

# Integrazione di GIS, simulatori stocastici di domanda e modelli fluidodinamici per la valutazione delle reti di distribuzione del gas e la pianificazione energetica nella città di Forlì

*Using stochastic demand simulators, GIS and fluid-mechanics models for the assessment of gas distribution networks and energetic planning in the city of Forlì, Italy*

F.Sami  
UNICA s.p.a., Forlì-Cesena

A.Pistocchi  
GECOSistema srl, Cesena

## Sommario

Il lavoro illustra l'applicazione di simulatori stocastici di domanda e modelli idraulici integrati nella cornice di un sistema informativo geografico (GIS) per valutare la capacità attuale delle reti di distribuzione del gas nella città di Forlì, al fine di supportare il futuro sviluppo urbano e la conseguente domanda energetica. Utilizzando una serie storica di 9 anni relativa al prelievo totale di gas, viene calibrato un modello autoregressivo stazionario. L'analisi GIS-based della struttura urbana attuale e futura (desumibile dalle previsioni di Piano Regolatore Generale) consente di definire una funzione di distribuzione spaziale della domanda. L'analisi statistica esplorativa dei dati consente di individuare i trend inter-e intra-annuali, dovuti rispettivamente all'incremento assoluto della domanda e alle variazioni stagionali connesse alla temperatura. Il trend attuale di crescita dei consumi è stato utilizzato per definire uno scenario cautelativo della domanda cui la rete di distribuzione dovrebbe far fronte, mentre una valutazione più realistica della situazione al 2015, anche alla luce del fatto che la transizione da combustibili a gasolio al gas metano è già in fase di completamento, è ottenibile dalla redistribuzione dei volumi edilizi prevista dal Piano Regolatore Generale e da una stima dei comportamenti localizzativi delle utenze industriali maggiormente gas-esigenti.

L'uso di modelli idraulici di flusso nella rete consente di determinare le massime portate che la rete può erogare, anche in relazione alla possibilità di utilizzare parzialmente le diverse fonti (cabine di I salto) in concomitanza con interventi di manutenzione programmata, malfunzionamenti occasionali ecc.

L'applicazione dimostrativa, sviluppata nel quadro di alcune valutazioni strategiche sul parziale riassetto della rete, ha evidenziato la praticabilità della modellistica di sistema per supportare la pianificazione e gestione delle reti di distribuzione del gas anche in relazione all'assetto e alle dinamiche del territorio.

## Abstract

*The paper illustrates the application of stochastic demand simulators and flow models integrated within a GIS framework, to assess the capability of existing gas distribution networks to support future urban growth and dynamics with related energy demand in the city of Forlì, Italy. Using a 9-years long time series of total gas demand, a stationary autoregressive stochastic process for demand is calibrated, while GIS analysis of present and future urban pattern provides a spatial demand distribution function. Exploratory data analysis allows to detect a trend in intra-annual and inter-annual demand, due in the first case to seasonal thermal behaviour of the build environment, and in the second to the gradual change from petrol to gas fuel heating facilities occurred over the last few years. The first trend has been taken into account by dividing seasonally the demand time series and de-trending the variables in order to reduce them to a stationary process, while the second trend has been used to produce cautionary scenarios by extrapolating total gas demand over the next 15 years. In addition, since it is supposed that transition from petrol to gas in heating facilities is next to be completed, scenarios based both on the city masterplan's rules on urban development, and on industrial demand to come according to siting strategies of some major investors, have been simulated according to the presumed increase in demand.*

*Using flow models of the network allows to evaluate the maximum demand that existing plants can satisfy, and the number of days per year in which it is possible to work with each of the first jump injection stations. This makes it possible to plan maintenance interventions. Also, due to its nature hard to predict, industrial development has been*

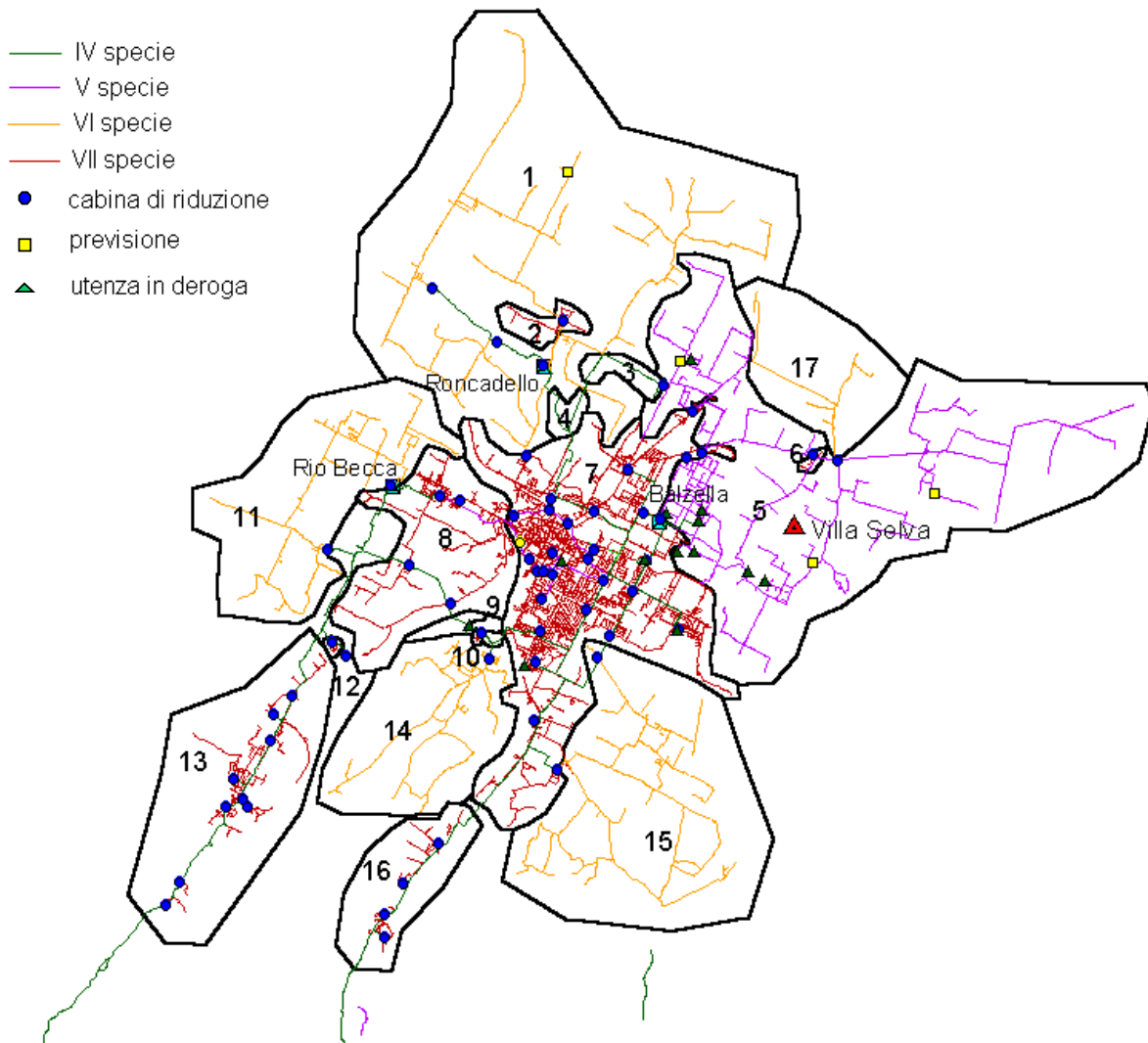
*evaluated by assessing the maximum additional discharge that can be spilled at each node in which it is supposed that development can occur.*

*The demonstrational application, which has been implemented in order to evaluate strategies for future development of the network, to meet a wider demand basin, shows the viability of mathematical modeling of urban systems and networks as a tool for integrated urban and energetic planning.*

## **1. introduzione e descrizione generale del problema**

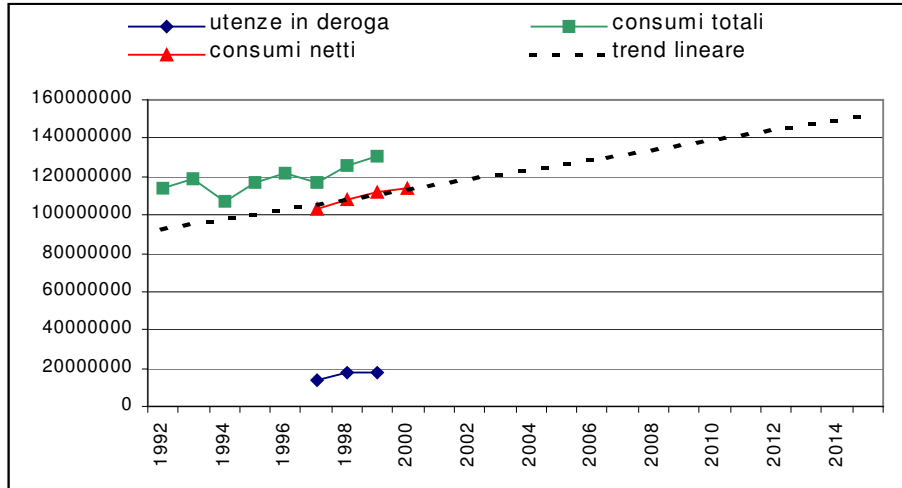
Il presente lavoro illustra una ricerca condotta al fine di organizzare le conoscenze sul comportamento idraulico della rete del gas di Forlì, mettere a punto un sistema di supporto alle decisioni e verificare con esso un insieme di possibili scenari in relazione allo sviluppo della città, alle dinamiche dell'insediamento industriale e agli investimenti in impianti richiesti. Il lavoro, di carattere interdisciplinare e orientato alla modellistica integrata di sistemi fisici e antropici strettamente interrelati (Couclelis, 2000) quali la domanda di gas da varie utenze e il funzionamento idraulico della rete di distribuzione, si colloca all'interfaccia fra la pianificazione territoriale e l'ingegneria delle reti. Le diverse tecniche di modellazione sono state integrate usando uno schema *loose coupling* (Burrough, 1996) fra procedure di analisi statistica (sviluppate nell'ambiente *spreadsheet* Excel 2000<sup>®</sup>), la modellazione fluidodinamica (effettuata in ambiente MatLab<sup>®</sup> 4.0), e le analisi geografiche (in ILWIS 2.23<sup>®</sup>).

La rete di distribuzione del gas di Forlì è stata realizzata negli ultimi decenni a fronte di una crescente domanda di gas metano in sostituzione dei combustibili tradizionali. Allo stato attuale, è organizzata con uno schema di adduzione all'utenza in tubazioni di media pressione (IV specie ai sensi della normativa vigente) e uno di distribuzione (V specie), che giunge a molte utenze industriali e, attraverso cabine di riduzione di pressione, all'utenza di tipo civile in bassa pressione (VI specie). L'alimentazione avviene al momento da tre cabine di I salto che spillano dal metanodotto SNAM, site a Roncadello, Balzella e Rio Becca, indicate in figura. CIS s.p.a. ha disposto di trasferire la cabina di I salto di Balzella a Villa Selva, per fare fronte ad un atteso sviluppo industriale nel settore e ad una possibile acquisizione di nuove utenze nei comuni limitrofi ad est. La Figura 1 riporta lo schema generale della rete.



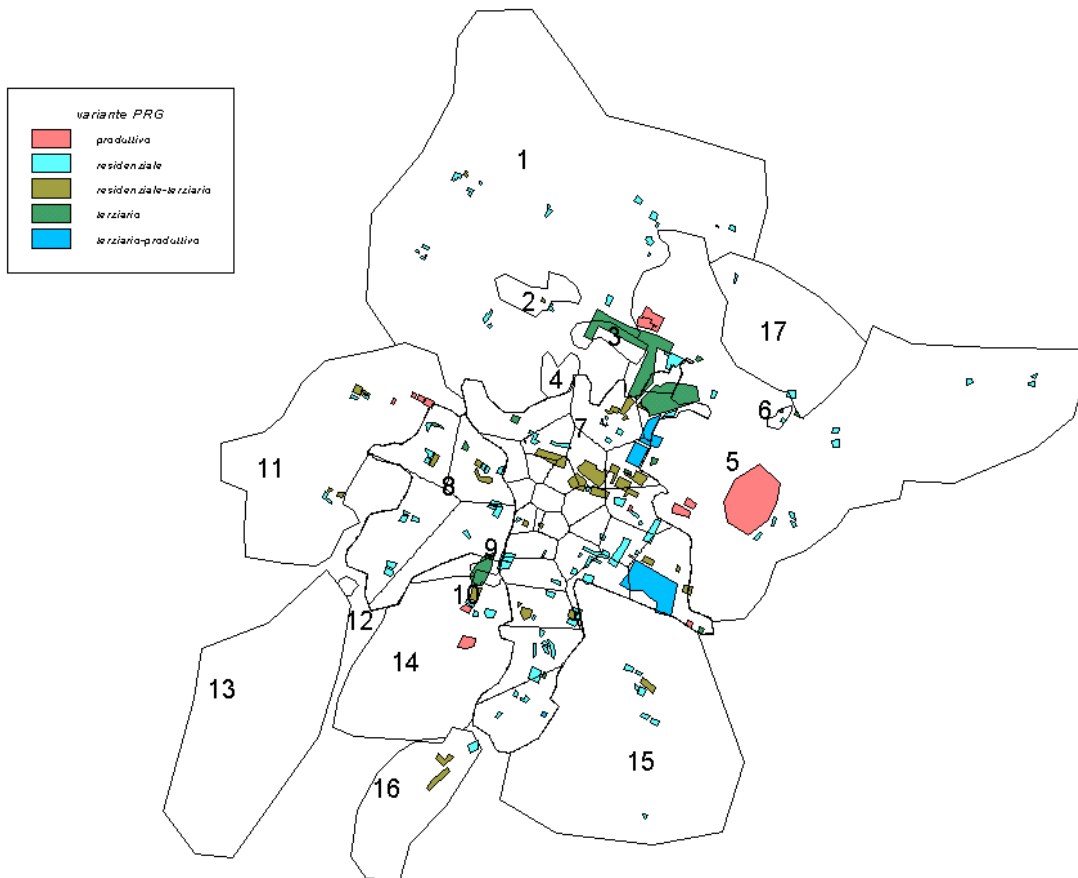
**Figura 1 – quadro della città di Forlì con schema delle reti di distribuzione del gas.**

La domanda complessiva di gas ha fatto registrare, negli ultimi anni, un considerevole aumento, secondo il trend illustrato in Figura 2 . Come si può vedere, l'aumento è legato essenzialmente all'utenza civile, per il graduale processo di sostituzione di altri combustibili per riscaldamento. È pertanto prevedibile che il trend si riduca considerevolmente nei prossimi anni con la completa conversione dei sistemi di riscaldamento civile al gas. Le "utenze in deroga", rappresentative dei consumi per scopi produttivi, esprimono invece una domanda che può essere ritenuta approssimativamente costante e che assume un carattere relativamente imprevedibile, a causa della sua stretta dipendenza dagli specifici processi produttivi.



**Figura 2 – andamento dei consumi complessivi annui di gas(mc) negli anni.**

Il Piano Regolatore Generale di Forlì (Comune di Forlì, 2000) ha fissato le previsioni di sviluppo residenziale, dalle quali può essere stimata la variazione di domanda per usi civili. Inoltre, sono stati individuati i poli di sviluppo tecnologico, concentrati in prevalenza nei settori settentrionali ed orientali del territorio comunale.



**Figura 3 – previsioni di sviluppo della città di Forlì**

In relazione agli obiettivi di sviluppo sostenibile e di contenimento delle emissioni, il Piano Energetico Comunale della città di Forlì (CIS, 1999) ha individuato una serie di strategie riguardanti, fra le altre cose, la realizzazione di impianti di cogenerazione e teleriscaldamento in alcuni poli cittadini ritenuti favorevoli (a causa della concentrazione di utenze gas-

esigenti). Questi interventi riguarderanno tuttavia gli aspetti impiantistici locali, mentre non modificheranno in maniera apprezzabile l'assetto complessivo della rete.

## 2. Analisi e modellazione della domanda

Come noto, mentre è relativamente semplice effettuare misure complessive del consumo istantaneo della rete, è assai difficile misurare simultaneamente in tutti i punti la portata prelevata. D'altra parte, i modelli fluidodinamici basati sulle equazioni di continuità e del moto qui impiegati richiedono, come nell'approccio classico al problema, di assegnare portate uscenti in tutti i nodi che rappresentano prelievi di gas. Si pone quindi il problema di mettere a punto uno stimatore della domanda, che garantisca il rispetto del bilancio di massa (la quantità di gas complessivamente prelevata deve essere uguale alla somma delle portate spillate ai nodi) e consenta una descrizione realistica delle effettive condizioni di funzionamento della rete (e in particolare l'andamento delle pressioni). Nella ricerca qui descritta, si è proceduto alla messa a punto di uno stimatore della domanda che garantisca il rispetto del bilancio di massa, secondo lo schema di Figura 4. Lo schema suppone che la distribuzione temporale sia di tipo stocastico, quella spaziale di tipo deterministico, e che la distribuzione complessiva dei consumi possa essere ottenuta con le semplici regole di combinazione assegnate. Nel seguito si descriveranno in maggiore dettaglio le componenti dello schema.

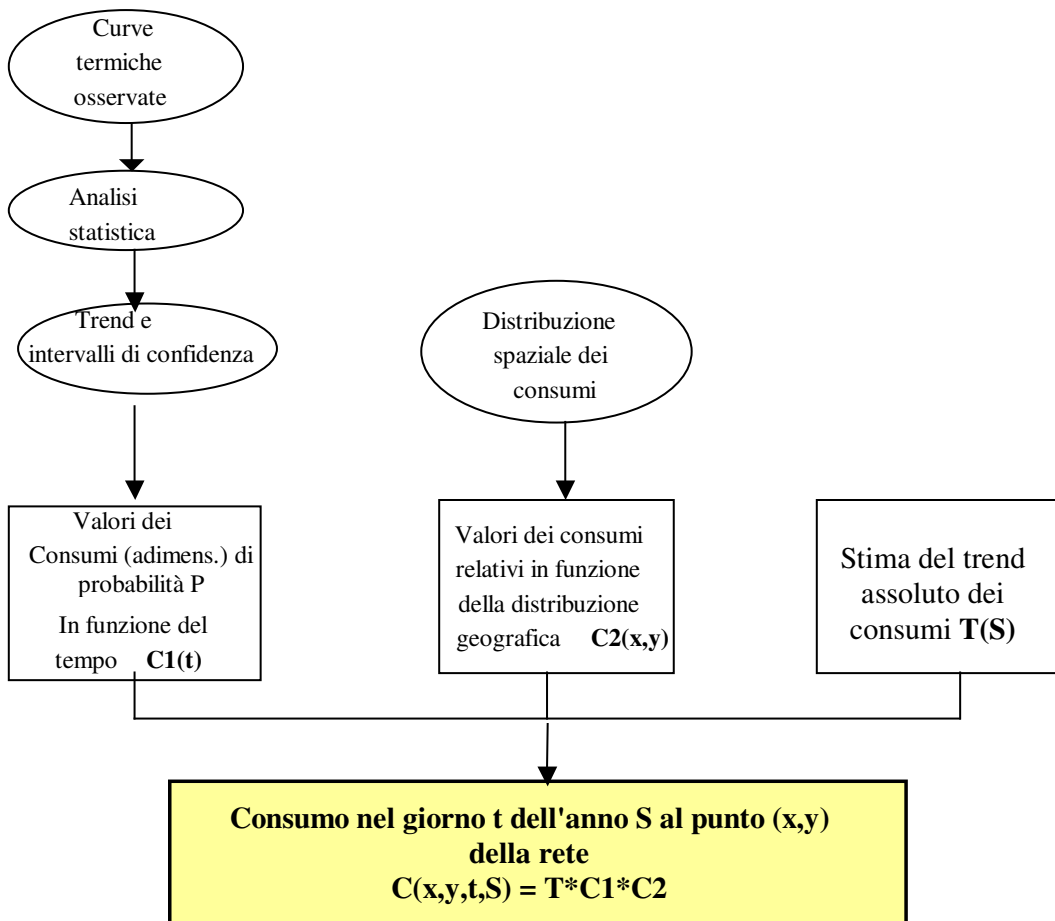
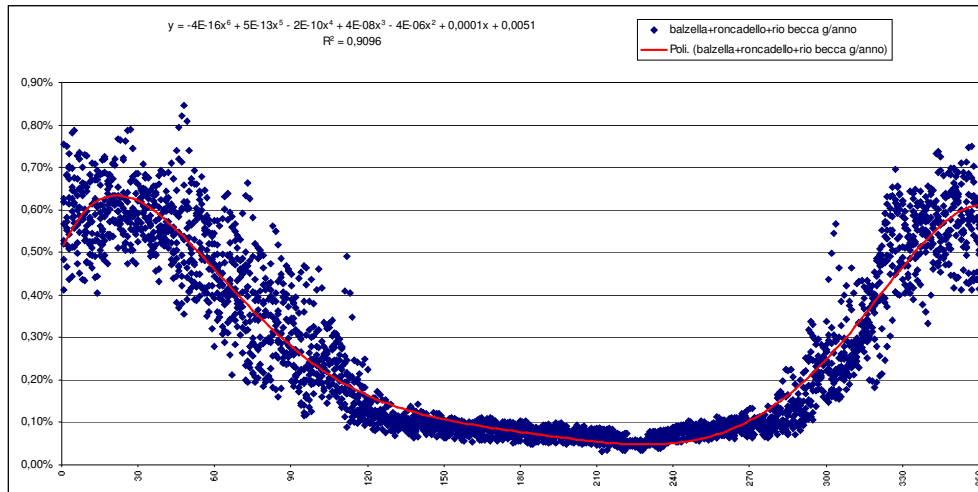


Figura 4 – flow chart dello stimatore della domanda

### **Andamento temporale**

Per la stima della distribuzione temporale dei consumi, si è fatto riferimento alle serie storiche disponibili. Queste coprono nove anni (1991-1999) e riportano il consumo giornaliero complessivo come percentuale totale del consumo annuo. La disponibilità delle serie in tale forma, come di prassi nella gestione del servizio gas, ha evitato la necessità di una adimensionalizzazione delle serie (Figura 5).



**Figura 5 – serie dei consumi disponibili**

Da una analisi esplorativa dei dati, è stato possibile individuare a buonsenso tre “stagioni” o periodi subannuali omogenei nelle serie dei consumi (Tabella 1).

Le “stagioni” sono caratterizzate da una varianza omogenea rispetto ad una media che esprime il trend dei consumi in ciascuna di esse.

<b>Stagione 1</b>	<b>Stagione 2</b>	<b>Stagione 3</b>
15 novembre - 31 marzo	1 aprile - 30 aprile ; 10 ottobre - 14 novembre	1 maggio - 9 ottobre
$\sigma^2 = 1,52E-06 \cong \text{costante}$	$\sigma^2 = 7,98E-07 \cong \text{costante}$	$\sigma^2 = 4,42E-08 \cong \text{costante}$

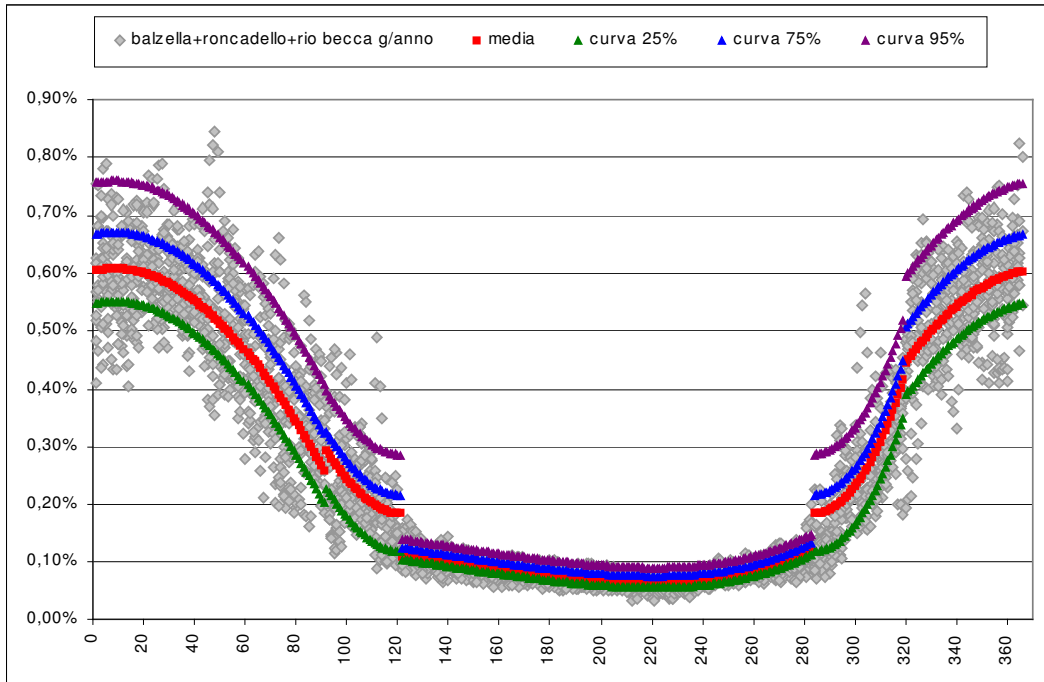
**Tabella 1– caratteristiche delle tre “stagioni” individuate**

Sui dati di ogni stagione, depurati del trend (che è stato valutato per regressione polinomiale a tentativi con criteri di massimo coefficiente di regressione), è stata fatta un’analisi di distribuzione di probabilità. Come previsto in base al teorema del limite centrale, la distribuzione dei consumi, somma di un numero elevato di consumi individuali a distribuzione di probabilità qualunque, è risultata di tipo normale per tutte le stagioni, con livello di significatività di 0.05 secondo il test di Pearson. Le statistiche descrittive sono riportate in Tabella 2.

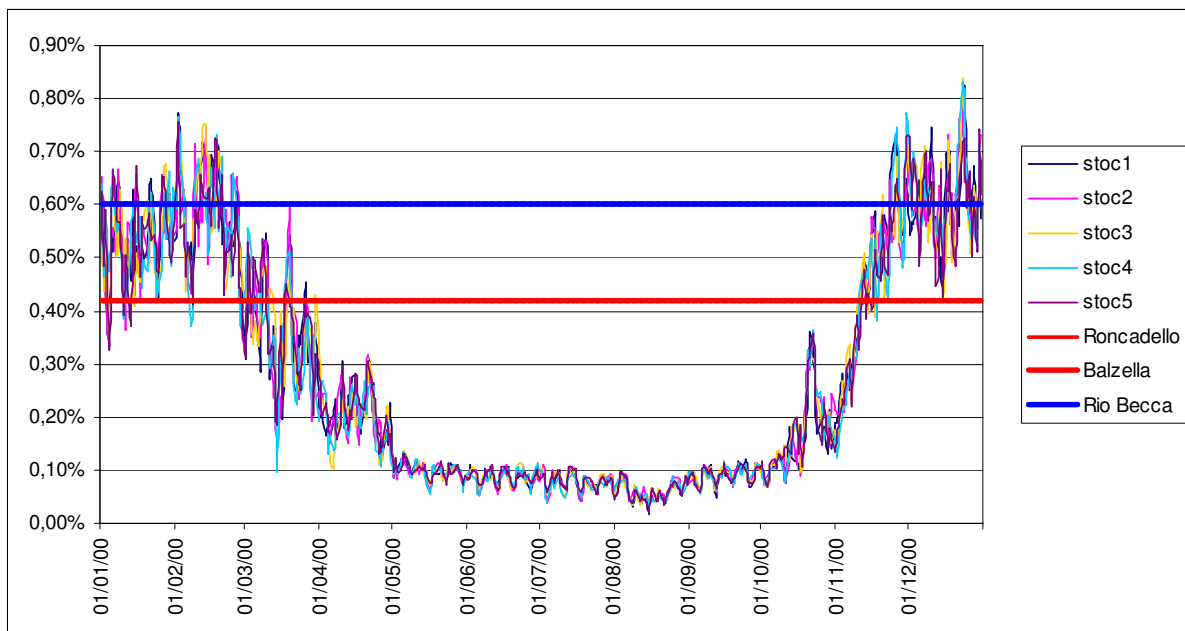
<b>Statistiche</b>	<b>z - stagione 1</b>	<b>Z - stagione 2</b>	<b>z - stagione 3</b>
<b>Media campionaria</b>	2,60022E-05	-0,00017581	4,49151E-05
<b>Varianza campionaria</b>	7,9158E-07	5,27324E-07	2,25872E-08
<b>Deviazione standard</b>	0,000889708	0,000726	0,00015029
<b>Minimo</b>	-0,002510	-0,0023439	-0,0004392
<b>Massimo</b>	0,003219	0,0030207	0,0006468
<b>N° dati</b>	1096	594	1458

**Tabella 2– statistiche descrittive dei dati analizzati**

In base all’analisi statistica, si è proceduto a costruire le “curve termiche” (ovvero gli andamenti dei consumi durante l’anno) “estremanti” di assegnato livello di probabilità p%(Figura 6). Queste curve rappresentano i limiti entro cui, con assegnato livello di probabilità, si troverà la curva termica effettiva. P.es. se vogliamo sapere in quale intervallo la curva potrà oscillare con probabilità di non superamento p=5%, possiamo affermare che essa sarà sempre al di sotto della curva del 95% di probabilità riportata in Figura 6.



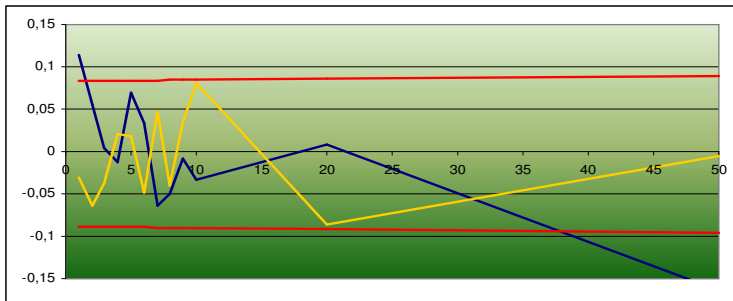
**Figura 6 – curve termiche estremanti per vari livelli di probabilità**



**Figura 7 – Uso del processo stocastico della domanda per l'analisi della distribuzione dei giorni in cui viene ecceduta la potenzialità della rete, ipotizzando di alimentare quest'ultima con due sole delle tre cabine. Le linee orizzontali, che rappresentano la potenzialità di servizio in assenza della cabina di cui portano il nome, corrispondono alle portate limite erogabili, valutate con la simulazione idraulica di cui in seguito.**

Le elaborazioni ora illustrate hanno lo scopo di caratterizzare la domanda per eventi “di progetto”, ovvero condizioni estreme della rete. Per riprodurre più significativamente la variabilità della domanda nel corso dell'anno, la curva termica può anche essere caratterizzata come processo stocastico, e quindi, messo a punto il modello del processo con le procedure classiche dell'analisi statistica (p.es Maione e Moisello, 1995), possono essere generate un numero molto grande di serie sintetiche di domanda, tutte caratterizzate dagli stessi parametri statistici della serie usata per la calibrazione del modello. Queste serie sintetiche possono essere impiegate per analisi di affidabilità della rete e valutazioni circa l'opportunità di manutenzioni preventive e altri accorgimenti gestionali. Ad esempio, può essere

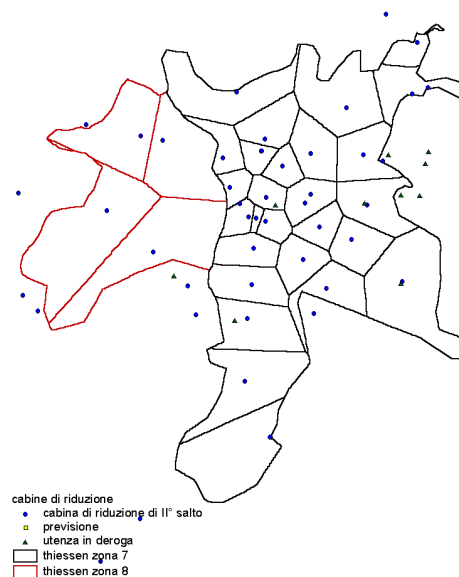
valutato il rischio di insufficienza della rete o la durata attesa dei disservizi nell'ipotesi di blocco di una delle cabine di I salto per un numero assegnato di giorni (Figura 7). Nel caso in esame, il modello scelto per il processo stocastico, il cui autocorrelogramma sperimentale è riportato in Figura 8, è un autoregressivo di ordine 10, in cui si rispecchia una lunghezza plausibile della “memoria” del sistema, legata alla persistenza delle variabili climatiche che influenzano i consumi.



**Figura 8 – autocorrelogramma empirico dei consumi giornalieri**

### ***Distribuzione nello spazio***

Per simulare la distribuzione nello spazio, si è proceduto all'attribuzione alle cabine di riduzione dei consumi registrati alle utenze secondo il database non georeferenziato di CIS s.p.a. Sono stati assegnati i consumi nominali contabilizzati, e si è riportato il totale in ogni zona fra quelle individuate come omogenee (Figura 1); il consumo assegnato ai nodi in ogni zona è il consumo totale diviso per il numero totale di nodi nella zona. I valori dei consumi sono stati adimensionalizzati e normalizzati in modo che la loro somma fosse uguale ad 1, di modo che ad ogni zona è stato associato un peso esprimente la percentuale del consumo totale istantaneo che avviene in quella zona. Nelle aree servite da più cabine di riduzione della pressione, ove è difficile assegnare con certezza i consumi ai nodi, si è assegnata ad ogni cabina l'area geografica individuata con il criterio del *nearest neighbour* (poligoni di Thiessen). La Figura 9 illustra la divisione convenzionale effettuata, sulla base della localizzazione delle cabine di riduzione.



**Figura 9 – cabine di riduzione e attribuzione delle aree di influenza.**

Per quanto riguarda la distribuzione spaziale in corrispondenza dello scenario di attuazione del Piano Regolatore, si è valutata in ciascuna delle zone individuate l'incidenza percentuale dell'incremento volumetrico per le destinazioni residenziale e terziaria, e si è provveduto all'incremento conseguente dei pesi delle aree. Successivamente si sono rinormalizzati i contributi delle varie aree in modo che la loro somma fosse unitaria. Per quanto riguarda i consumi industriali, che come detto hanno caratteristiche difficilmente prevedibili, si è scelto di non effettuare una assegnazione sistematica alla rete. Escludendo le utenze industriali, la rete risulta meno “carica” rispetto alle potenzialità massime, e la differenza fra queste ultime e le condizioni di uso per un dato scenario rappresenta un “potenziale industriale di riserva” che può essere valutato quantitativamente in ogni scenario sulla base del modello idraulico di seguito descritto.

### 3. Valutazione idraulica della rete

Agli scopi della pianificazione territoriale e della gestione della rete, è sufficiente simulare il comportamento di quest'ultima in moto permanente, essendo i fenomeni transitori di interesse per il funzionamento di manufatti locali e per alcune operazioni gestionali "minori". La simulazione idraulica di moto permanente si basa sulla soluzione delle equazioni di flusso lungo i tronchi della rete e di bilancio delle correnti di massa ai nodi, come ben noto. Le formule che possono essere impiegate per descrivere il moto del gas sono la formula empirica di Colebrook (p.es. Citrini e Nosedà, 1978), che tiene conto delle condizioni di moto sia di tipo laminare, sia di tipo turbolento, e una varietà di equazioni empiriche, tra le quali le più utilizzate e ben note sono quella di Renouard e quella di Weymouth, valide in moto turbolento. Occorre segnalare che dal punto di vista teorico la formula ritenuta più affidabile è quella di Colebrook, mentre le altre due formule, che forniscono valori fra loro congruenti, tendono a sovrastimare le perdite di carico e risultano quindi maggiormente cautelative in sede di progetto. Nello spirito di costruire un sistema di supporto alle decisioni, si è fatto uso di tutte e tre le formule ricordate, per garantire un quadro diagnostico completo in corrispondenza di ogni scenario. La prima soddisfa l'esigenza di riprodurre in modo più realistico il funzionamento del sistema, mentre le seconde consentono di verificare diverse ipotesi progettuali con coefficienti di sicurezza ingegneristicamente adeguati. I passi per la simulazione della rete prevedono:

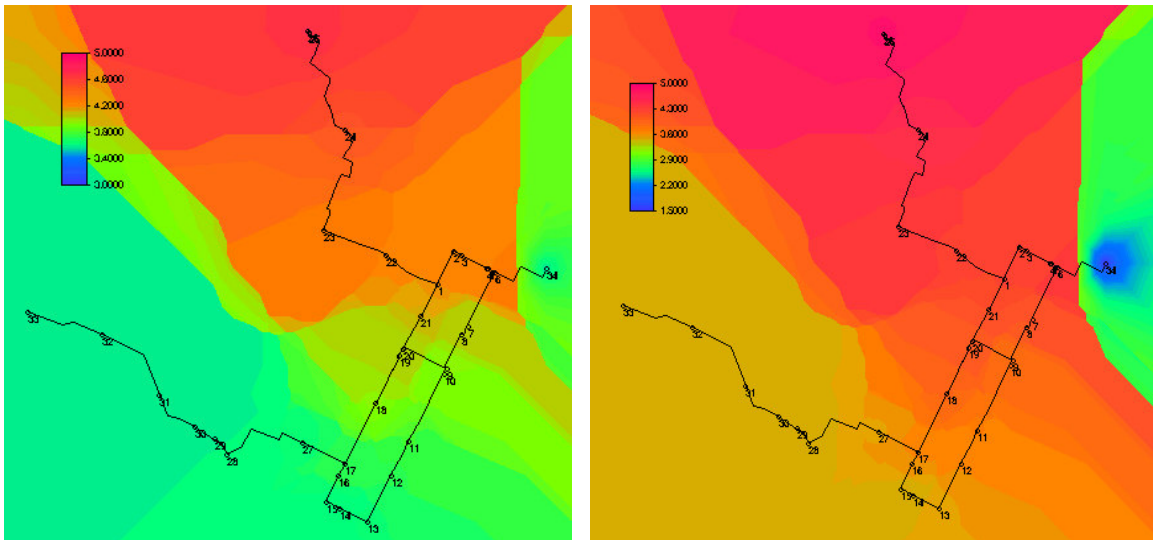
4. calcolo del consumo di progetto e sua ripartizione ai nodi della rete, con l'introduzione di coefficienti di punta e di contemporaneità secondo la prassi corrente dell'idraulica delle reti; questo viene fatto attraverso:
  - a. scelta di  $T(S)$  = consumo complessivo dell'anno  $S$
  - b. calcolo di  $T(S)*C1(t)$  = consumo complessivo del giorno  $t$  dell'anno  $S$
  - c. calcolo di  $T(S)*C1(t)*C2(x,y)$  = consumo di ogni cabina di riduzione per il giorno  $t$  dell'anno  $S$ . Il valore  $C2(x,y)$  è assegnato ad ogni cabina di riduzione esistente nella rete attraverso la procedura illustrata precedentemente
  - d. correzione per tenere conto degli effetti subgiornalieri (portata oraria di punta e consumo contemporaneo), attraverso (1) Individuazione della quota del totale di consumo residenziale/variabile ( $cv$ ) e industriale/costante ( $cc$ ) a seconda del tipo di utenze servite dalla cabina considerata; (2) Assegnazione del coefficiente di max consumo orario (%) per la quota di consumo variabile  $cov = 7.5\%$  (equivalente a un coefficiente di punta di 1.8); (3) Assegnazione del coefficiente di consumo orario (%) per la quota di consumo costante  $coc = 4.17\% = 100/24\%$  (ipotesi che il consumo costante – industriale, dipendente da processi produttivi ragionevolmente omogenei durante il giorno- sia ripartito uniformemente durante le 24 ore); (4) Assegnazione del coefficiente di contemporaneità che tiene conto del fatto che i consumi dei vari utenti non avvengono tutti simultaneamente  $c = 0.7$  (questo corrisponde ad assumere un coefficiente di punta reale di 1.25 anziché 1.8)
  - e. calcolo della portata totale di scenario in ogni nodo  $(x,y)$ , secondo la formula:

$$Q [mc/h] = c*[T(S)*C1(t)*C2(x,y)*cv*cov + T(S)*C1(t)*C2(x,y)*cc*coc]$$

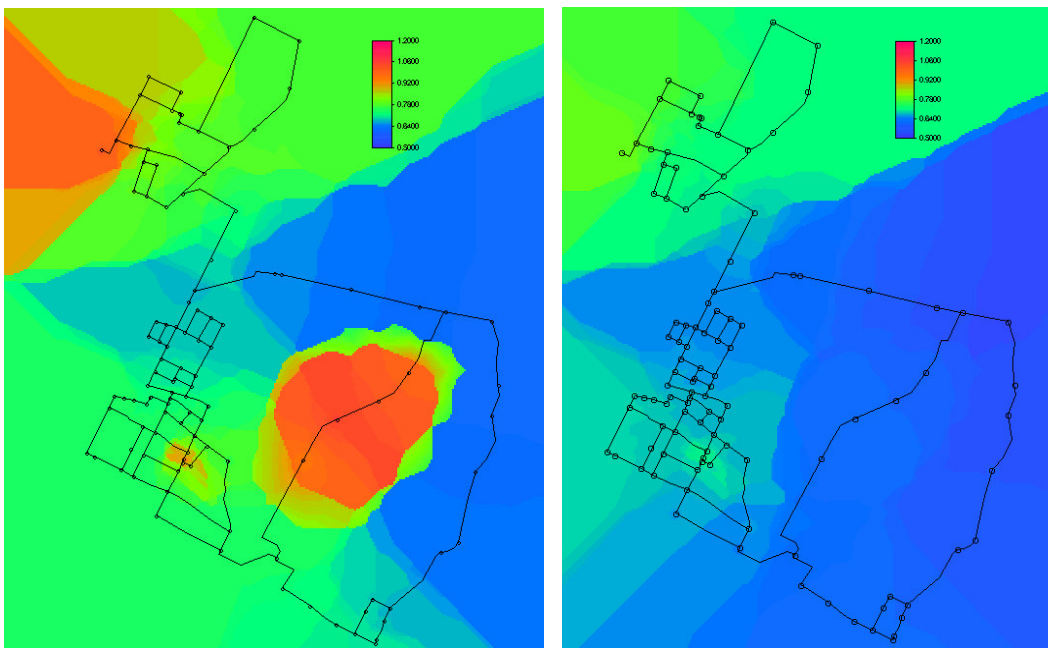
5. assegnazione delle condizioni al contorno (pressione imposta in una delle cabine di immissione e controllo della congruità delle pressioni risultanti di conseguenza alle altre cabine)
6. soluzione delle equazioni fluidodinamiche per la rete in moto permanente;
7. incremento della portata in alcuni nodi (quelli suscettibili di sviluppo industriale) secondo opportune ipotesi, fino al punto al quale la rete, simulata di conseguenza, mostra pressioni troppo basse in almeno un nodo
8. registrazione della portata incrementale in dette condizioni (potenziale industriale di riserva).

Nelle figure seguenti vengono riportati a titolo di esempio alcuni scenari simulati. È importante sottolineare, comunque, che l'utilità del sistema di supporto alle decisioni è nella possibilità di verificare un gran numero di scenari, ipotesi di funzionamento e varianti alla rete, che non si prestano a essere facilmente sintetizzati.

A proposito della rappresentazione dei risultati, si è scelto di interpolare i valori delle pressioni ai nodi come se fossero dati puntiformi. Di conseguenza si è ottenuta in ciascun caso una superficie di pressione continua, che può essere rappresentata come una mappa bidimensionale a gradazioni cromatiche o a curve di livello. Ovviamente questo ha un senso solo in termini di rappresentazione, mentre la pressione varia solo lungo i tronchi della rete e con legge nota, il che impedirebbe di eseguire l'interpolazione con i criteri usati (nella fattispecie, una interpolazione lineare bidimensionale).



**Figura 10 – simulazione della rete di IV specie; situazione attuale (sinistra) e situazione con consumi da PRG 2015 (destra)**



**Figura 11 – simulazione della rete di V specie; trasferimento della cabina di I salto a Villa Selva (sinistra) e situazione attuale (destra), in entrambi i casi con consumi attuali.**

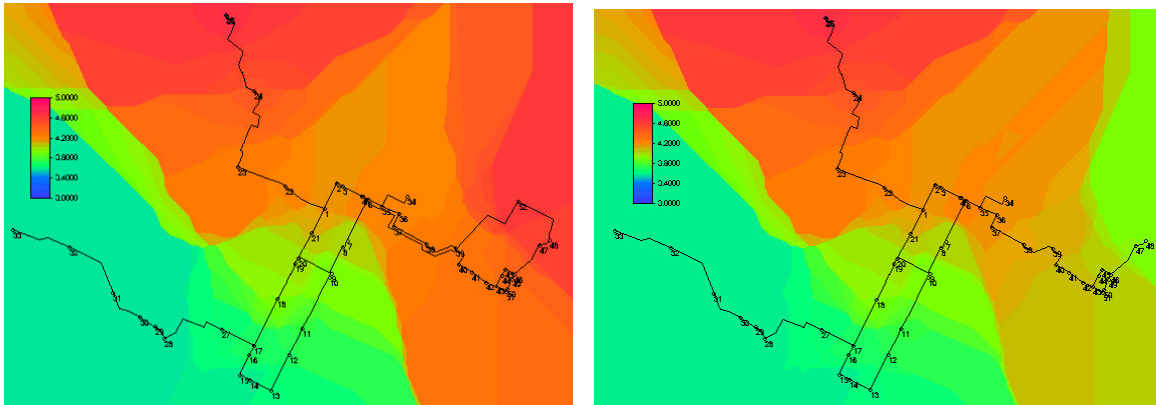


Figura 12 – esempio di simulazioni per il confronto fra due schemi progettuali: collegamento di una cabina con rete magliata (sinistra) o mensola (destra)

## 4. Valutazione multicriteriale degli scenari di progetto

L'uso finale di un sistema di supporto alle decisioni è la valutazione dei diversi possibili scenari. Questa valutazione può essere condotta con tecniche di tipo formale, come le varie metodologie di analisi multicriterio (MCA: p.es. Malczewski, 1999). In casi come quelli simulati, tuttavia, le variabili di tipo geografico-ambientale sono piuttosto ridotte in numero, per le caratteristiche particolari degli interventi richiesti (quasi tutti al solo livello impiantistico, e quindi non coinvolgenti variabili di pianificazione generale) e le decisioni devono essere prese quasi esclusivamente sulla base di considerazioni tecnico-economiche. In casi come questo, è raccomandabile l'impiego di tabelle riassuntive di confronto fra le varie ipotesi, lasciando alla discussione informale anziché ad una procedura come quelle citate la decisione. A titolo di esempio, si riporta in Figura 13 una tabella comparativa di sintesi, messa a punto per un caso specifico.

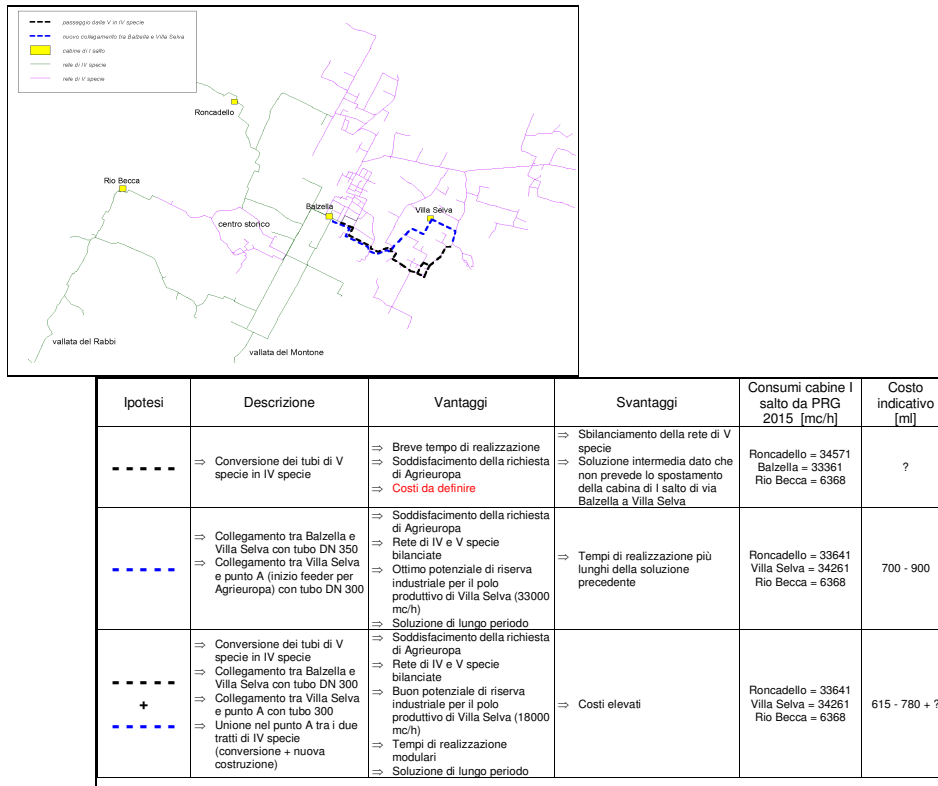


Figura 13 –esempio di tabella comparativa di sintesi fra due interventi

## 5. ringraziamenti

Si ringrazia l'ing. Dante Neri che ha collaborato all'estensione dello studio.

## 6. bibliografia

1. Burrough, P.A., Opportunities and limitations of GIS based modeling of solute transport at the regional scale, in Corwin, D.L., Loague, K., Application of GIS to the modeling of non point source pollutants in the vadose zone, SSSA special publication N. 48, Madison, 1996
2. CIS spa, Piano energetico comunale per la città di Forlì, 1999
3. Citrini, D., Nosedà, G., Idraulica; Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 1978
4. Comune di Forlì, Variante Generale al Piano Regolatore, 2000
5. Maione, U., Moisello, U., Elementi di statistica per l'idrologia; La Goliardica Pavese, Pavia, 1995
6. Malczewski, J., GIS and multicriteria decision analysis, John Wiley & sons, New York 1999