronto-Abruzzo Nord	19,34	17,30	9,62	53,74	19,72	31,77	11,96	36,55
Abruzzo Sud-Biferno	7,72	4,30	7,88	80,09	9,61	24,07	13,16	53,16
Fucino	—	17,46	22,12	60,42	—	30,87	12,09	57,04
Pontino-Liri Garigliano	16,42	18,81	14,69	50,08	15,82	37,27	17,93	28,97
Velino	4,89	4,16	28,24	62,70	6,52	21,70	23,76	48,02
Volturno	21,03	6,92	25,14	46,90	21,70	16,37	26,17	35,77
Sele	27,64	7,67	15,85	48,84	24,21	25,97	16,95	32,88

Figura 5.1 - Curva del valore aggiunto prodotto in funzione dell'acqua utilizzata per il comprensorio irriguo della piana di Fondi.

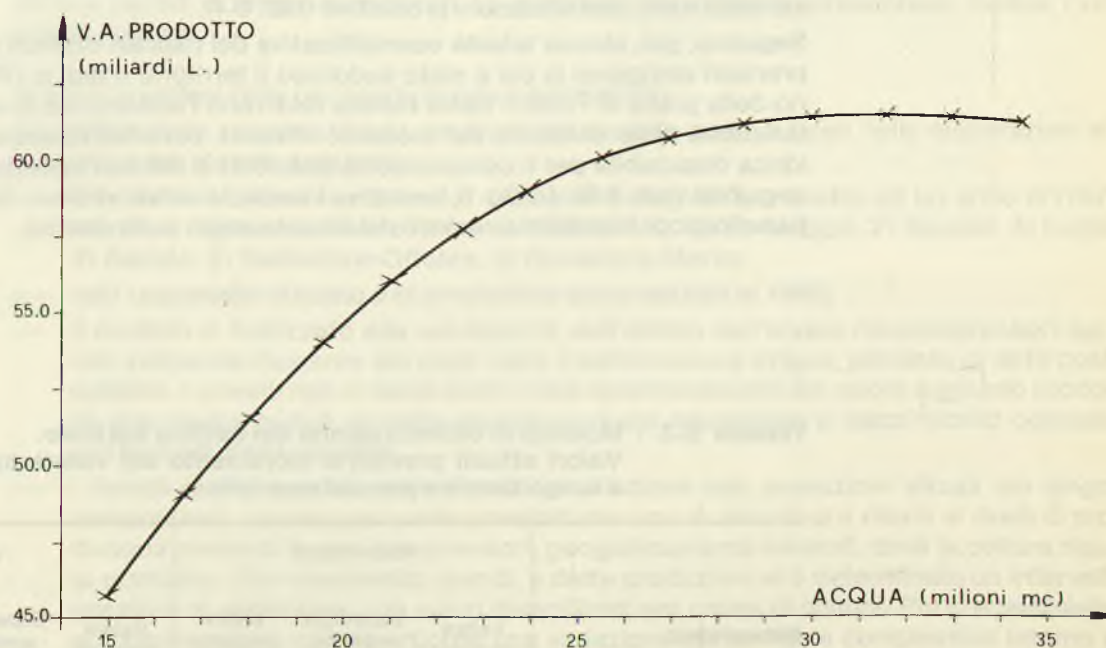


Tabella 5.5 - Alcune grandezze caratteristiche delle soluzioni del modello di ottimizzazione del settore agricolo ottenute al livello di comprensorio (Piana di Fondi) al variare del vincolo sulla risorsa d'acqua

Grandezza caratteristica	Parametrizzazione													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Disponibilità idrica annua (valori in milioni di metri cubi)	15,00	16,50	18,00	19,50	21,00	22,50	24,00	25,50	27,00	28,50	30,00	31,50	33,00	34,50
Valore aggiunto prodotto (milioni di lire)	45.526,13	48.814,89	51.581,33	54.052,59	56.192,70	57.650,79	58.748,37	59.669,59	60.304,50	60.771,99	61.018,37	61.077,74	61.077,74	61.077,74
Prodotto lordo (milioni di lire)	66.613,10	71.431,49	75.077,71	77.848,77	80.356,70	82.206,46	83.583,15	84.758,51	85.423,26	86.024,84	86.366,53	86.471,37	86.471,37	86.471,37
Costo macchine (in milioni di lire)	4.896,89	5.075,52	5.279,71	5.430,94	5.526,11	5.748,56	5.871,98	6.011,56	6.026,88	6.041,68	6.073,38	6.096,73	6.096,73	6.096,73
Costo mezzi tecnici (in milioni di lire)	16.190,08	17.541,09	18.216,67	18.365,24	18.637,90	18.807,10	18.962,80	19.077,35	19.091,88	19.211,18	19.274,78	19.296,89	19.296,89	19.296,89
Costo del lavoro (in milioni di lire)	11.313,35	16.640,36	18.817,30	18.817,30	18.915,72	18.941,50	19.019,26	19.019,26	19.019,26	19.126,35	19.554,71	19.590,58	19.590,58	19.590,58
Costi complessivi di produzione (in milioni di lire)	32.400,31	39.256,96	42.313,68	42.613,48	43.079,72	43.497,17	43.854,04	44.108,18	44.138,02	44.379,20	44.902,87	44.984,20	44.984,20	44.984,20
Occupazione stabile potenziale	1.208,69	1.777,82	2.010,40	2.010,40	2.020,91	2.023,66	2.031,97	2.031,97	2.031,97	2.043,41	2.089,18	2.093,01	2.093,01	2.093,01
Superficie agricola utilizzata (S.A.U.-ettari)	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00	7.069,00
Superficie ripetuta (ettari)	—	—	—	—	195,50	738,60	817,20	1.376,20	1.187,69	1.125,77	1.457,51	1.476,77	1.476,77	1.476,77
S.A.U. irrigata (ettari)	3.789,83	4.189,65	4.589,81	5.028,79	5.416,69	5.265,94	5.558,71	5.359,90	5.672,04	5.978,38	5.867,80	5.930,71	5.930,71	5.930,71
Fabbisogno idrico annuo (in milioni di metri cubi)	15,00	16,50	18,00	19,50	21,00	22,50	24,00	25,50	27,00	28,50	30,00	30,50	30,50	30,50
Fabbisogno idrico medio annuo per ettaro S.A.U. (in metri cubi)	2.121,94	2.334,13	2.546,33	2.758,52	2.970,72	3.182,91	3.395,11	3.607,30	3.819,49	4.031,69	4.243,88	4.315,10	4.315,10	4.315,10
Valore aggiunto prodotto per ettaro S.A.U. (in milioni di lire)	6,44	6,91	7,30	7,65	7,95	8,16	8,31	8,44	8,53	8,60	8,63	8,64	8,64	8,64
Valore aggiunto prodotto per unità lavorativa (in milioni di lire)	37,67	27,46	25,66	26,89	27,81	28,49	28,91	29,37	29,68	29,74	29,21	29,18	29,18	29,18
Valore aggiunto prodotto per metro cubo d'acqua utilizzato (lire)	3.035,08	2.958,48	2.865,63	2.771,93	2.675,84	2.562,26	2.447,85	2.339,98	2.233,50	2.132,35	2.033,95	2.002,32	2.002,32	2.002,32

6 i modelli idrologici

- modello statistico
- modello deterministico
- analisi integrata tra risorse superficiali e sotterranee

6.1. Introduzione

Lo scopo di questo capitolo è quello di fornire una breve rassegna di quanto più recente ed esteso è lo stato di conoscenza per lo studio idrologico osservato.

Si considerano come sezioni di interesse quelle in cui sono disponibili parecchi anni di dati osservati e controllati della qualità delle acque e per le quali non si sono avuti né misure di portata osservate, né definite sezioni di misura quelle in cui sono disponibili solo le misure delle portate osservate.

Il sistema è considerato unidimensionale, come un canale fittizio e vengono trascurate tutte le interazioni spaziali e temporali tra i diversi elementi del sistema.

È escluso l'aspetto relativo al comportamento di oggetti artificiali, come dighe e bacini di accumulo, che sono stati della conoscenza di alcune sezioni, essendo di interesse solo l'aspetto idrologico osservato.

Come

$$\begin{aligned}
 \frac{dQ}{dt} &= I - E - Q \\
 \frac{dS}{dt} &= I - E - Q - \frac{dS}{dt}
 \end{aligned}$$

Come

- I = l'ingresso delle portate di pioggia (o neve) in un punto di misura;
- E = l'uscita delle acque di superficie (evaporazione, infiltrazione);
- Q = l'uscita delle portate percolate (e superficiali) dal bacino, osservate, come portate di un canale fittizio.

La rappresentazione delle funzioni di trasferimento è la sua forma più complessa e più difficilmente controllabile per la complessità del modello del sistema.

6.1.1. Funzione di trasferimento

È una equazione che descrive la relazione tra l'input e l'output di un sistema, con l'eventuale errore possibile, l'effetto di un input considerato come funzione di tempo in un sistema dinamico. Tale rappresentazione, caratterizzata da un ritardo di tempo (predefinito), si basa sulla conoscenza dei vari dati osservati e misurati del sistema, analizzato in esame.

Per questo è importante sapere come funziona, per il sistema, i vari parametri (risorse, caratteristiche del sistema) e come si comportano nel tempo, per poter prevedere, in modo accurato, il suo comportamento futuro, per un periodo di tempo, che può essere molto lungo.

I modelli idrologici

La modellistica adoperata nel campo della valutazione dei dati idrologici per i diversi bacini idrografici (vedi fig. 6.1) è stata caratterizzata da differenti approcci metodologici.

Sono stati utilizzati modelli di tipo sia probabilistico che deterministico; in quest'ultimo ambito le differenze di metodo si riferiscono soprattutto al grado di dettaglio considerato nel valutare le integrazioni tra risorse superficiali e sotterranee.

Più in particolare, si è utilizzato uno schema statistico per i bacini del Liri-Garigliano e del Volturno, essenzialmente deterministico per quelli del Sele e per quelli afferenti ai sistemi idrici Abruzzo Sud, e Abruzzo Nord, sia pure con caratteristiche diverse dettate dai particolari tipi di bacino allo studio.

Tutti i modelli sono inoltre, in vario grado, dei modelli integrati di risorse superficiali e sotterranee. Queste si limitano però alle sole sorgenti, eccetto che per il modello utilizzato per il sistema Abruzzo Nord, per il quale l'analisi delle risorse sotterranee è assai più rilevante e dettagliata, anche se pur sempre finalizzata alla quantificazione dei deflussi superficiali.

6.1. Modello statistico

Lo scopo del modello è quello di ricavare una serie mensile di portate per almeno un trentennio, in sezioni di «interesse» per le quali non esistono osservazioni.

Sono definite come sezioni di interesse quelle in cui sono individuate possibili utilizzazioni, regolazioni o controllo della qualità delle acque e per le quali non vi siano serie di misure di portata attendibili; sono definite sezioni di misura quelle in cui siano disponibili serie di misura delle portate attendibili.

Il sistema è suddiviso in sottobacini, sottesi da ciascuna sezione e compresi tra la sezione stessa e quelle immediatamente a monte.

Il modello proposto determina il comportamento di ciascun sottobacino, cercando la funzione di trasferimento che, sulla base della conoscenza di alcune variabili, permette di determinarne altre considerate dipendenti.

Cioè:

$$I (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow F \rightarrow U (y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \uparrow \\ K (k_1, k_2, \dots, k_l) \quad [1]$$

dove:

I è l'insieme delle variabili di ingresso (nel caso specifico gli afflussi);

U è l'insieme delle variabili di uscita (nel caso specifico i deflussi);

K è l'insieme dei caratteri geomorfologici e pedologici del bacino considerati come parametri della relazione funzionale.

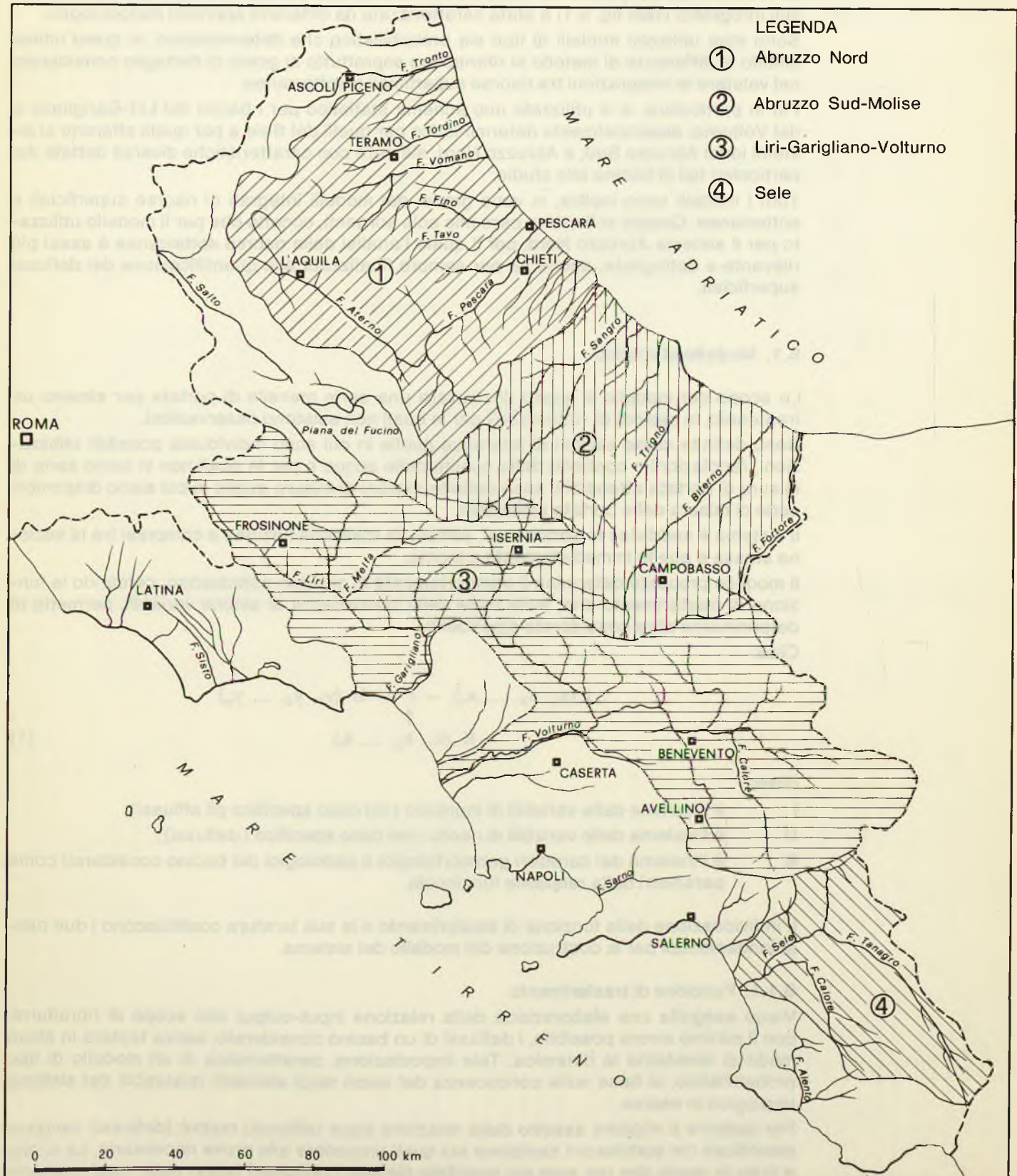
L'individuazione della funzione di trasferimento e la sua taratura costituiscono i due passi fondamentali per la costruzione del modello del sistema.

6.1.1. Funzione di trasferimento

Viene eseguita una elaborazione della relazione input-output allo scopo di riprodurre, con il minimo errore possibile, i deflussi di un bacino considerato, senza tentare in alcun modo di simularne la dinamica. Tale impostazione, caratteristica di un modello di tipo probabilistico, si basa sulla conoscenza dei valori degli elementi misurabili del sistema idrologico in esame.

Per stabilire il migliore assetto della relazione input (afflussi) output (deflussi) vengono identificati dei sottobacini campione sui quali procedere alle prove necessarie. La scelta è fatta in modo che per essi sia possibile rilevare i principali fattori delle trasformazioni

Figura 6.1 - Aree interessate alle analisi idrologiche già effettuate mediante modelli matematici.



delle piogge in deflussi, nelle varie condizioni fisiche e climatiche, che abbiano dimensioni tali da assorbire gli effetti dovuti a perturbazioni locali, per cui esistano le informazioni necessarie alle varie prove da espletare.

Successivamente viene definito un set di variabili indipendenti significative per la relazione. In una prima fase sono stati assunti come variabili indipendenti gli afflussi pluviometrici totali, di un certo periodo di tempo, sull'area dei sottobacini in esame e, come variabili dipendenti, il deflusso netto del sottobacino.

Viene esaminata una regressione polinomiale del tipo

$$y = C_0 + C_1 X + C_2 X^\alpha \quad \text{con } \alpha = 0.1, 0.2, \dots, 3 \quad [2]$$

Poiché non si ottengono, per valori di α diversi dall'unità, valori di y più significativi di quelli ricavati da regressione lineare semplice, è accettata questa come relazione generale.

Tra i metodi utilizzati per effettuare le analisi statistiche è stato scelto quello «dei residui». Esso consiste nell'introdurre nella [2] le variabili indipendenti una per volta, secondo un ordine prefissato, in modo da spiegare i residui del passo precedente.

Secondo tale metodo è possibile controllare la validità del legame funzionale tra le variabili indipendenti ed i residui relativi, calcolando ad ogni passo il coefficiente di correlazione totale R , espresso nella forma

$$R = [1 - \frac{\sum (y_c - y_o)^2}{\sum (y_c - \bar{y})^2}]^{1/2} \quad [3]$$

con Y_c valore calcolato, Y_o valore osservato e \bar{Y} valore medio dalla variabile dipendente. Qualora R assuma valori lontani dall'unità, la variabile indipendente relativa non viene introdotta nella relazione.

Sono inoltre scartate le variabili indipendenti caratterizzate da coefficienti negativi, o che forniscono un contributo giudicato fisicamente impossibile.

Si giunge, quindi, a generare una equazione lineare nei parametri, attendibile sia in senso statistico che fisico. Ciò rende possibile il trasferimento di tale algoritmo a sottobacini per i quali non si conoscono i valori della variabile dipendente, senza il rischio che il nuovo set di variabili indipendenti conduca a risultati fisicamente impossibili.

Procedendo in tal senso, vengono individuate, per i bacini dove tale metodo è stato applicato, come variabili indipendenti, significative relativamente ai tre sottobacini campione prescelti:

- il deflusso calcolato nel mese j per le sezioni di monte m : D_{mj} (mc/sec);
- l'afflusso del mese j : A_j (mc/sec);
- il numero di giorni piovosi del mese j : n_j ;
- l'afflusso dei mesi precedenti il mese j : A_{j-k} (mc/sec);

giungendo ad una espressione della funzione di trasformazione del tipo:

$$D_j = \sum_0^n D_{mj} + \alpha (D_{j-1} - \sum_0^n D_{m,j-1}) + \beta A_j + A_o n_j + \sum_1^7 \gamma_i^\circ A_{j-i} + D_o \quad [4]$$

dove:

- j è l'indice d'ordine del mese;
- D_j è il deflusso calcolato nel mese j (mc/sec);
- α, β, γ_i sono coefficienti di regressione (≥ 0) per il mese j ;
- A_o è il coefficiente di regressione dei giorni piovosi (mc/sec);
- D_o è una costante (mc/sec).

Si procede, quindi, alla taratura della [4] in relazione alle sezioni di misura individuate.

Le relazioni ottenute vengono trasferite dalla sezione di misura K con superficie S_k a quella d'interesse I con superficie S_i ricavando il rapporto $s = S_i/S_k$ e moltiplicando per esso i coefficienti A_o e D_o della [4]. Si ottiene la relazione:

$$D_j = \sum_0^n D_{mj} + \alpha (D_{j-1} + \sum_0^n D_{m,j-1}) + \beta A_j + A'_0 n_j + \sum_1^7 \gamma_l A_{j-1} + D'_0 \quad [5]$$

con:

$$A'_0 = A_0 \cdot s$$

$$D'_0 = D_0 \cdot s$$

ed i valori delle variabili sono quelli del sottobacino in esame relativo alla sezione d'interesse da valutare.

Lungo le aste principali è adottato in generale il criterio di trasferire a ciascuna sezione d'interesse la relazione ottenuta per la sezione di misura immediatamente a valle.

6.1.2. Inputs e outputs

Il modello automatico di gestione ed elaborazione dei dati idrologici è costituito da una catena di programmi che eseguono i passi sopra descritti.

Gli inputs sono costituiti dai dati storici relativi a:

- precipitazioni e giorni piovosi (osservati);
- deflussi (osservati);
- prese e immissioni.

Gli outputs sono costituiti, per ciascuna sezione, da:

- le portate calcolate per l'intero periodo;
- le statistiche generali;
- per le sezioni di misura, le curve di durata mensile per le portate naturali e per le portate calcolate;
- per tutte le sezioni, le curve di durata complessive, utilizzando valori mensili di portata calcolata;
- per le sezioni di misura, gli andamenti cronologici delle portate naturali e delle portate calcolate.

6.2. Modello deterministico

Come si è già accennato, un tale tipo di modello ha avuto una applicazione più vasta per gli schemi idrici interessanti il progetto speciale n. 29; le metodologie sono state differenziate a seconda del bacino idrografico di riferimento, mentre qui verrà data una descrizione dello schema di massima posto a base per questo tipo di modelli, mettendo in luce le varianti metodologiche applicate nei singoli studi.

6.2.1. Lo schema generale di analisi

Il modello matematico deterministico utilizzato si basa sulla verifica, mese per mese e per ciascun sottobacino, dell'equazione del bilancio idrologico secondo la relazione

$$P = \Delta W + \Delta U + E + \Delta V + Q \quad [6]$$

con:

- P volume totale di precipitazione;
- ΔW variazione dei volumi degli invasi superficiali;
- ΔU variazione del volume d'acqua nel terreno agrario;
- E volume perduto per evapotraspirazione reale;
- ΔV variazione dei volumi degli invasi sotterranei;
- Q deflusso superficiale.

Il territorio in esame viene suddiviso generalmente in bacini idrografici e sottobacini significativi ai fini idrogeologici. Nel caso dei bacini del sistema Abruzzo Nord, si è fatto ricorso, invece, ad una articolazione per maglie quadrate di circa 4 chilometri di lato (sono state individuate 1.531 maglie).

Tale suddivisione per maglia ha introdotto un notevole grado di dettaglio nelle analisi, sia delle risorse superficiali che sotterranee. I dati pluviometrici e meteorologici sono rico-

struiti per una serie di anni significativa in base, o a metodi di tipo topografico (isoiete, etc.), o a metodi statistici (*krigeage*).

6.2.2. Il modello di riferimento

Il modello segue tutti i fenomeni che interessano la risorsa acqua, dal momento della sua comparsa come evento meteorologico. Si inizia con il calcolare l'afflusso meteorologico, suddividendolo tra afflusso liquido e afflusso solido (neve). Il comportamento del manto nevoso viene modellato da una correlazione tra copertura nevosa e temperatura media del sottobacino (o maglia).

La pioggia, al netto della trasformazione nevosa, viene depurata, poi, anche della quantità soggetta ai fenomeni di evapotraspirazione.

L'evapotraspirazione potenziale mensile è calcolata mediante l'uso della formula di *Thorntwaite*, mentre l'evapotraspirazione effettiva viene determinata mese per mese in ragione dell'acqua disponibile, tenendo conto tuttavia della concentrazione delle precipitazioni e della pendenza dei terreni, per sottrarre dal totale disponibile la quota parte che alimenta i deflussi superficiali o sotterranei immediati.

Nel modello si determina, altresì, mese per mese, la parte di afflussi (da precipitazione e scioglimento dei nevai) che non è evapotraspirata né immagazzinata nei nevai o nel terreno agrario e, quindi, alimenta i deflussi superficiali e gli invasi sotterranei. L'effetto degli invasi sotterranei (ritardo nel tempo e traspirazione spaziale) sui deflussi superficiali viene modellato, in generale, ipotizzando una relazione biunivoca tra volume della falda e portata nelle sorgenti ed impostando anche per gli acquiferi un bilancio idrico mensile.

6.3. L'analisi integrata tra risorse superficiali e sotterranee

Lo schema di riferimento presentato ha subito nei singoli studi degli adattamenti metodologici di varia portata. Tra i più importanti è quello interessante la valutazione integrata (cfr. 22) delle risorse superficiali e sotterranee, che si è utilizzata nel modello per il sistema dell'Abruzzo Nord. In questo caso, come già accennato, il territorio è stato suddiviso in maglie quadrate ed a ciascuna è stata data una precisa caratterizzazione idrologica (carsiche, alluvionali, etc.), come appare nella fig. 6.2.

Allora, una parte della pioggia, depurata della parte immagazzinata sotto forma di neve, più la quantità d'acqua che si rende disponibile per scioglimento dei nevai, viene trasferita nelle maglie di natura carsica verso un bacino di accumulo sotterraneo e da questo restituita alle sorgenti. La valutazione di questo tipo di trasferimento viene effettuata con metodi statistici (convoluzione e deconvoluzione). Nella zona in studio sono stati individuati tre bacini carsici differenti.

Diversa risulta, al tempo stesso, l'analisi dei fenomeni da infiltrazione e degli scambi tra falda sotterranea e superficiale. Vengono, infatti, prima valutati i trasferimenti verticali e successivamente quelli orizzontali tra maglia e maglia. Più in dettaglio:

Filtrazione verticale.

Per tutte le maglie, salvo quelle appartenenti alla categoria geologica dei *Flysch*, è prevista la presenza di un serbatoio sotterraneo (falda) la cui capacità massima RSMAX è data da:

$$RSMAX = SM \cdot CS \cdot (HALT - HMUR)$$

con:

SM superficie della maglia;

CS coefficiente di immagazzinamento (da 0,005 a 0,020 a seconda delle categorie geologiche);

HMUR profondità del muro rispetto al suolo (da 5 m ad alcune centinaia di metri, a seconda delle categorie geologiche);

HALT altezza della maglia.

Indicato con HP il livello piezometrico della maglia nell'intervallo di tempo considerato, la quantità effettivamente immagazzinata è data da:

$$RSOUT = SM \cdot CS \cdot (HP - HMUR)$$

Figura 6.2 - Modello idrologico dell'Abruzzo nord: unità idrogeologiche e sezioni di interesse.



SE $HP \geq HALT$ si verifica un travaso dal serbatoio considerato a quello superficiale. Indicato con ES lo stock totale d'acqua superficiale dato dalla somma tra la quantità immagazzinata inizialmente (RFU) e la pioggia netta (pioggia totale + acqua di fusione della neve - stoccaggio della neve - evaporazione) e con RFS la quantità riservata alla convoluzione, l'offerta d'infiltrazione OFF è data da:

$$OFF = CF \cdot (ES - RFS) \cdot \left(0,1 + 0,9 \frac{RFU - RFUMIN}{RFUMAX - RFUMIN} \right)$$

La domanda di infiltrazione risulta:

$$DOM = CS \cdot (HALT - HP)$$

Se questa domanda è negativa, ovvero se HP iniziale supera la quota del suolo per effetto dei rapporti sotterranei con le altre maglie, c'è prioritariamente tracimazione della falda superficiale.

Se OFF e DOM sono entrambe positive, la quantità d'acqua effettivamente infiltrata è la più piccola tra le due quantità.

Filtrazione orizzontale.

Il trasferimento orizzontale può verificarsi solo da una maglia a quella immediatamente a valle nella falda locale. Detto trasferimento sarà funzione della trasmissività locale e della differenza dei livelli piezometrici delle due maglie; discretizzando la legge di *Darcy* si ha:

$$HP_t - HP_i = \frac{DM}{SM} \cdot \frac{CT}{CS} \cdot \frac{HP_i - HP_v}{1 + \frac{DM}{SM} \frac{CT}{CS}}$$

in cui:

HP_i è il livello piezometrico calcolato nel processo precedente;

HP_t è il livello piezometrico finale;

DM sono i secondi in un mese;

HP_v è il livello piezometrico della falda a valle, se esiste, oppure è la quota del suolo della maglia a valle.

Il trasferimento sotterraneo è uguale alla variazione dello stock del serbatoio sotterraneo della maglia:

$$DRSOUT = CS \cdot SM (HP_t - HP_i)$$

Figura 2.1. Diagramma di bilancio idrico per un bacino idrografico. La somma tra la quantità im-
 magazzinata inizialmente (RFU) e la pioggia netta (pioggia totale + acqua di fusione della
 neve - stoccaggio della neve - evaporazione) e con RFS la quantità riservata alla convo-
 luzione, l'offerta d'infiltrazione OFF è data da:



7 bibliografia

2. Ministero per gli Affari Regionali e Locali ed il Consiglio Nazionale delle Regioni. *Convegno per la valutazione del Programma Triennale 1973-1975* (relazioni e discussioni) - Roma, maggio 1975.
3. AA.VV. *Le tecniche d'intervento pubblico*, F. Angeli editore, 1971.
4. P. Poni, *Lezioni sulla teoria dell'equilibrio e dell'ottimalità*, in Quaderni di Economia, Roma, 1973.
5. S.A. Mizuchi, *Approaches to dynamic investment planning*, North-Holland, 1971.
6. S.A. Mizuchi, *Optimal control in investment planning*, F. Angeli, 1971.
7. G. Pirelli - F. Buil (a cura di), *Analisi dei problemi di investimento e di crescita nella Corea Meridionale*, Marsilio editore, Venezia, 1973.
8. *United Nations for Project Evaluation*, United States, 1972.
9. P. Poni - A. Del Grande - R. Scavone - e altri, *La programmazione idroelettrica e la pianificazione economica*, Edizioni del Gruppo di Economia, Roma, 1977.
10. A. Scavone, *Metodi di programmazione idroelettrica per la scelta di impianti idroelettrici*, Edizioni del Gruppo di Economia, Roma, 1977.
11. A. Scavone, A. Del Grande, G. Baratta, *Il problema della scelta di impianti idroelettrici e la pianificazione economica*, Edizioni del Gruppo di Economia, Roma, 1977.
12. A. Scavone, F. Pini, G. Scavone, *Metodi di programmazione idroelettrica per la scelta di impianti idroelettrici*, Edizioni del Gruppo di Economia, Roma, 1977.
13. A. Del Grande - G. Scavone, *Metodi di programmazione idroelettrica per la scelta di impianti idroelettrici*, Edizioni del Gruppo di Economia, Roma, 1977.
14. A. Del Grande - G. Scavone, *Metodi di programmazione idroelettrica per la scelta di impianti idroelettrici*, Edizioni del Gruppo di Economia, Roma, 1977.
15. V.Y. Izrael, *Mathematical analysis of water resources systems*, Moscow, 1977.
16. H.C. Dreiss, *Water resources systems engineering*, McGraw-Hill, 1975.
17. H.C. Dreiss, *Water resources systems engineering*, McGraw-Hill, 1975.
18. A. Mizuchi, *Design of water resources systems*, Harvard University Press, 1971.
19. G. Pirelli - L. Piodori, *La programmazione idroelettrica e la pianificazione economica*, F. Angeli editore, 1973.
20. L. Piodori, *La programmazione idroelettrica e la pianificazione economica*, F. Angeli editore, 1973.
21. AA.VV., *Mathematical models of hydrology*, ITC and Department of Hydrology, 1971.
22. F. Scavone e altri, *La pianificazione idroelettrica e la pianificazione economica*, Edizioni del Gruppo di Economia, Roma, 1977.
23. *Water Resources Engineering*, McGraw-Hill, 1974.
24. V. Yezhov, *Mathematical models of hydrology*, Water Resources Engineering, Fort Collins, U.S.A., 1972.

7
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

Bibliografia

1. AA.VV., *Dossier sui progetti speciali per il Mezzogiorno*, in *Economia pubblica*, n. 1-2 gen.-feb. 1973.
2. Ministero per gli interventi straordinari nel Mezzogiorno, *Elementi per la formulazione del Programma Triennale 1979-1981 relativamente all'intervento straordinario nel Mezzogiorno*, Roma gennaio 1979.
3. AA.VV., *Le decisioni d'investimento pubblico*, F. Angeli editore, 1971.
4. Formez, *L'analisi costi benefici. Esperimenti e applicazioni*, in *Quaderni Regionali*, Formez, Napoli 1978.
5. S.A. Marglin, *Approaches to dynamic investment planning*, North Holland 1963.
6. S.A. Marglin, *Criteri per l'investimento pubblico*, F. Angeli 1971.
7. C. Rinetti - F. Nuti (a cura di), *Analisi dei progetti di investimento - il metodo della Banca Mondiale*, Marsilio editore, Venezia 1979.
8. Unido, *Guidelines for Project Evaluation*, United States 1972.
9. P. Celico - A. Del Treste - R. Santelia - V. Stanganelli, *Hydrogéologie et planification des ressources hydriques: les expériences en cours pour un grand système régional de l'Italie du Centre-Sud*, Atti del Colloque International sur la Gestion des Eaux Intérieures, Liège 1977.
10. A. Cenedese, *Modello di programmazione matematica per lo studio di Sistemi Idrici su Scala Regionale*, Atti del Convegno su Distribuzioni spazio-temporali, gestione dei serbatoi, correlazioni multiple, Perugia 1980.
11. A. Cenedese, A. Del Treste, G. Saraca, *A Simplified global model for time development of a complex water system: experiences for Middle South Italy*, 3° Congresso IAHR - APD - Bandung, 1982.
12. A. Cenedese, P. Mele, G. Saraca, *Metodologia per lo studio dell'alimentazione idrica del napoletano mediante i procedimenti della ottimizzazione matematica*, Idrotecnica n. 3, maggio-giugno 1975.
13. A. Del Treste - R. Santelia, *Approccio sistemico alla progettazione di un sistema regionale di uso congiunto dell'acqua: un'esperienza in corso nell'Italia Centro-Meridionale*, Atti del seminario internazionale su Conjunctive Use of Multiple Sources of Water - Erice 1978.
14. J.B. Dent - J.R. Anderson, *Systems analysis in agricultural management*, Wiley, 1971.
15. Y.Y. Haimes, *Hyerarchical analysis of water resources systems*, McGraw-Hill, 1977.
16. Hall-Dracup, *Water resources systems Engineering*, McGraw-Hill, 1970.
17. H.R. Hamilton e altri, *Systems simulation for regional analysis: an application to river-basin planning*, MIT Press, 1969.
18. A. Maass e altri, *Design of water resources systems*, Harvard University Press, 1962.
19. S. Petriccione - L. Piccioni, *La programmazione matematica nella progettazione di grandi sistemi di opere*, F. Angeli editore, 1976.
20. L. Piccioni, *La decentralizzazione della pianificazione nel settore idrico*, Atti del seminario internazionale su Conjunctive Use of Multiple Sources of Water - Erice 1978.
21. AA.VV., *Mathematical models in hydrology*, Atti del Simposio di Varsavia, IAHS - Unesco - WMO, luglio 1971.
22. Y. Emsellem e altri, *Le modèles intégrés des ressources*, Atti del XII Corso SGERI - Erice 1981.
23. Ven te Chow (a cura di), *Handbook of applied hydrology*, McGraw-Hill, 1964.
24. V. Yevjevich, *Stochastic processes in hydrology*, Water Resources Publications, Fort Collins, U.S.A., 1972.

1. AA.VV. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1972. Roma, 1972.

2. Ministero delle Partecipazioni Statali. Bilancio 1972. Roma, 1972.

3. AA.VV. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1973. Roma, 1973.

4. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1974. Roma, 1974.

5. AA.VV. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1975. Roma, 1975.

6. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1976. Roma, 1976.

7. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1977. Roma, 1977.

8. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1978. Roma, 1978.

9. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1979. Roma, 1979.

10. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1980. Roma, 1980.

11. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1981. Roma, 1981.

12. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1982. Roma, 1982.

13. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1983. Roma, 1983.

14. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1984. Roma, 1984.

15. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1985. Roma, 1985.

16. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1986. Roma, 1986.

17. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1987. Roma, 1987.

18. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1988. Roma, 1988.

19. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1989. Roma, 1989.

20. Cassa per il Mezzogiorno. Bilancio 1990. Roma, 1990.

21. AA.VV. Bilancio 1991. Roma, 1991.

22. AA.VV. Bilancio 1992. Roma, 1992.

23. AA.VV. Bilancio 1993. Roma, 1993.

24. AA.VV. Bilancio 1994. Roma, 1994.

25. AA.VV. Bilancio 1995. Roma, 1995.

26. AA.VV. Bilancio 1996. Roma, 1996.

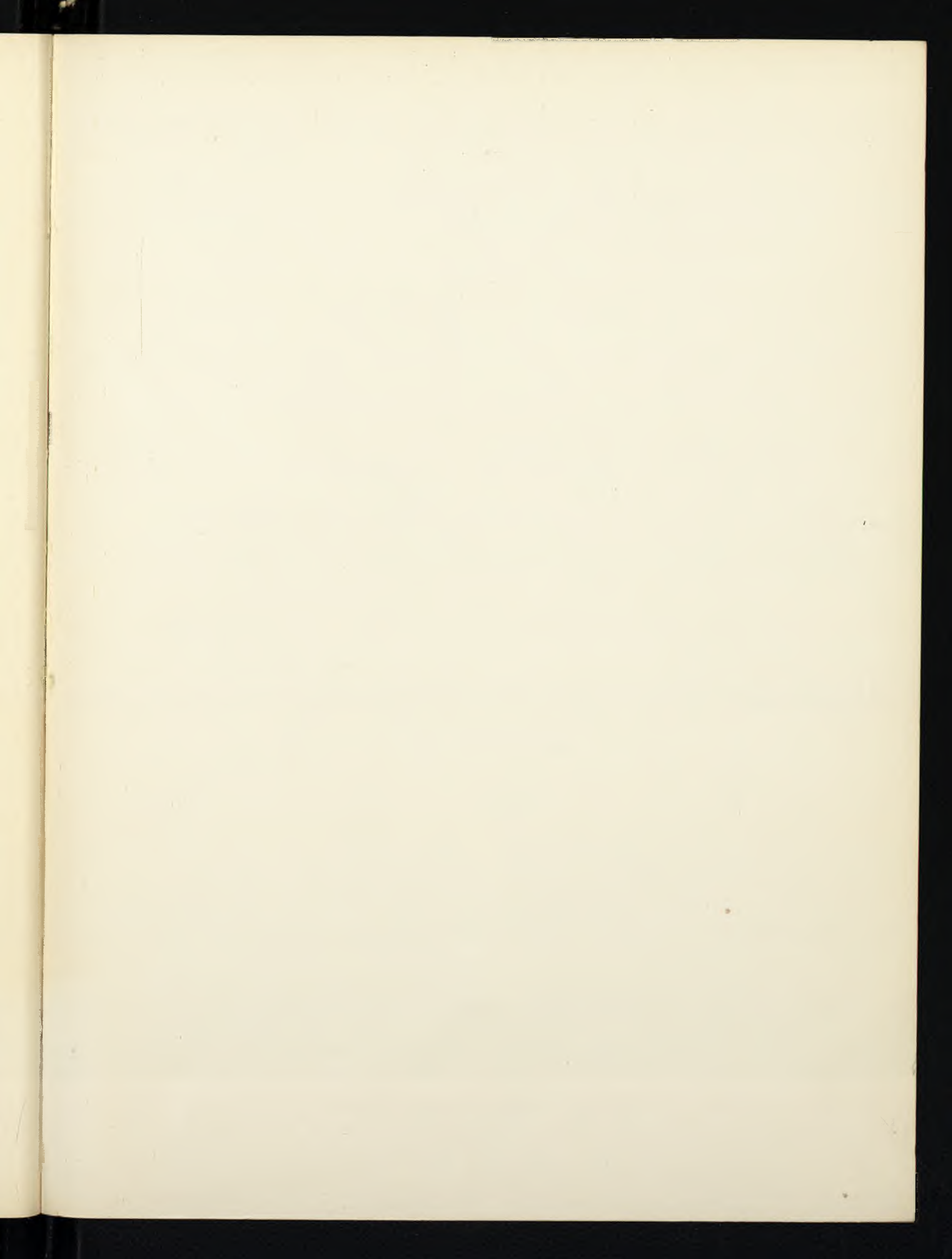
27. AA.VV. Bilancio 1997. Roma, 1997.

28. AA.VV. Bilancio 1998. Roma, 1998.

29. AA.VV. Bilancio 1999. Roma, 1999.

30. AA.VV. Bilancio 2000. Roma, 2000.

Edito a cura
 della Divisione Stampa e Pubbliche Relazioni
 della Cassa per il Mezzogiorno
 Roma - 1982



La collana dei «Quaderni» si propone di corrispondere, in forma organica e sistematica, ad una esigenza avvertita e segnalata da più parti: quella di offrire periodicamente all'opinione pubblica ed agli ambienti culturali, politici ed economici, un mezzo per approfondire e completare la conoscenza del patrimonio di esperienze amministrative, scientifiche e tecniche accumulate dalla Cassa per il Mezzogiorno, nel corso della sua attività.

I «Quaderni» ospitano, di volta in volta, studi, ricerche, progetti, dibattiti, consuntivi ed ogni altro contributo scientifico e culturale, direttamente od anche indirettamente connesso agli interventi della Cassa. Con ciò intendendo soddisfare sia le esigenze divulgative, che quelle degli ambienti più specializzati.

In tale quadro, un posto di rilievo è occupato dai «Quaderni» sui progetti speciali, destinati ad offrire al lettore, in forma cronologica, gli elementi più significativi per seguire l'iter programmatico e di attuazione di ciascun progetto.

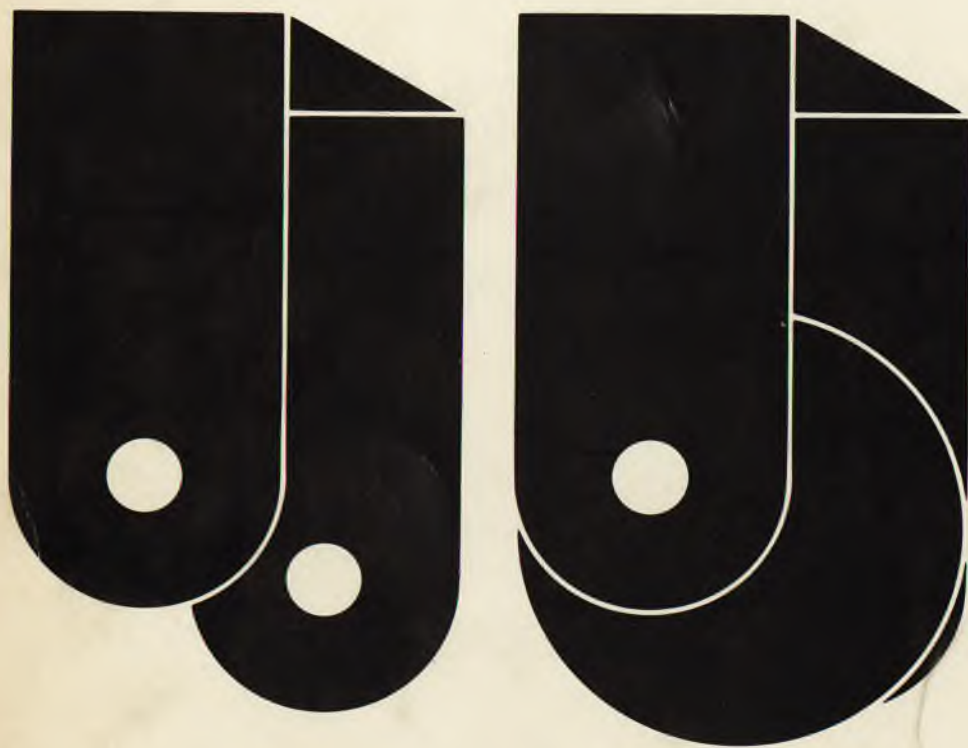
Gli argomenti vengono preliminarmente illustrati, nel loro complesso, in forma semplice e accessibile a tutti.

Segue una seconda parte dove sono riprodotti, nei loro aspetti essenziali, i provvedimenti adottati in sede governativa per indirizzare gli interventi e la documentazione amministrativa e tecnica predisposta dalla Cassa.

In alcuni casi, vengono anche presentati, sotto forma di schede, i dati relativi ai singoli programmi annuali e al loro andamento.

A completamento della documentazione pubblicata, i «Quaderni» contengono, infine, materiale fotografico, cartografie, grafici e tabelle riferiti agli argomenti trattati.

L'allestimento e la diffusione della «Collana» avviene a cura della Divisione Stampa e P.R. della Cassa per il Mezzogiorno.



4/1