

# Università degli Studi di Napoli Federico II



Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e  
Ambientale

CORSO DI LAUREA IN  
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL  
TERRITORIO

TESI DI LAUREA IN  
INFRASTRUTTURE IDRAULICHE

## **Gestione Sostenibile delle risorse idriche e cambiamenti climatici**

RELATORE: Ch.mo Prof. Ing. Maurizio Giugni

CANDIDATA: Ilenia Salvatore

RELATORE: Ch.mo Prof. Ing. Francesco De Paola

Matr. N49/379

# INTRODUZIONE

- Importanza dell'acqua e del suo utilizzo
- Stretta correlazione tra i cambiamenti climatici e la carenza idrica
- Consumo idrico in Italia
- Problematiche relative ai sistemi acquedottistici
- Utilizzo di modelli e software che ottimizzano l'allocazione delle risorse idriche e minimizzano i costi
- Caso di Studio: Città di Nablus

# Gestione ottimizzata dei sistemi idrici

I sistemi acquedottistici sono caratterizzati da una notevole inefficienza dovuta non solo alle carenze gestionali e tecnologiche ma anche alla scarsità delle risorse idriche.

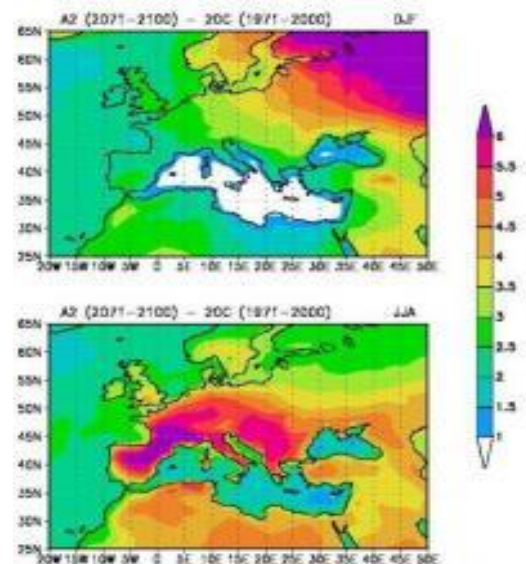
La gestione di questi sistemi si sviluppa su diversi livelli:

- *Gestione fisica* (GIS, sistema di telecomando, sistema di telecontrollo);
- *Gestione socio-economica* (individua strategie economicamente vantaggiose);
- *Gestione legale* (leggi per regolare l'uso delle acque pubbliche, ecc.);
- *Gestione tecnica* (funzionamento del sistema in maniera efficiente ed efficace).

## ➤ USO SOSTENIBILE DELLA RISORSA IDRICA

Il tema della sostenibilità nella gestione integrata della risorsa idrica può essere esaminato da diversi punti di vista:

- **Ambientale:** rappresenta la conservazione o il ripristino di un regime idrico compatibile con la tutela degli ecosistemi, con gli usi ricreativi e con l'assetto del territorio. Tali obiettivi di sostenibilità dovranno tener conto dei **cambiamenti climatici** che agiranno in maniera significativa sul ciclo idrologico. Secondo il Rapporto dell'IPCC, infatti, si avrà nei prossimi anni una diminuzione delle precipitazioni medie annuali nell'area del Mediterraneo di circa il 20% (scenario SRES A1B, anomalie nel periodo 2070-2099 rispetto al periodo 1950-2000)
- **Economico-Finanziario:** implica la realizzazione di infrastrutture e rappresenta la modalità di copertura del costo operativo e di capitale, che dovrebbe essere interamente a carico della generazione che fruisce dei relativi benefici. Ogni aumento del grado di infrastrutturazione del sistema idrico pone un'ipoteca sul futuro, facendo ricadere i costi sulle generazioni successive;
- **Etico-Sociale:** prevede un equilibrio fra la necessità da un lato di soddisfare la domanda e dall'altro di non incoraggiare modelli insediativi e produttivi eccessivamente dissipativi nei consumi.



Differenza tra il valore medio della temperatura dell'aria a 2 metri nel periodo 2071-2100 e nel periodo 1971-2000 ottenute da simulazioni del 20° secolo e del 21° secolo (scenario A2 eseguite con modello SXG del CMCC, seguendo il protocollo CMIP3 (Gualdi et al. 2008)). Il pannello superiore mostra la differenza per il periodo invernale (Dicembre, Gennaio e Febbraio, DJF), mentre il pannello inferiore mostra la differenza per il periodo estivo (Giugno, Luglio e Agosto, JJA). La temperatura è espressa in °C.

## ➤ **Perdite Idriche**

I sistemi idrici danno luogo a perdite significative nella rete di adduzione e distribuzione e ciò risulta gravoso in quanto l'acqua che scorre in essi ha già i requisiti igienici ed organolettici atti al consumo umano. Per queste perdite è possibile operare una fondamentale differenziazione tra quelle *amministrative* e quelle *fisiche o reali*:

▪ *Perdite amministrative* :corrispondono ai volumi idrici consumati, ma non contabilizzati, dati dalla somma delle seguenti aliquote:

- volumi autorizzati ma non misurabili quali, ad esempio, quelli utilizzati per idranti, bocche antincendio, lavaggi stradali, innaffiamento di giardini, fontane, etc;
- volumi di servizi, utilizzati per il corretto funzionamento del sistema idrico quali lavaggi della rete, pulizia dei serbatoi, etc;
- volumi perduti per sfiori dei serbatoi, errate aperture di scarichi;

▪ *Perdite fisiche o reali* : riconducibili alla non integrità e/o alla mancanza di tenuta degli elementi che costituiscono la rete idrica, quali condotte, i giunti, gli organi idraulici, etc. Le maggiori perdite, di solito, si verificano in seguito a rotture improvvise dei tubi o delle giunzioni; quelle minori, invece, provengono dalle giunzioni, dalle tubazioni e dagli impianti.

<b>VOLUME IDRICO IMMESSO IN RETE</b>	<b>CONSUMO AUTORIZZATO</b>	<b>FATTURATO</b>	<b>MISURATO</b>	Dalla lettura dei contatori
		<b>NON FATTURATO (Utilizzato dal Gestore)</b>	<b>NON MISURATO</b>	Es. Contratti a forfait
			<b>MISURATO</b>	Utilizzato dal gestore per scopi propri (sfiori, scarichi, lavaggi, prelievi, ecc.) Difficilmente misurato
		<b>NON MISURATO</b>		
	<b>PERDITE IDRICHE</b>	<b>PERDITE APPARENTI</b>	<b>ERRORI DI MISURAZIONE</b>	Errori nel misurare il volume immesso in rete o i consumi dell'utenza
			<b>CONSUMO NON AUTORIZZATO</b>	Furti sulla rete (Allacciamenti abusivi)
		<b>PERDITE REALI o FISICHE</b>	<b>PERDITE DI SOTTOFONDO</b>	Volumi modesti
			<b>PERDITE DA ROTTURE SEGNALATE</b>	Volumi notevoli (evidenti all'esterno)
			<b>PERDITE DA ROTTURE NON SEGNALATE</b>	Volumi notevoli (non evidenti all'esterno)

Tabella 1 – Volume idrico immesso in rete [www.federica.unina.it]

Le perdite idriche reali possono a loro volta essere classificate secondo tre diverse tipologie:

- perdite di sottofondo, costituite da infiltrazioni dovute a una non perfetta tenuta delle giunzioni;
- perdite da rottura segnalate, che risultano visibili in seguito all'affioramento in superficie e/o in seguito interruzione di servizio;
- perdite da rottura non segnalate, dovute a fessure individuabili solo mediante specifiche attività di ricerca.

# Modelli e Software per la gestione dei sistemi acquedottistici complessi

Per la gestione ottimale delle risorse idriche, sono stati sviluppati in letteratura dei sistemi e software, quali: MODSIM e HYDRONOMEAS.

## **MODSIM 8.1:** *Sistema di supporto decisionale per la gestione di bacini fluviali*

Consente di creare, posizionare, connettere i componenti della rete idrica (nodi e collegamenti) e di effettuare operazioni e simulazioni, mediante un'interfaccia grafica (GUI) e un algoritmo.

## **HYDRONOMEAS 4:** *Software di simulazione e ottimizzazione della gestione di sistemi idrici*

Consente di sviluppare politiche di gestione che minimizzano i costi operativi ed i rischi d'inadeguatezza nel monitoraggio quali - quantitativo del sistema idrico, con riferimento a diversi scenari che rispecchiano diversi casi ipotetici.

Entrambi i modelli forniscono delle funzioni di:

- ❖ *massima disponibilità idrica* per il raggiungimento degli obiettivi dato l'approvvigionamento idrico, irrigazione, produzione di energia idroelettrica, ecc.;
- ❖ *probabilità minima di fallimento* nel raggiungimento di una serie di obiettivi, e in quale periodo tale probabilità è in crescita;
- ❖ *costo minimo* per raggiungere determinati obiettivi operativi;
- ❖ *massimo beneficio* ritraibile dalla produzione di energia;
- ❖ *impatto* in base a diversi scenari amministrativi o climatici e le eventuali future modifiche della rete;
- ❖ *risposta del sistema ad eventi eccezionali* (quali un danno ad un adduttore o un inteso aumento della richiesta idrica) per un periodo specificato;
- ❖ *modifica del sistema idrico e le relative conseguenze* (ad esempio, l'esecuzione di nuovi progetti).

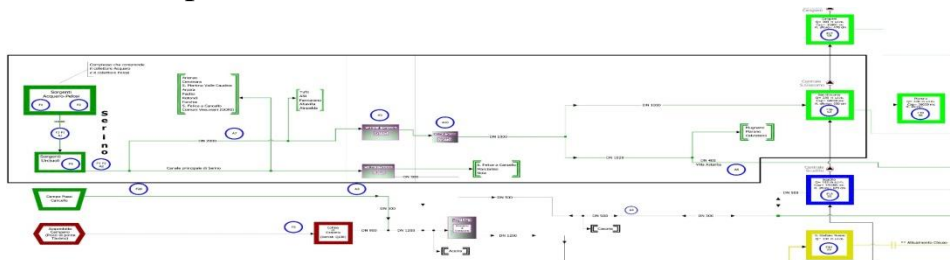
# Confronto tra MODSIM e HYDRONOMEAS

Allo scopo di operare un confronto tra i due software, risulta utile sviluppare un caso di studio finalizzato ad esplorare le modalità operative con cui i software rispondono ai suddetti requisiti. L'elaborazione del modello si svolge secondo le seguenti fasi:

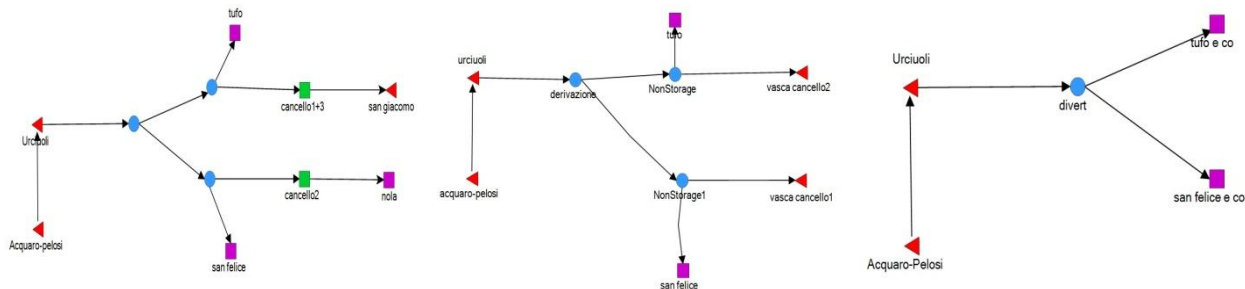
1. Disegnare la rete
2. Inserimento dei dati in serie temporali
3. Associazione di priorità e/o costi
4. Bilancio idrico dei componenti e del sistema
5. Simulazione e graficizzazione dei risultati
6. Esportazione ed implementazione dei risultati

Disegnare la rete :

Si individuano, nell'acquedotto di Serino, i principali elementi che costituiscono il sistema di presa e adduzione .



Si ipotizzano 3 modelli di diversa complessità e si inseriscono dati quantitativi verosimili in serie temporali per verificare se il programma opera correttamente.



Si sviluppa il modello più semplice perseguendo l'obiettivo di aggiungere di volta in volta ulteriori elementi di complessità che lo rendano idoneo a verificare la compatibilità con i requisiti prescelti. Dalle analisi sviluppate il software che più semplicemente riesce a produrre dei risultati in forma più leggibile ed immediata è risultato essere MODSIM.

# CASO DI STUDIO: GESTIONE OTTIMIZZATA DELLA CITTA' DI NABLUS

L'obiettivo di tale caso di studio è quello di gestire in modo ottimale la rete idrica di Nablus nel suo complesso. Essa è costituita da 11 serbatoi che vengono riportati in tabella 1, insieme alla massima capacità ed alla portata media mensile. Inoltre, la rete dispone di 25 PZ ed in tabella 2 sono riportati i numeri, e le posizioni delle PZ ed infine la loro domanda media mensile secondo i dati raccolti nell'anno 2012.

Reservoir Code	Reservoir Name	Max Capacity (m <sup>3</sup> )	Average Output (m <sup>3</sup> /month)	Reservoir Code	Reservoir Name	Max Capacity (m <sup>3</sup> )	Average Output (m <sup>3</sup> /month)
A	RNE4	30,881	27,392	G	Al-Masakin	23,235	24,180
B	Northern Reservoir	29,402	11,552	H	Ein Dafna	173,840	160,310
C	EinBet Elma	76,587	67,126	I	New Reservoir	65,223	58,788
D	Kamal Junblat	70,539	64,554	J	Aseera	44,542	41,932
E	Southern	44,595	35,480	K	Al-Juneed	20,157	16,845
F	Al-Sumara	44,929	41,473				

Tabella 1 – Nomi dei serbatoi, capacità e portata media mensile per l'anno 2012  
(fonte:WRMD,Nablus Municipality)

Number	Location	Avg. Monthly Demand [m <sup>3</sup> ]	Number	Location	Avg. Monthly Demand [m <sup>3</sup> ]
1	NE1	35897	14	S5	19448
2	NE2	25829	15	E1	13207
3	NE3	21645	16	E2	16253
4	NE4	28098	17	E3	21771
5	W0	22663	18	SE1	35440
6	W1	1540	19	SE2	21226
7	W-1	22771	20	SE3	4355
8	W2	23080	21	C1	60112
9	W3	29663	22	NW0	11664
10	W4	14507	23	NW1	6931
11	S2	9548	24	NW2	16853
12	S3	64747	25	NW3	8800
13	S4	40565			

Tabella 2 – Numeri, posizioni relativi alle PZ e portata media mensile richiesta per l'anno 2012  
(fonte:WRMD, Nablus Municipality)



# Modello matematico sviluppato

Per la risoluzione del problema della gestione ottimizzata delle risorse idriche viene descritto un modello matematico di programmazione lineare (PL) a vincoli lineari, sviluppato nell'ambito del progetto PON Acquasystem, scritto in linguaggio ZIMPL ed infine risolto in ambiente SCIP.

## Indici

- $i$  indice relativo alle Fonti di Approvvigionamento (F)
- $J$  indice relativo ai Serbatoi
- $K$  indice relativo alle Zone di Pressione (PZ)

## Parametri

- $NF$  numero di Fonti di Approvvigionamento
- $NR$  numero di Serbatoi
- $NPZ$  numero di Zone di Pressione (Distretti)
- $NFR$  numero complessivo di possibili connessioni tra le Fonti di Approvvigionamento e i Serbatoi
- $NRPZ$  numero complessivo di possibili connessioni tra i Serbatoi e le Zone di Pressione
- $C_{ij}$  costo per il pompaggio di 1 m<sup>3</sup> al mese dalla Fonte di Approvvigionamento  $i$  al Serbatoio  $j$
- $C_{jk}$  costo per il pompaggio di 1 m<sup>3</sup> al mese dal Serbatoio  $j$  alla Zona di Pressione  $k$
- $MQ_i$  massima capacità della Fonte di Approvvigionamento  $i$  durante un intervallo temporale
- $MQ_{1j}$  massima capacità del Serbatoio  $j$  durante un intervallo temporale
- $DEM_k$  portata richiesta dalla Zona di Pressione  $k$
- $TOT$  costo totale di gestione del sistema idrico

## Variabili decisionali

- $z_{ij}$  quantità pompata (m<sup>3</sup>) dalla Fonte di Approvvigionamento  $i$  al Serbatoio  $j$
- $x_{jk}$  quantità pompata (m<sup>3</sup>) dal Serbatoio  $j$  alla Zona di Pressione  $k$

## Funzione obiettivo

$$\text{Min } TOT = \sum_i^{NF} \sum_j^{NR} c_{1ij} \cdot z_{ij} + \sum_j^{NR} \sum_k^{NPZ} c_{jk} \cdot x_{jk} \quad (1)$$

## Vincoli

$$\sum_i^{NF} z_{ij} \leq MQ_i \quad \text{per } i = 1, \dots, NF \quad (2)$$

$$\sum_j^{NR} z_{ij} \geq MQ_{1j} \quad \text{per } j = 1, \dots, NR \quad (3)$$

$$\sum_j^{NR} x_{jk} \geq DEM_k \quad \text{per } k = 1, \dots, NPZ \quad (4)$$

$$\sum_k^{NPZ} x_{jk} \leq MQ_{1j} \quad \text{per } j = 1, \dots, NR \quad (5)$$

$$z_{ij} \geq 0 \quad \text{per } i = 1, \dots, NF \text{ e } j = 1, \dots, NR \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \text{per } j = 1, \dots, NR \text{ e } k = 1, \dots, NPZ \quad (7)$$

$$c_{ij} = \frac{9.81 \cdot H_{ij} \cdot \psi}{3600 \cdot \eta_i} \quad (8)$$

$$c_{jk} = \frac{9.81 \cdot H_{jk} \cdot \psi}{3600 \cdot \eta_j} \quad (9)$$

Dove:

- $H_{ij}$  prevalenza manometrica tra la Fonte di Approvvigionamento  $i$  e il Serbatoio  $j$
- $H_{jk}$  prevalenza manometrica tra il Serbatoio  $j$  e la Zona di Pressione  $k$
- $\eta_i$  rendimento complessivo del sistema di pompaggio a servizio dell'opera di captazione  $j$
- $\eta_j$  rendimento complessivo del sistema di pompaggio a servizio del serbatoio  $j$
- $\psi$  costo unitario del KWh

Inoltre  $c_{ij}$  e  $c_{jk}$  si pongono uguali a 1000 se non vi è un collegamento idraulico mentre si pongono uguali a 0 se vi è un collegamento idraulico a gravità.

## Situazione attuale

Nella tabella 3 vengono riportate le distribuzioni idriche medie dell'anno 2012, come ottenuto dal Dipartimento di Gestione delle Risorse Idriche (WRMD). La determinazione di queste distribuzioni è basata su semplici regole euristiche, che dipendono dalla differenza di altitudine tra la quota di sfioro del serbatoio e l'altitudine media della zona di pressione.

Number	Location	Pumped quantity [m <sup>3</sup> ]	Number	Location	Pumped quantity [m <sup>3</sup> ]
1	NE1	35897	14	S5	19448
2	NE2	25994	15	E1	13207
3	NE3	21645	16	E2	16253
4	NE4	28098	17	E3	21771
5	W0	22663	18	SE1	35440
6	W1	1399	19	SE2	21226
7	W-1	22771	20	SE3	4335
8	W2	23080	21	C1	60112
9	W3	29663	22	NW0	11664
10	W4	14507	23	NW1	6931
11	S2	9548	24	NW2	16853
12	S3	64747	25	NW3	8800
13	S4	40565			

Tabella 3 – Distribuzione adattata per l'anno 2012 (fonte: WRMD, Nablus Municipality)

Il costo complessivo di pompaggio mensile, usando la seconda parte dell'Eq. (1), è pari a 23453 €

## Modello di ottimizzazione: primi risultati

Dal momento in cui non si avevano informazioni relative alle fonti di approvvigionamento idrico, si è ipotizzata la presenza di 4 fonti le cui caratteristiche vengono riportate in tabella 4:

Source name	Max Average capacity [m <sup>3</sup> /month]
AA	190.000
BB	160.000
CC	140.000
DD	90.000

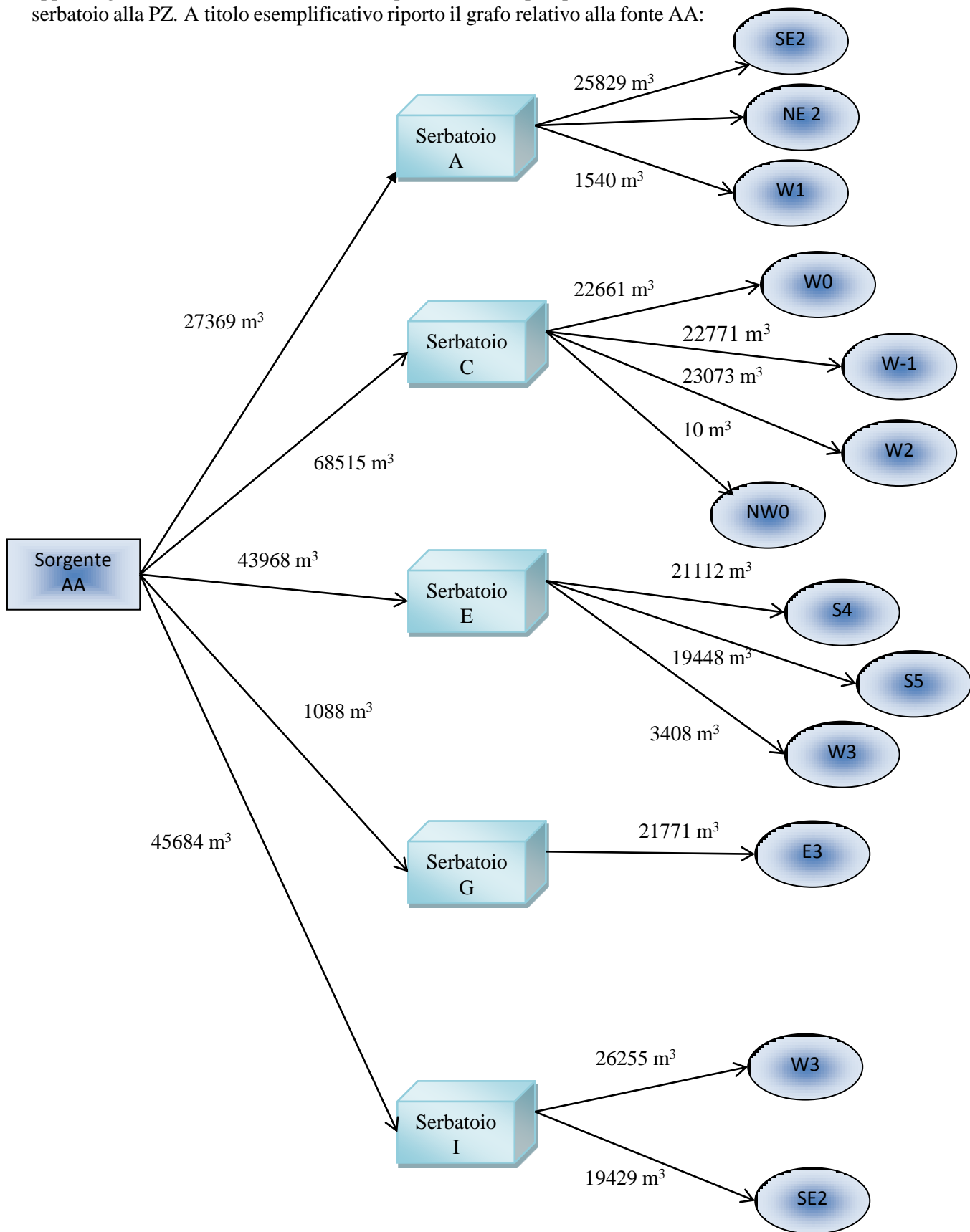
Tabella 4 – Fonti di approvvigionamento ipotizzate per l'anno 2012 con la media della portata mensile massima disponibile

Il costo totale ottenuto dopo aver risolto il problema di ottimizzazione è stato pari a 26550 €. Se consideriamo solo la parte relativa all'allocazione ottimale dai serbatoi alle PZ, ossia quella relativa al secondo membro della funzione obiettivo il costo risulta pari 15261 €, di circa il 35% inferiore rispetto alla situazione attuale (23453 €). La tabella 5 mostra i risultati di allocazione ottimale ottenuti dalla soluzione del modello LP.

solution	status:	optimal solution found	
objective	value:	26550.1	
		obj	Pumping Cost
z1\$AA\$A	27369	0	0
z1\$AA\$C	68515	0	0
z1\$AA\$E	43968	0	0
z1\$AA\$G	1088	0.048	52.224
z1\$AA\$I	45684	0.048	2192.83
z1\$BB\$B	28100	0	0
z1\$BB\$D	64750	0	0
z1\$BB\$G	3452	0.037344	128.911
z1\$BB\$J	44248	0.048	2123.9
z1\$BB\$K	19450	0.0072	140.04
z1\$CC\$F	40566	0.0216	876.226
z1\$CC\$H	99434	0.048	4772.83
z1\$DD\$G	17232	0.0024	41.3568
z1\$DD\$H	72768	0.0132	960.538
x1\$A\$NE2	25829	0	0
x1\$A\$W1	1540	0.04464	68.7456
x1\$B\$NE4	28098	0	0
x1\$B\$W0	2	0	0
x1\$C\$W0	22661	0.00648	146.843
x1\$C\$W-1	22771	0.0216	491.854
x1\$C\$W2	23073	0.045336	1046.04
x1\$C\$NW0	10	0	0
x1\$D\$S3	64747	0.0132	854.66
x1\$D\$S4	3	0.03984	0.11952
x1\$E\$S4	21112	0	0
x1\$E\$S5	19448	0.0384	746.803
x1\$E\$W3	3408	0	0
x1\$F\$W2	7	0	0
x1\$F\$E1	10403	0.06	624.18
x1\$F\$E2	16253	0.096	1560.29
x1\$F\$S2	9548	0.0264	252.067
x1\$F\$SE3	4355	0.036	156.78
x1\$G\$E3	21771	0.0384	836.006
x1\$H\$NE3	21645	0.059496	1287.79
x1\$H\$W4	14507	0.07464	1082.8
x1\$H\$E1	2804	0.10128	283.989
x1\$H\$NE1	35897	0.020256	727.13
x1\$H\$SE1	35440	0.021576	764.653
x1\$H\$SE2	1797	0.058848	105.75
x1\$H\$C1	60112	0.024	1442.69
x1\$I\$W3	26255	0.03672	964.084
x1\$I\$SE2	19429	0.03312	643.488
x1\$I\$NW0	11654	0	0
x1\$I\$NW1	6931	0.021576	149.543
x1\$I\$NW2	16853	0.060816	1024.93
x1\$I\$NW3	8800	0	0
x1\$K\$S4	19450	0	0
		Total COST	26550.1

Tabella 5 – Risultati di allocazione ottimale per l'anno 2012 relativi a 47 variabili

I risultati del modello possono essere rappresentati tramite dei grafi, in cui vengono riportate le fonti di approvvigionamento, i serbatoi, le PZ, le quantità idriche pompate dalla fonte al serbatoio e dal serbatoio alla PZ. A titolo esemplificativo riporto il grafo relativo alla fonte AA:



# CONCLUSIONI

E' necessario:

- favorire una sensibilizzazione sul valore della risorsa idrica;
- regolare i consumi;
- limitare gli sprechi;
- migliorare la rete di distribuzione idrica

GRAZIE

PER

L'ATTENZIONE