



POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile – Orientamento Idraulica

VALUTAZIONE DELLE CONCENTRAZIONI DI INQUINANTI

AI NODI DI RETI DI ACQUEDOTTO

Relatore: Ing. Umberto Sanfilippo

**Correlatori: Prof. Alessandro Paoletti
Ing. Ilaria Innocenti**

Tesi di Laurea di:

Luigi Maioli matr. 724986

Simone Rossi matr. 721126

Anno Accademico 2009-2010

Ringraziamenti

Ringraziamo vivamente l'Ing. Umberto Sanfilippo per la grande disponibilità che ci ha dimostrato e la costante attenzione con cui ci ha seguito in questi ultimi mesi.

Merita anche un particolare ringraziamento l'Ing. Ilaria Innocenti, per il supporto tecnico e la grande professionalità dimostrata nei nostri confronti.

Si ringraziano inoltre l'Ing. Gianmario Riva per averci fornito importanti dettagli relativi alla rete sovracomunale di Colline Comasche e gli Ingg. Bisso e Coniglio dell' Amap S.p.A di Palermo per il prezioso aiuto nella fase di modellazione della sottorete di Mondello.

Ringraziamenti personali:

Il ringraziamento più grande va sicuramente alla mia famiglia, in particolare ai miei genitori e ai miei nonni, che mi hanno sempre sostenuto in questi anni di studi universitari fino alla stesura della tesi.

Grazie di tutto davvero, senza di voi non sarei mai arrivato fino a qui!

Ringrazio di cuore anche mio fratello Lorenzo per avermi sopportato con pazienza per tutto questo tempo.

Un grazie particolare a Marcella e Angelica, per l'ottima compagnia durante le pause pranzo, e a tutti i miei amici bustesi e milanesi per avermi sostenuto anche nei momenti più difficili.

Infine, ringrazio di cuore Gigi per aver accettato di lavorare con me alla tesi, condividendo le difficoltà incontrate lungo il percorso ma anche la grande soddisfazione finale.

Simone

Ringrazio i miei genitori e i miei fratelli per avermi moralmente sostenuto in questi anni di Politecnico, condividendo con me le difficoltà incontrate e le soddisfazioni ricevute.

Un particolare ringraziamento va a Alessandro e Daniele, degni compagni di una vita.

Ringrazio inoltre gli amici e colleghi del Politecnico, in particolare Fra, Maggio, Ste, Zuzzu e La Fra che hanno condiviso con me parte di questi 5 anni, vivendo con me le difficoltà, i momenti bui e le infinite gratificazioni avute non solo all'interno della vita universitaria ma anche nella vita di tutti i giorni. A loro va il mio più sentito GRAZIE.

Un sentito ringraziamento alla mia ragazza Manuela, per avermi letteralmente sopportato e sostenuto in questi ultimi anni, anche quando le difficoltà sembravano insormontabili.

Un ricordo particolare va ai miei due nonni che purtroppo non possono oggi essere presenti ma che avrei ardentemente desiderato condividessero con me questo momento importante della mia vita.

Infine ringrazio vivamente il mio compagno di tesi Simone, per avere accettato con me questo lavoro e per la sua grande disponibilità ed intraprendenza: non avrei potuto chiedere di meglio.

Luigi

INDICE

1. INTRODUZIONE	6
1.1 Casi pilota di studio.....	7
2. IL SOFTWARE EPANET 2.0.....	8
2.1 Modulo quantitativo e modulo qualitativo	9
2.1.1 Tubi (pipes).....	9
2.1.2 Pompe (pumps)	9
2.1.3 Valvole (valves).....	10
2.1.4 Nodi (nodes).....	10
2.1.5 Modellazione idraulica.....	11
2.1.6 Modellazione della qualità dell'acqua	12
2.2 Dati richiesti in input.....	12
2.2.1 Tubi	13
2.2.2 Pompe	13
2.2.3 Nodi.....	14
2.2.4 Serbatoi e cisterne	14
2.2.5 Pattern	14
2.2.6 [QUALITY]	15
2.2.7 [REACTIONS].....	15
2.2.8 [OPTIONS]	16
3. DESCRIZIONE DELLE RETI	17
3.1 Rete sovracomunale di Colline Comasche	17
3.1.1 Descrizione della rete	18
3.1.2 Schematizzazione della rete in Epanet	20
3.1.3 Analisi idraulica della rete.....	32
3.2 Rete di Mondello	34
3.2.1 Introduzione	34
3.2.2 Sottorete 6 – Mondello.....	37
3.2.3 Calcolo della dotazione idrica dei nodi.....	38
3.2.4 Riproduzione della rete di Mondello in Epanet	39
4. ANALISI CON EPANET DELLA PROPAGAZIONE DI INQUINANTI NELLE RETI DI COLLINE COMASCHE E MONDELLO	41
4.1 Analisi di scenari di inquinamento nella rete di Colline Comasche	41
4.1.1 Inquinamento da solventi nei pozzi di via Patrioti e Baragiola.....	41
4.1.2 Inquinamento da NH ₄ nei pozzi Fontanino	47
4.1.3 Inquinamento da NO ₃ nel pozzo Navedano 1.....	54
4.2 Analisi di scenari di inquinamento nella rete di Mondello.....	58

4.2.1	Contaminazione nel serbatoio Gallo	58
4.2.2	Contaminazione nei serbatoi Gallo e Petrazzi Basso	63
5.	SVILUPPO DI UN MODELLO ALTERNATIVO PER LA STIMA DELLE CONCENTRAZIONI IN RETI D'ACQUEDOTTO	68
5.1	Media pesata delle concentrazioni.....	68
5.2	Tempo di traslazione nelle condotte	68
5.3	Effetto di diluizione nei serbatoi	71
5.3.1	Serbatoi come bioreattori completamente miscelati a flusso continuo.....	72
5.4	Applicazione del modello teorico alla rete di Colline Comasche	80
5.4.1	Inquinamento da NH ₄ nei pozzi Fontanino.....	80
5.4.2	Inquinamento da NO ₃ nel pozzo Navedano 1.....	87
5.4.3	Inquinamento da solventi nei pozzi di via Patrioti e Baragiola.....	91
5.5	Applicazione del modello a schemi base di reti a maglie chiuse	92
5.5.1	Primo schema di rete a maglie chiuse	92
5.5.2	Secondo schema di rete a maglie chiuse.....	98
5.6	Effetto dei serbatoi sulla propagazione della contaminazione.....	104
6.	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	112
6.1	Principali risultati conseguiti	112
6.2	Sviluppi futuri	115
7.	Bibliografia.....	117

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi prende spunto dalla consapevolezza che le acque utilizzate ogni giorno per uso potabile e domestico sono a rischio di contaminazione di vari tipi, che può comprometterne la qualità e nei casi più gravi impedirne l'utilizzo.

In effetti anche in zone come la Lombardia o la Pianura Padana in genere, che raramente sono soggette a problemi di scarsità idrica, la qualità dell'acqua è minacciata dall'intensa attività agricola e industriale, nonché dalla sempre più massiccia urbanizzazione del suolo, che costituisce una seria minaccia soprattutto nei casi di captazione a basse profondità.

Una volta che la qualità dei pozzi è compromessa, caratterizzare le modalità di propagazione della contaminazione all'interno delle reti acquedottistiche che da tali pozzi si alimentano è fondamentale: innanzitutto per delimitare le zone potenzialmente interessate da ogni differente scenario di inquinamento, in secondo luogo per valutare se e in quanto tempo la contaminazione nelle varie erogazioni raggiunge un livello inaccettabile che impone l'interruzione dell'erogazione stessa. La presenza dei serbatoi, ad esempio, diluendo le portate in ingresso, rallenta di ore o in alcuni casi anche di giorni la diffusione degli inquinanti, aumentando il tempo a disposizione del gestore della rete per mettere in atto soluzioni d'emergenza.

Obiettivi del presente studio sono quindi, a partire dalla conoscenza di eventi di inquinamento storici o ipotizzati, la valutazione di quali zone della rete siano più vulnerabili e a che tipo di inquinanti e la caratterizzazione dell'estensione spaziale e della rapidità di diffusione di alcune tipologie di contaminazione, anche ipotizzando anche un loro possibile aggravamento rispetto allo scenario iniziale.

A tal fine le analisi condotte hanno comportato dapprima lo studio quali-quantitativo di reti di acquedotto attraverso la modellazione con uno dei più utilizzati software di simulazione (Epanet 2.0) applicato a casi reali; poi, sulla base delle conoscenze acquisite sui fenomeni, lo sviluppo di un modello teorico di stima delle concentrazioni ai nodi di reti di acquedotto, una volta noti il regime delle portate in rete e le concentrazioni di inquinanti nei pozzi di immissione. Il modello sviluppato consente quindi di caratterizzare la contaminazione di ogni nodo di una generica rete, conoscendone la posizione rispetto alle fonti inquinanti, le concentrazioni di inquinanti in ognuna di esse e la quota parte di portata che tale nodo riceve

da ogni fonte di alimentazione della rete. L'efficacia di tale modello viene verificata confrontando i risultati ottenuti con quelli corrispondenti calcolati dal software Epanet sia su semplici schemi di reti appositamente creati per comprendere quali sono i fattori principali che influiscono sulla propagazione degli inquinanti, sia sugli stessi casi reali analizzati inizialmente.

1.1 Casi pilota di studio

Il presente lavoro è stato sviluppato in continuità e al fine di approfondire le analisi condotte in un precedente lavoro di tesi (La Manna e Salinetti, 2008) che ha studiato come caso pilota di studio la rete sovracomunale dell'acquedotto gestito da Colline Comasche SpA, rete di tipo "ad albero". Tale scelta è stata effettuata per due ordini di motivi: la disponibilità di dati su morfologia e caratteristiche della rete, che permettono una modellazione di dettaglio, e la disponibilità di misure storiche di inquinamento nei principali pozzi di approvvigionamento della rete stessa. Come il precedente, anche il presente lavoro si inserisce nel più ampio progetto di ricerca finanziato dalla fondazione Cariplo "La tutela e l'uso delle risorse idriche nel bacino del Livenessia nell'ambito dell'Alto Lura, un progetto pilota di gestione partecipata" (bando 2006 "Gestione sostenibile delle acque: promuovere forme di gestione integrata e partecipata delle acque superficiali"), progetto che si pone tra gli altri lo scopo di tutelare il fabbisogno idropotabile della zona sia in termini qualitativi che quantitativi.

Per estendere tali analisi ad una rete di tipo "a maglie chiuse" si è analizzato il comportamento della rete reale di Mondello, frazione del comune di Palermo, rete di estensione e complessità maggiori rispetto a quella di Colline Comasche, per la quale si conoscono nel dettaglio tutte le caratteristiche idrauliche, ma non sono disponibili dati storici di inquinamento nei pozzi. Pertanto si è effettuata un'analisi volta alla definizione delle aree di influenza dei due serbatoi di alimentazione principale, allo scopo di comprendere che effetti potrebbe avere sulla rete un loro inquinamento.

2. IL SOFTWARE EPANET 2.0

Per realizzare simulazioni estese al lungo periodo sul comportamento idraulico e sulla qualità delle acque entro reti di condotte in pressione si è utilizzato il software EPANET 2.0 (Rossman L.A., 2000), sviluppato dalla Water Supply and Water Resources Division (in passato the Drinking Water Division) dell'U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory.

Esso è in grado di dare informazioni sulla portata in ogni tronco di condotta, sulla pressione in ogni nodo, sul livello raggiunto dall'acqua in ogni serbatoio e sulla concentrazione delle componenti chimiche nell'intera rete nel periodo di simulazione, con la discretizzazione temporale desiderata, tenendo conto anche delle eventuali reazioni chimiche lungo le pareti dei tubi o all'interno del flusso stesso dovuto al trasporto di massa.

Questo programma fornisce un pacchetto completo per l'analisi idraulica che permette di:

- trattare sistemi di qualsiasi dimensione;
- calcolare le perdite di carico usando le formule di Hazen-Williams, di Darcy-Weisbach o di Chezy-Manning;
- considerare le piccole perdite di carico dovute a curve, strozzature, punti singolari;
- considerare pompe a giri fissi o a velocità variabile;
- calcolare l'energia consumata dalle pompe e i costi;
- considerare vari tipi di valvole incluse quelle di ritegno, di chiusura, di regolazione della pressione e di controllo della portata;
- calcolare lo stoccaggio nei serbatoi aventi sezioni variegata;
- considerare molteplici categorie di richiesta idrica ai nodi, ciascuna con propria modalità di variazione nel tempo;
- prevedere in anticipo quali possono essere le conseguenze di eventi straordinari come il funzionamento di idranti antincendio, le forniture particolari d'acqua, l'incremento o la diminuzione dei consumi, il fuori servizio di alcune strutture necessarie per l'esecuzione di lavori o dovuto a guasti, l'effetto di una prevista estensione della rete.

Inoltre EPANET è in grado di effettuare analisi qualitative dell'acqua che permettono di:

- modellare l'età dell'acqua in tutta la rete;

- modellare il movimento e l'evoluzione di un composto reattivo man mano che esso aumenta (per esempio la disinfezione tramite prodotti) oppure diminuisce nel tempo (per esempio il cloro residuo), prevedendo l'aumento o la diminuzione delle reazioni fino a raggiungere il limite di concentrazione.

2.1 Modulo quantitativo e modulo qualitativo

In EPANET la rete idrica è schematizzata con una serie di rami (links), connessi tra di loro tramite nodi (nodes). Le connessioni possono essere di tre tipi: tubi, pompe e valvole; i nodi, oltre ad essere semplici punti di giunzione tra le condotte, possono essere considerati come: punti di consumo (nodi di domanda), punti di immissione (nodi di sorgente) o punti di conservazione (nodi di deposito). Si analizzano di seguito i singoli componenti della rete.

2.1.1 Tubi (pipes)

I tubi trasportano l'acqua da un nodo all'altro; la direzione di scorrimento del flusso va dall'estremità a carico maggiore a quella a carico minore. La perdita di carico dovuta all'attrito si esprime tramite la relazione monomia:

$$h_L = a \cdot q^b \quad (1)$$

dove h_L è la perdita di carico [m]; q è la portata [mc/giorno]; a è il coefficiente di resistenza; b è l'esponente della portata.

EPANET può utilizzare tre tipi di formule di resistenza con diversi valori dei coefficienti a e b :

$$a = 4.72C^{-1.85}d^{-4.87}L \quad (2)$$

$$a = 0.0252f(\varepsilon, d, q)d^{-5}L \quad (3)$$

$$a = 4.66n^2d^{-5.33}L \quad (4)$$

dove C è il coefficiente di rugosità di Hazen-Williams; ε è il coefficiente di rugosità di Darcy-Weisbach [piedi]; f è il fattore d'attrito, dipende da ε , d , q ; L è la lunghezza del tubo [piedi].

2.1.2 Pompe (pumps)

Le pompe sono componenti che servono ad alzare la pressione dell'acqua. La relazione che lega la portata sollevata dalla pompa alla prevalenza fornita si chiama curva caratteristica, che EPANET rappresenta con la seguente funzione:

$$h_G = h_0 - aq^b \quad (5)$$

dove h_G è il carico fornito dalla pompa al fluido [m]; h_0 è il carico a portata nulla [m]; q è la portata [mc/giorno]; a è il coefficiente di resistenza; b è l'esponente della portata.

Fornendo al programma h_0 e altri due punti della curva caratteristica della pompa, è possibile stimare automaticamente i valori di a e di b . Nel caso in cui non sia nota la curva caratteristica, EPANET permette di assumere che la pompa fornisca energia costante all'acqua; in questo caso l'equazione che rappresenta il comportamento della macchina è:

$$h_G = 8.81 \frac{H_P}{q} \quad (6)$$

dove H_P sono i cavalli vapore della pompa; q è la portata specifica.

Il programma assume che il fluido possa scorrere in una sola direzione e che le pompe operino entro i limiti di portata e carico stabiliti dalle loro curve caratteristiche. È possibile farle entrare in funzione e bloccarle ad orari prestabiliti o nel caso vengano soddisfatte determinate condizioni (per esempio quando il livello d'acqua nei serbatoi scende al di sotto di un valore fissato o quando la pressione ai nodi è maggiore o minore di valori consentiti).

2.1.3 Valvole (valves)

Esistono valvole di controllo situate all'interno dei tubi che possono essere rappresentate come completamente aperte o chiuse e valvole che controllano la pressione o la portata in specifici punti della rete.

2.1.4 Nodi (nodes)

Per ciascuno dei nodi è necessario fornire la quota sul livello del mare, affinché possa essere calcolato il carico al nodo. Inoltre devono essere fornite al programma tutte le informazioni riguardanti il consumo o l'immissione di acqua per ogni nodo. Sono classificati come nodi anche i serbatoi (tanks) e le cisterne (reservoirs).

La formula che rappresenta la variazione del livello in un serbatoio è:

$$\Delta y = \frac{q}{A} \Delta t \quad (7)$$

dove Δy è la variazione del livello [m]; q è la portata che entra o esce dal serbatoio [mc/giorno]; A è l'area della sezione trasversale del serbatoio [mq]; Δt è l'intervallo di tempo [s]. È inoltre

necessario fornire al programma i valori minimo e massimo del livello d'acqua nei serbatoi. Per quanto riguarda invece le cisterne, esse rappresentano fonti esterne d'acqua quali laghi, fiumi e pozzi, pertanto a queste non deve essere associato alcun consumo o immissione d'acqua.

2.1.5 Modellazione idraulica

Per quanto riguarda la simulazione idraulica, le relazioni matematiche che vengono risolte dal programma sono le diverse a seconda del componente considerato.

Le equazioni caratteristiche di un serbatoio sono:

$$\frac{dy_s}{dt} = \frac{q_s}{A_s} \quad (8)$$

$$h_s = E_s + y_s \quad (9)$$

$$q_s = \sum_i q_{s,i} - \sum_j q_{s,j} \quad (10)$$

dove y_s è il livello nel serbatoio [m]; q_s è la portata entrante nel serbatoio [mc/giorno]; A_s è l'area della sezione trasversale del serbatoio [mq]; h_s è la quota piezometrica nel serbatoio [m]; E_s è la quota del serbatoio [m].

Per ogni ramo che collega i nodi i e j ed ogni nodo d'immissione/prelievo k valgono:

$$h_i - h_j = f(q_{ij}) \quad (11)$$

$$\sum_i q_{k,i} - \sum_j q_{k,j} - Q_k = 0 \quad (12)$$

dove h_i e h_j sono le quote piezometriche ai nodi i e j [m]; q_{ij} è la portata che passa nel ramo che unisce i nodi i e j [mc/giorno]; Q_k è la portata fornita (-) o consumata (+) nel nodo k [mc/giorno].

L'equazione (8) esprime la conservazione del volume d'acqua in un serbatoio, la (10) e la (12) sono le equazioni di continuità del serbatoio e del ramo, la (11) fornisce la perdita o il guadagno di energia dovuta al passaggio dell'acqua lungo una connessione. Noti i valori di y_s all'istante iniziale, si possono risolvere le equazioni (11) e (12) usando la (10) come condizione al contorno. EPANET risolve iterativamente questo sistema di equazioni e successivamente calcola la quantità q_s tramite la (10) per poterla poi inserire nella (8) al fine di trovare il nuovo livello d'acqua nel serbatoio dopo un dato intervallo di tempo. Infine i passaggi sopra elencati vengono ripetuti per tutti gli intervalli di tempo nei quali è stata suddivisa la simulazione.

2.1.6 Modellazione della qualità dell'acqua

Relativamente alla simulazione della qualità delle acque, EPANET permette di analizzare il comportamento di una sostanza chimica dispersa all'interno della rete. A tale scopo viene utilizzata la seguente relazione:

$$\frac{\partial C_{ij}}{\partial t} = -\frac{q_{ij}}{A_{ij}} \frac{\partial C_{ij}}{\partial x_{ij}} + \theta(C_{ij}) \quad (13)$$

dove C_{ij} è la concentrazione della sostanza in esame lungo il ramo che connette i nodi i e j [mg/L]; A_{ij} è la sezione trasversale del ramo [mq]; q_{ij} è il grado di reazione della sostanza considerata lungo il ramo [g/(L giorno)].

Tale equazione può essere risolta solo se è nota la concentrazione iniziale per $t = 0$ e se la concentrazione all'inizio di ogni ramo soddisfa un bilancio di massa riferito alla sostanza disciolta.

Si ottiene così un sistema di due equazioni differenziali che viene risolto tramite un metodo numerico chiamato Metodo di Volume ad Elementi Discreti (DVEM): in funzione del periodo lungo il quale le portate sono costanti, DVEM calcola un sottointervallo per la valutazione della qualità e divide ogni tubo in un certo numero di segmenti di volume; durante gli intervalli così trovati, si assegna la quantità di massa contenuta in ogni volume al volume successivo a valle; nel caso in cui il segmento seguente sia costituito da un nodo di giunzione, la massa e la portata che entrano in esso vengono sommate a quelle già presenti, provenienti dagli altri tubi.

Dopo che questa fase di trasporto è stata completata per tutti i tubi presenti, in ogni nodo è nota la concentrazione risultante, che viene assegnata all'estremità di monte dei tubi nei quali il flusso è uscente rispetto al nodo considerato. In seguito si applicano le equazioni delle reazioni chimiche che avvengono all'interno della massa fluida. Tutta questa sequenza viene ripetuta ogni volta che cambiano le condizioni idrauliche.

2.2 Dati richiesti in input

Come si è già visto i componenti del sistema si suddividono in nodi e in connessioni. Quindi per realizzare un modello e risolvere idraulicamente una rete è necessario possedere la descrizione di tutti questi componenti. I dati necessari possono essere così riassunti:

- Tubi (pipes): diametro, lunghezza, coefficiente di scabrezza, nodo iniziale, nodo finale.

- Nodi (junctions): coordinate (X,Y), quota, domanda e variazione della domanda durante il periodo di simulazione.
- Serbatoi (tanks): coordinate (X,Y), quota, livelli iniziale, minimo e massimo, diametro.
- Cisterne (reservoirs): coordinate (X,Y), carico totale.
- Pompe (pumps): nodo iniziale, nodo finale, curva della pompa.

Si analizzano in dettaglio i diversi componenti della rete.

2.2.1 Tubi

Nella sezione [PIPES] è possibile fornire una descrizione di ogni tubo che compone la rete. Il formato che compete a questa sezione è il seguente :

id node1 node2 lenght diam rcoeff (lcoeff) (CV)

dove ***id*** numero di identificazione del tubo; ***node1*** numero di identificazione del primo estremo (nodo) del tubo; ***node2*** numero di identificazione del secondo estremo (nodo) del tubo; ***lenght*** lunghezza del tubo (in metri o piedi); ***diam*** diametro del tubo (in mm o in pollici); ***rcoeff*** coefficiente di scabrezza (per uno stesso tubo può essere espresso da diversi valori, a seconda del coefficiente di resistenza α espresso nella (1), calcolato con la relazione (2) o (3) o (4)); ***lcoeff*** coefficiente di perdite di carico concentrate (facoltativo); ***CV*** indica che nel tubo è presente una valvola di controllo.

Al termine della simulazione il programma fornisce come output per i nodi i valori di portata (entrante o uscente), carico, pressione; mentre per le connessioni i valori di portata transitante, velocità, perdita di carico, fattore di frizione, stato (aperto o chiuso).

2.2.2 Pompe

Vengono definite nella sezione [PUMPS] attraverso le loro curve caratteristiche. A seconda delle informazioni disponibili ci sono diversi formati con cui definire una pompa:

- ***id node1 node2 hp*** se non si conosce la curva caratteristica ma solo la potenza nominale;
- ***id node1 node2 h1 q1*** se si conosce un solo punto della curva caratteristica: il programma ipotizza che il carico a portata nulla sia pari a 1.33 volte h_1 , e che la portata massima sia 2 volte q_1 ;
- ***id node1 node2 h0 h1 q1 h2 q2*** se si conosce la curva caratteristica della pompa, basta inserire nel programma il carico a portata nulla e due punti qualunque ed EPANET interpolerà i dati creando una curva adeguata

dove **id** è il numero identificativo della pompa (che non può essere lo stesso numero che identifica un tubo definito in [PIPES]); **node1** è il numero di identificazione del nodo che sta a monte della pompa; **node2** è il numero di identificazione del nodo che sta a valle della pompa; **hp** è la potenza della pompa (in cavalli vapore o in kW); **h0** è il carico a portata nulla; **h1, q1** punto 1 della curva caratteristica; **h2, q2** punto 2 della curva caratteristica.

Va osservato che il programma consente al flusso di scorrere in una sola direzione e blocca la pompa se questa lavora oltre i suoi limiti. È possibile comunque variare la velocità e l'impostazione della pompa attraverso comandi espressi nelle sezioni [CONTROL] e [STATUS].

2.2.3 Nodi

Per quanto riguarda le semplici giunzioni esiste la sezione [JUNCTIONS] che ha formato:

id elev (demand) (pattern)

dove **id** è il numero identificativo del nodo; **elev** quota del nodo (in metri o piedi); **demand** richiesta d'acqua al nodo(se positiva), fornitura esterna (se negativa); **pattern** è il numero identificativo del time-pattern che, nella sezione [PATTERN] definisce la domanda al nodo.

2.2.4 Serbatoi e cisterne

Questi elementi vengono definiti nella sezione [TANKS] che ha formato:

id elev (initlevel minlevel maxlevel diam)

dove **id** numero di identificazione dell'elemento (che non può essere uguale al numero di un nodo definito in [JUNCTIONS]); **elev** quota sul livello del mare del fondo del serbatoio/cisterna; **initlevel** livello dell'acqua all'inizio della simulazione (rispetto al fondo); **minlevel** livello minimo consentito (sopra il fondo); **maxlevel** livello massimo consentito (sopra il fondo); **diam** diametro del serbatoio.

Bisogna inoltre osservare che una cisterna è definita soltanto dal numero di identificazione e dalla quota del pelo libero. Una cisterna per definizione mantiene il livello del pelo libero costante, un serbatoio ha il pelo libero che varia con il prelievo/rifornimento.

2.2.5 Pattern

In Epanet esiste la possibilità di variare nel tempo le domande ai nodi (nella sezione [JUNCTIONS]) o la concentrazione con cui vengono immesse sostanze esterne (nella sezione [SOURCES]) . Tutto questo si fa utilizzando la sezione [PATTERN] il cui formato è :

idpattern mult1 mult2 ...

dove ***idpattern*** è il numero di identificazione del pattern (indicato nelle sezioni suddette);
multn è il fattore moltiplicativo che si riferisce all'istante n-esimo.

In pratica sappiamo che la domanda, così come la concentrazione di sostanze immesse dall'esterno, rimane costante per un intervallo pari all'Hydraulic time-step (di default pari ad un'ora, ma modificabile nella sezione [TIME]), ma può variare da un intervallo a quello successivo. Il valore della domanda/concentrazione all'istante n-esimo è pari al valore base di domanda/concentrazione per il fattore moltiplicativo indicato al posto n-esimo del time pattern relativo alla domanda/concentrazione stessa.

Il controllo e la simulazione sulla qualità dell'acqua e delle sostanze disciolte in essa può essere fatto utilizzando le tre sezioni : [QUALITY], [REACTIONS] e [OPTIONS].

2.2.6 [QUALITY]

Questa sezione stabilisce la concentrazione iniziale della sostanza in esame ai vari nodi della rete; il formato è:

node1 (node2) quality

dove ***node1*** è il numero identificativo del nodo cui si riferisce il valore della concentrazione;
node2 è il numero d'identificazione dell'ultimo nodo dell'intervallo che comincia con node1 e a cui va applicato il valore di concentrazione; ***quality*** è il valore della concentrazione del costituente analizzato.

Va osservato che il programma può simulare l'andamento della concentrazione di una sola sostanza chimica alla volta.

L'inquinante deve essere definito nella sezione [OPTIONS] →[SOURCES]. In questa sezione si varia la concentrazione con cui la sostanza analizzata entra nel nodo della rete; il formato è :

nodeid conc pattern

dove ***nodeid*** è il numero d'identificazione del nodo che immette in circolo la sostanza; ***conc*** è il valore base della concentrazione al nodo; ***pattern*** è il numero identificativo del time-pattern che esprime (nella sezione [PATTERN]) come varia la concentrazione nel tempo.

2.2.7 [REACTIONS]

Questa sezione fornisce i coefficienti di velocità delle reazioni che riguardano la sostanza in esame. Come abbiamo visto devono essere forniti due tipi di coefficienti: il primo (bulk

coefficient) esprime la velocità delle reazioni che avvengono all'interno della massa fluida; il secondo (wall coefficient) esprime la velocità delle reazioni che avvengono tra la massa fluida e le pareti del tubo. Il formato che compete a questa sezione è :

GLOBAL BULK bulkcoeff

GLOBAL WALL wallcoeff

BULK pipe1 (pipe2) bulkcoeff

WALL pipe1 (pipe2) wallcoeff

TANK node1 (node2) bulkcoeff

dove **GLOBAL** si usa per assegnare o stesso coefficiente a tutti i tubi; **pipe1 (pipe2)** indica l'intervallo di tubi cui riferire il coefficiente espresso nella stessa riga; **TANK** si usa per assegnare un bulk coefficient ad uno o più serbatoi/cisterne.

2.2.8 [OPTIONS]

Una sezione molto importante è quella delle [OPTIONS] che consente come già accennato di selezionare alcune opzioni. Il formato dei comandi più interessanti è :

UNITS unitoption

HEADLOSS headlossoption

QUALITY qualityoption

dove **unitoption** permette di scegliere se inserire i dati col sistema metrico inglese (CFS), o se inserirli col Sistema Internazionale (SI); **headlossoption** permette di scegliere con quale formulazione calcolare le perdite di carico e quindi quale coefficiente di scabrezza usare per definire i tubi, scegliendo tra H-W (formula di Hazen- Williams), C-M (Chezy-Manning), D-W (Darcy-Weisbach); **qualityoption** è il nome della sostanza chimica che viene analizzata durante la simulazione.

3. DESCRIZIONE DELLE RETI

3.1 Rete sovracomunale di Colline Comasche

L'area oggetto di indagine si trova in provincia di Como nei territori dei Comuni di Villa Guardia, Lurate Caccivio, Luisago, Cassina Rizzardi e Fino Mornasco.

Il bacino considerato presenta un'estensione di circa 6.6 kmq, di cui 4.6 kmq di aree naturali e 2.2 kmq di aree urbanizzate collocate tra quota 370 m s.l.m. (sorgente roggia Gorgonella) e quota 285 m s.l.m. (confluenza nel torrente Lura).



Figura 3.1 - Localizzazione dell'area di studio

Le aree naturali sono caratterizzate per circa il 20% dalla zona turistica ricreativa del Golf Monticello (campo di gara internazionale) e per il restante 80% da campi coltivati. L'attività agricola del bacino si esplica mediante la coltivazione di mais e foraggio.

Il sistema idrografico di riferimento del bacino è la roggia Livescia, che nasce dall'affioramento della falda a una quota di 320 m s.l.m. circa. Alla roggia fluiscono corsi d'acqua minori quali la roggia Gorgonella tradizionalmente deputati al drenaggio delle acque naturali e antropiche della zona.

Nel bacino oltre alla popolazione dei Comuni sopraccitati sono presenti infrastrutture di rilievo quali: l'autostrada A9 "Dei Laghi", un tratto delle Ferrovie Nord di Milano, parte della strada statale "Briantea", vari tratti di strade provinciali, zone industriali con attività ad elevato impatto (industrie chimiche, stamperie, tintorie...), il depuratore per gli scarichi civili ed industriali originati nel bacino.

Il bacino ha andamento nord-sud mentre il sistema idrografico della roggia Livescia ha andamento iniziale ovest-est e quindi nord-sud.

Oltre al reticolo naturale del bacino sono presenti sistemi di drenaggio sia delle acque reflue che delle acque meteoriche civili e delle zone industriali, oltre al collettore consortile che convoglia le acque reflue dagli scaricatori delle singole reti all'impianto di depurazione centralizzate nel Comune di Fino Mornasco.

3.1.1 Descrizione della rete

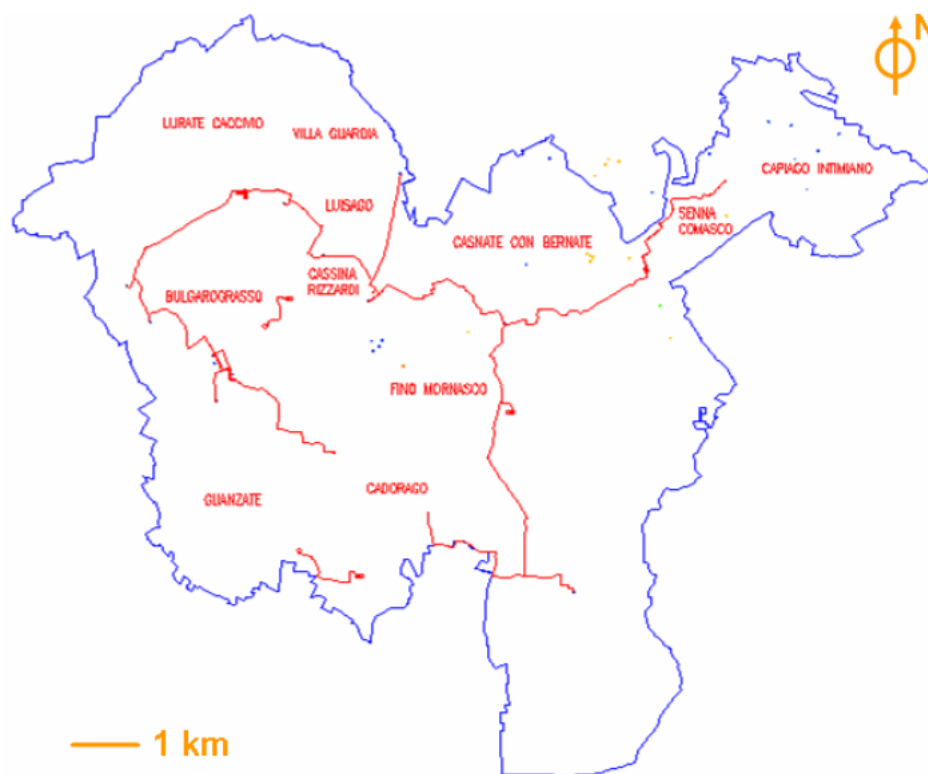


Figura 3.2 - Rete sovracomunale di Colline Comasche

La rete sovracomunale nella zona oggetto di studio gestita da Colline Comasche si può suddividere in due parti: rete est e rete ovest messe in collegamento dal Pensile La Costa.

La rete sovracomunale è costituita da una serie di camerette di erogazione e centrali che alimentano le reti dei Comuni che non sono in grado di far fronte da soli all'approvvigionamento idrico, da una serie di pozzi di proprietà di Colline Comasche che sono le fonti di approvvigionamento della rete stessa e da una serie di serbatoi e pensili per l'accumulo di acqua (che vengono riportati in Figura 3.3).

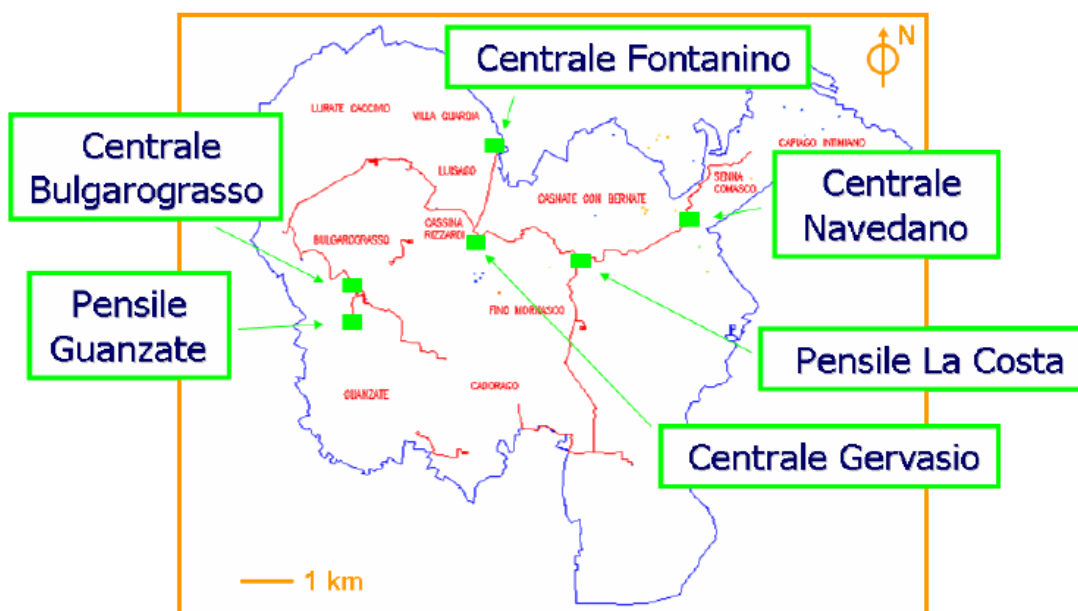


Figura 3.3 - Serbatoi e pensili della rete sovracomunale di Colline Comasche

In generale si può dire che tutti i Comuni collegati alla rete d'acquedotto sovracomunale prelevano acqua e non riforniscono, per cui l'acquedotto sovracomunale risulta alimentato unicamente dai suoi pozzi aziendali (Figura 3.4):

- P2 pozzo di via Patrioti a Bulgarograsso;
- P8 pozzo Fontanino a Villa Guardia, il più importante della rete, inquinato da ferro (sono 2 pozzi vicini che prelevano dalla stessa falda e sta per essere realizzato un terzo pozzo);
- P9 pozzo Villette Autostrada a Fino Mornasco;
- P11 e P12 pozzi Navedano 1 e Navedano 2 che alimentano la centrale di Navedano;
- P4 pozzo Boscosta, chiuso perché inquinato da solventi;
- P16 pozzo Ronco Vecchio che appartiene al tratto staccato di acquedotto sovracomunale interno a Cassina Rizzardi;

P3 pozzo Baragiola a Bulgarograsso.

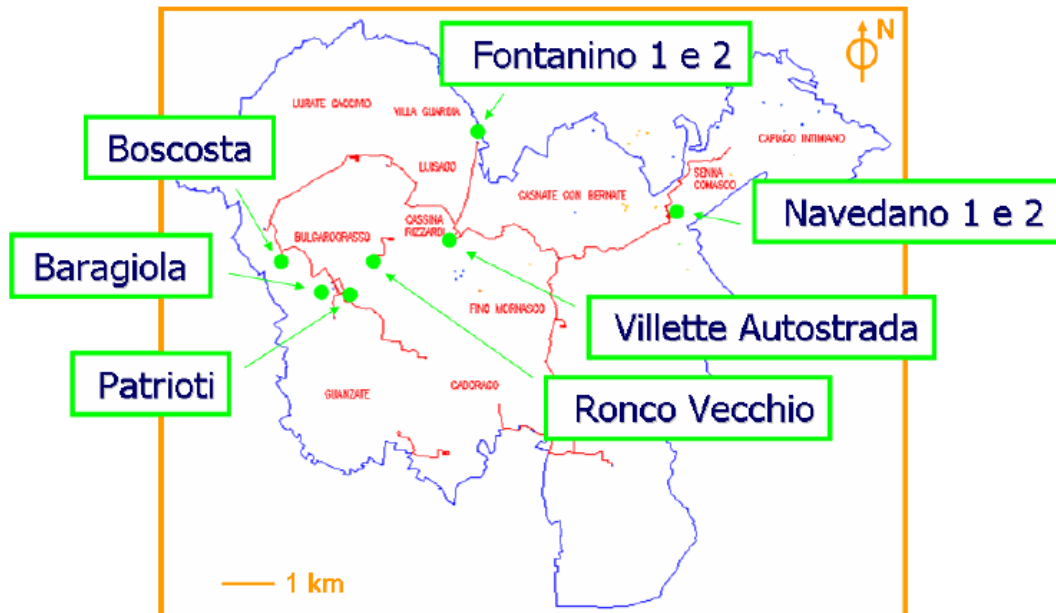


Figura 3.4 - Pozzi della rete sovracomunale di Colline Comasche

Pochi Comuni di questa zona si approvvigionano autonomamente per insufficienza di fonti proprie: essi generalmente sono collegati alla rete sovracomunale di Colline Comasche o ad altre reti.

3.1.2 Schematizzazione della rete in Epanet

Per realizzare il modello della rete sovracomunale attraverso il software EPANET è necessario effettuare delle semplificazioni. In questo paragrafo si riporta la schematizzazione della rete d'acquedotto (Figura 3.6).

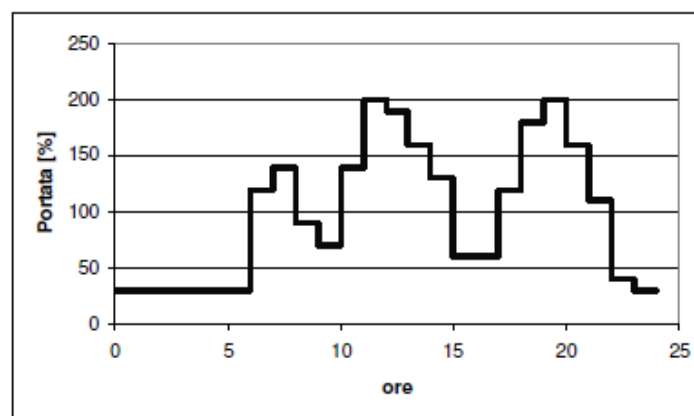


Figura 3.5 - Andamento orario delle portate

Tabella 3.1 - Andamento orario delle portate

Ora	0÷1	1÷2	2÷3	3÷4	4÷5	5÷6	6÷7	7÷8	8÷9	9÷10	10÷11	11÷12
Portata [%]	30	30	30	30	30	50	120	140	100	80	140	190
Ora	12÷13	13÷14	14÷15	15÷16	16÷17	17÷18	18÷19	19÷20	20÷21	21÷22	22÷23	23÷24
Portata [%]	190	160	130	60	60	120	190	200	160	110	40	30

Per quanto riguarda le portate erogate dalla rete si sceglie un andamento orario delle portate richieste nel giorno di massimo consumo da un centro urbano medio-piccolo, in percentuale rispetto alla portata media $Q_{24\max}$ (Becciu e Paoletti, 2005), come mostrato in Figura 3.5 e in Tabella 3.1.

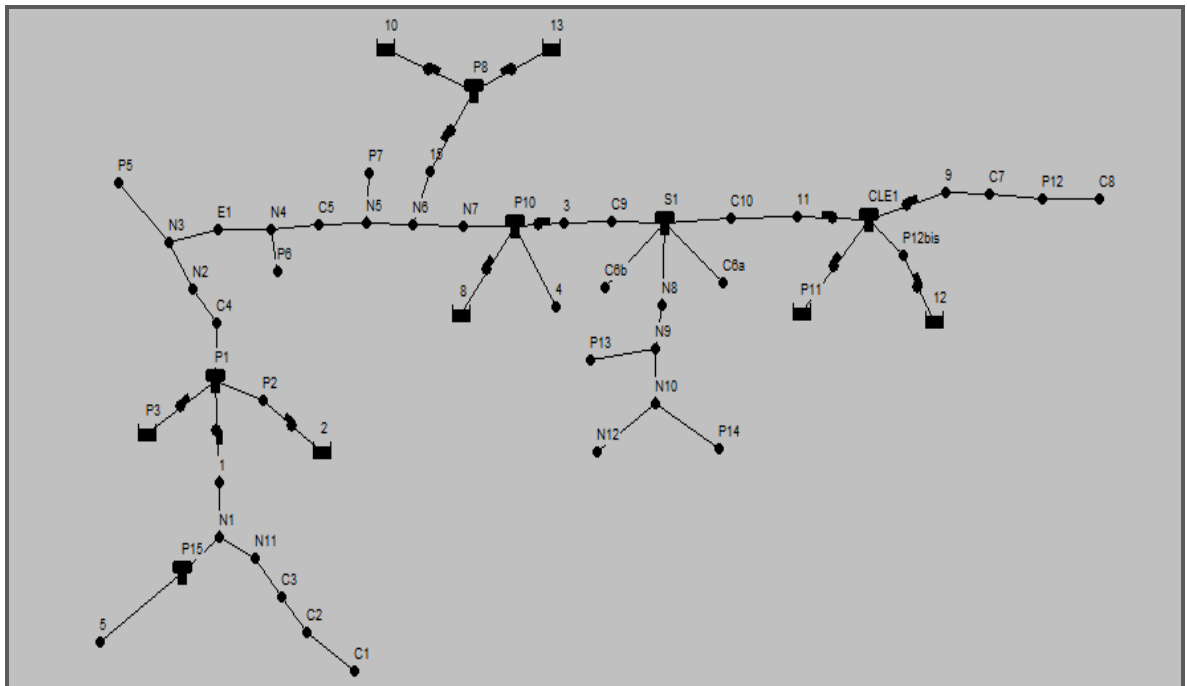


Figura 3.6 - Rappresentazione dell'intera rete di Colline Comasche implementata in Epanet

La rete è stata suddivisa in cinque parti e per ciascuna si elencano le caratteristiche di:

- erogazioni (junctions),
- serbatoi (tanks),
- pozzi (reservoirs),
- pompe (pumps),
- nodi (junctions)
- condotte (pipes),

che costituiscono i dati in input richiesti da EPANET. Tali dati sono mostrati da Figura 3.7 a Figura 3.16 e da Tabella 3.2 a Tabella 3.28.

3.1.2.1 Schema della rete - parte 1

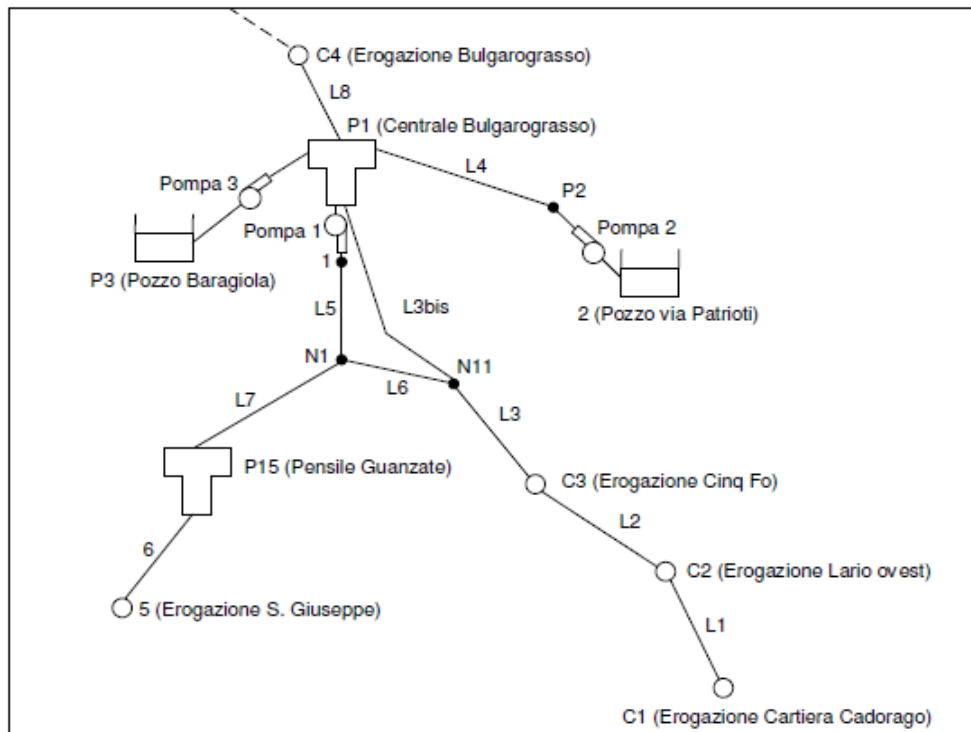


Figura 3.7 - Schematizzazione della rete parte 1

Tabella 3.2 - Erogazioni della rete parte 1

Erogazione	Cartiera Cadorago	Lario Ovest	Cinq Fo	Bulgarograsso	S.Giuseppe
ID	C1	C2	C3	C4	C5
Quota [m s.m.]	326	308.5	316.7	314.4	329.5
Portata Q_{24} [l/s]	10.90	1.00	5.50	3.43	0.91

Per inserire in EPANET un serbatoio di forma conica, come il serbatoio pensile Guanzate, il programma richiede in input una curva volume-altezza dell'acqua (Figura 3.8).

Tabella 3.3 – Serbatoi della rete parte 1: serbatoio pensile Guanzate

Pensile Guanzate	
ID	P15
Quota terreno [m s.l.m]	331
Quota fondo pensile [m s.l.m.]	376
Livello iniziale [m]	8
Livello minimo [m]	6
Livello massimo [m]	8
Forma	Conica
Volume [mc]	1500
Diametro massimo [m]	24

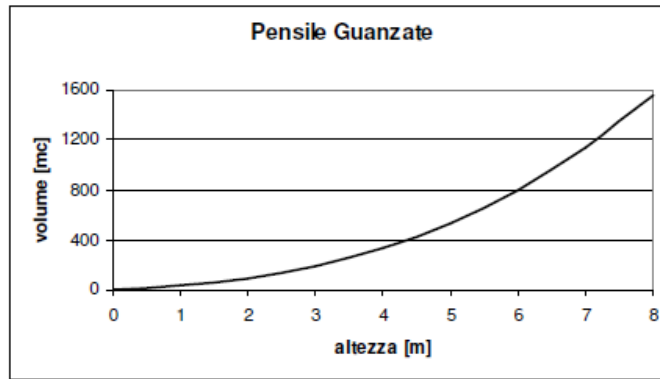


Figura 3.8 - Curva volumi-altezze del serbatoio pensile Guanzate

Il serbatoio P1 è un serbatoio in pressione per poter alimentare a gravità le camerette di consegna in direzione dell'erogazione di Bulgarograsso C4; esso è mantenuto in pressione dal pensile Guanzate intorno a 4 bar. Poiché EPANET è in grado di rappresentare solo serbatoi di forma cilindrica, nel caso in cui il serbatoio ha la forma di un parallelepipedo si calcola il diametro equivalente:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4Vol}{\pi h}} \quad (14)$$

dove Vol è il volume del serbatoio; h è l'altezza del serbatoio stesso.

Tabella 3.4 – Serbatoi della rete parte 1: serbatoio Centrale Bulgarograsso

Serbatoio Centrale Bulgarograsso	
ID	P1
Quota terreno [m s.l.m.]	315.1
Quota serbatoio [m s.l.m.]	315.1
Livello iniziale [m]	2.8
Livello minimo [m]	0.2
Livello massimo [m]	2.8
Forma	Parallelepipedo
Volume [mc]	200
Diametro equivalente [m]	9.5

Tabella 3.5 – Pozzi della rete parte 1

Pozzo	Via Patrioti	Baragiola
ID	2	P3
Quota terreno [m s.l.m.]	319	315
Carico totale [m s.l.m.]	288	287.5
Profondità pozzo [m dal p.c.]	50	50

Tabella 3.6 – Pompe della rete parte 1

ID	1	2	3
ID nodo iniziale	P1	2	P3
ID nodo finale	1	P2	P1
Modello	Non noto	Grundfos SP 95-4-B	Caprari E10S50/2B
Curva	1	2	3

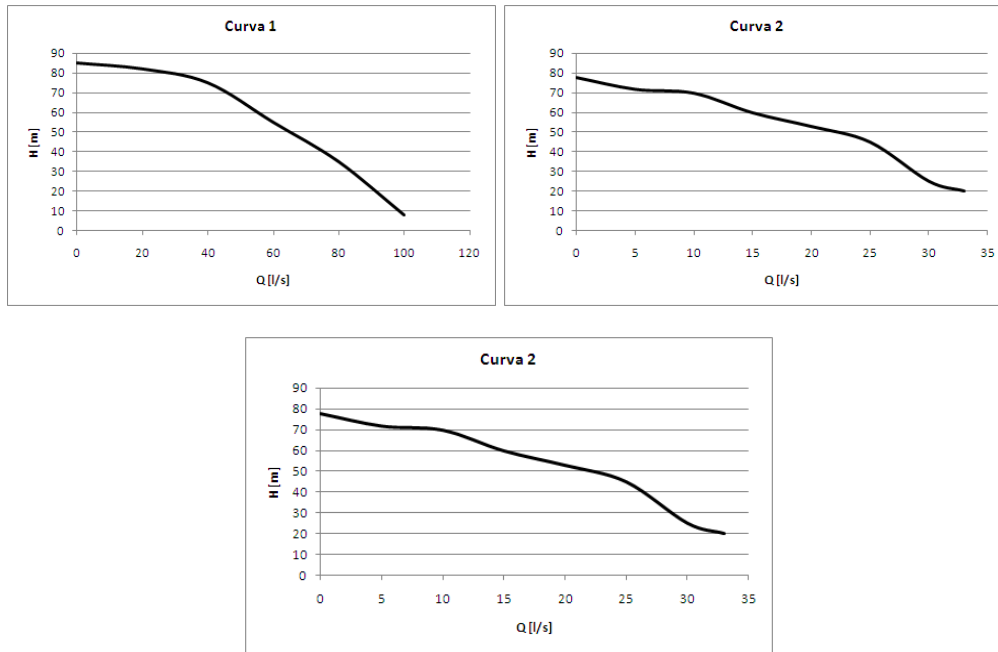


Figura 3.9 – Curve caratteristiche pompe della rete parte 1

Tabella 3.7 – Nodi della rete parte 1

ID	Quota [m s.l.m.]
N1	311.5
N11	317.2
1	313.6
P2	313.5

Tabella 3.8 – Condotte della rete parte 1

ID	Tratto	Lunghezza [m]	Diametro [mm]	Scabrezza [mm]
L1	C1-C2	585	250	0.9
L2	C2-C3	546	250	0.9
L3	C3-N11	1178	150	0.9
L4	P2-P1	564	200	1.8
L5	1-N1	296	400	1.8
L6	N1-N11	348	200	1.8
L7	N1-P15	531	400	1.8
L8	P1-C4	333	250	0.9
6	P15-5	50	200	1.8

3.1.2.2 Schema della rete - parte 2

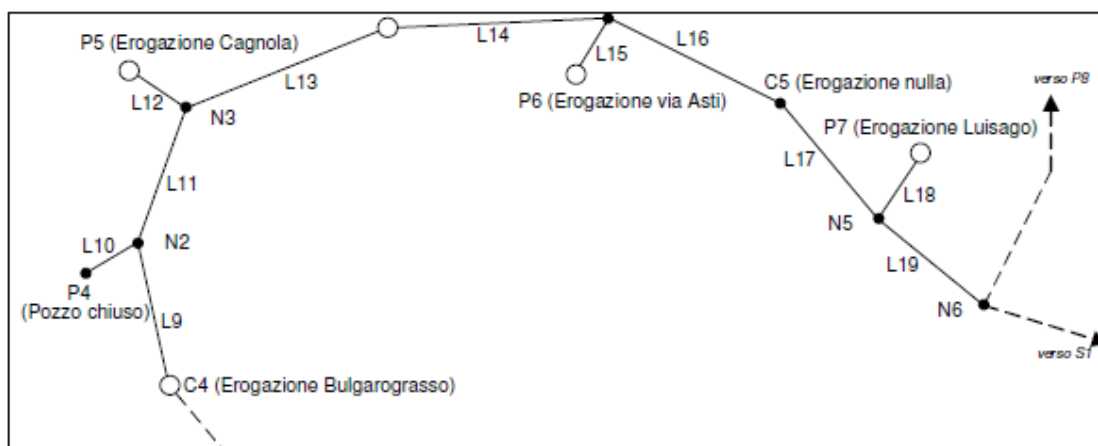


Figura 3.10 - Schematizzazione della rete - parte 2

Tabella 3.9 - Erogazioni della rete parte 2

Erogazione	Cagnola Lurate Caccivio	Livescia Lurate Caccivio	Via Asti Villaguardia	Via Manzoni Cassina Rizzardi	Luisago
ID	P5	E1	P6	C5	P7
Quota [m s.m.]	325.8	323.5	318.5	315.7	316.5
Portata Q_{24} [l/s]	3.76	13.14	3.96	0	1.33

Tabella 3.10 – Nodi della rete parte 2

ID	Quota [m s.l.m.]
N2	321.5
N3	325
N4	319.5
N5	314.5
N6	311.7

Tabella 3.11 – Condotte della rete parte 2

ID	Tratto	Lunghezza [m]	Diametro [mm]	Scabrezza [mm]
L9	C4-N2	1335	250	0.9
L11	N2-N3	690	250	0.9
L12	N3-P5	200	150	0.9
L13	N3-E1	2323	200	0.9
L14	E1-N4	797	200	0.9
L15	N4-P6	140	200	0.9
L16	N4-C5	1130	200	0.9
L17	C5-N5	272	200	0.9
L18	N5-P7	30	200	0.9
L19	N5-N6	939	200	0.9

3.1.2.3 Schema della rete - parte 3

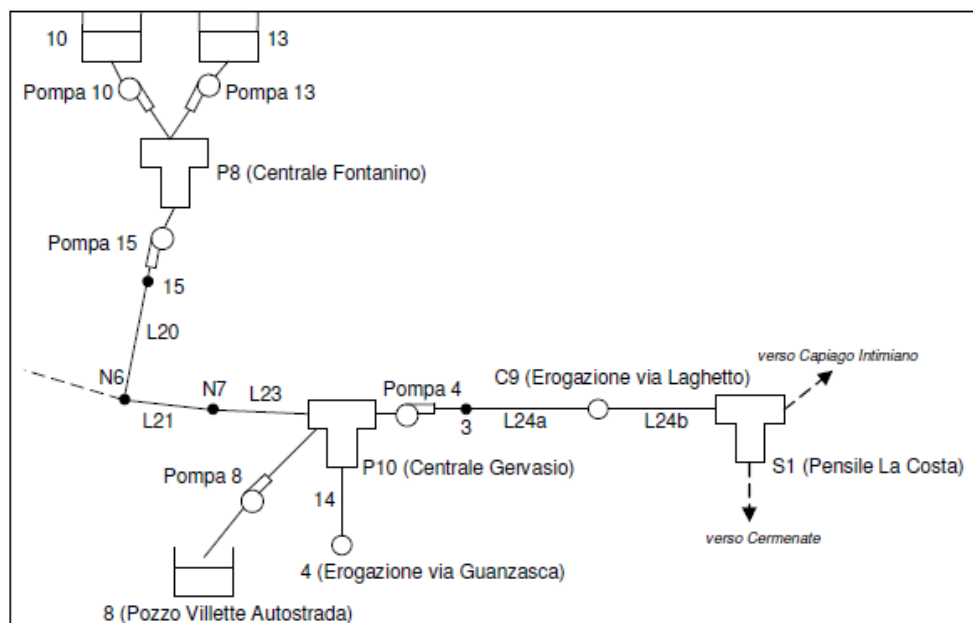


Figura 3.11 - Schematizzazione della rete - parte 3

Tabella 3.12 - Erogazioni della rete parte 3

Erogazione	Via Guanzasca Fino Mornasco	Via Laghetto Fino Mornasco
ID	4	C9
Quota [m s.m.]	303.5	299.7
Portata Q_{24} [l/s]	25.34	6.18

Tabella 3.13 – Serbatoi della rete parte 3: serbatoio Centrale Fontanino Villaguardia

Serbatoio Centrale Fontanino Villa Guardia	
ID	P8
Quota terreno [m s.l.m.]	306.2
Quota serbatoio [m s.l.m.]	306.2
Livello iniziale [m]	3.5
Livello minimo [m]	0.2
Livello massimo [m]	3.5
Forma	Parallelepipedo
Volume [mc]	200
Diametro equivalente [m]	8.5

Tabella 3.14 – Pozzi della rete parte 3

Pozzo	Fontanino 1	Fontanino 2	Villette Autostrada
ID	13	10	8
Quota terreno [m s.l.m.]	306.2	306.2	310.2
Carico totale [m s.l.m.]	297.2	294.2	286.2
Profondità pozzo [m dal p.c.]	-	-	42

Tabella 3.15 – Serbatoi della rete parte 3: serbatoio Centrale Gervasio Fino Mornasco

Serbatoio Centrale Gervasio Fino Mornasco	
ID	P10
Quota terreno [m s.l.m.]	305
Quota serbatoio [m s.l.m.]	305
Livello iniziale [m]	3
Livello minimo [m]	0.2
Livello massimo [m]	3
Forma	Parallelepipedo
Volume [mc]	680
Diametro equivalente [m]	17

Tabella 3.16 – Pompe della rete parte 3

ID	13	10	8	15	4
ID nodo iniziale	13	10	8	P8	P10
ID nodo finale	P8	P8	P10	15	3
Modello	Grundfos SP215-AAA	Grundfos SP215-AAA	Aturia-Rotos APN14C5	3 Robuschi, 1 Caprari	Caprari MEC MR65-3/2E
Curva	10	10	8	15	4

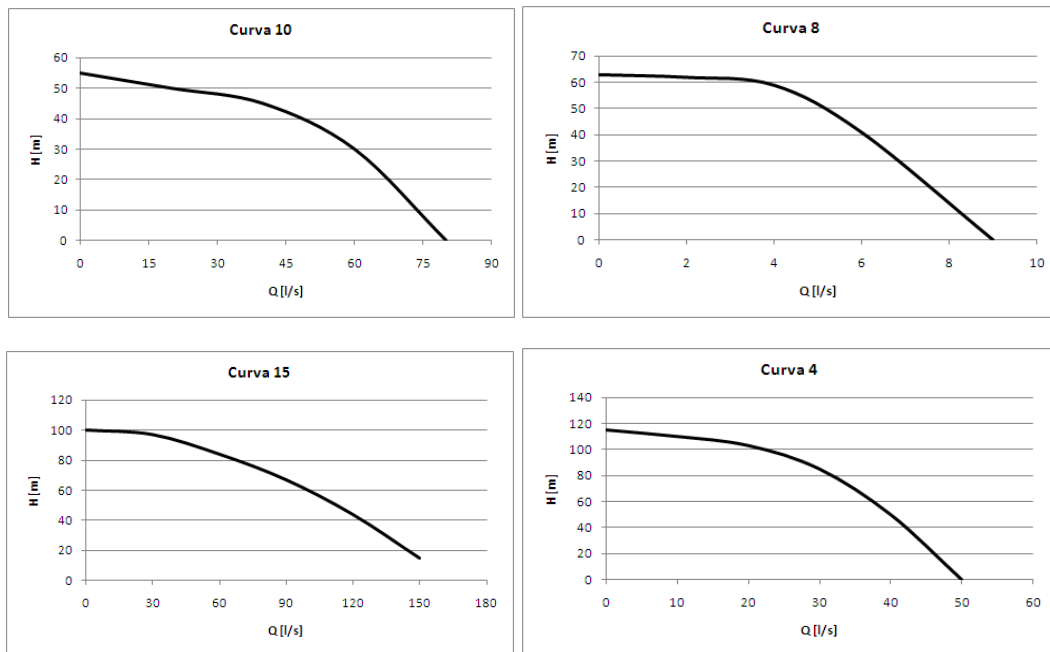


Figura 3.12 – Curve caratteristiche pompe della rete parte 3

Tabella 3.17 – Nodi della rete parte 3

ID	Quota [m s.l.m.]
N6	311.7
N7	309.3
3	303.5
15	304.7

Tabella 3.18 – Condotte della rete parte 3

ID	Tratto	Lunghezza [m]	Diametro [mm]	Scabrezza [mm]
L20	15-N6	1700	250	0.9
L21	N6-N7	194	250	0.9
L23	N7-P10	275	150	1.8
L24a	3-C9	2111	350	1.8
L24b	C9-S1	840	350	1.8
14	P10-4	50	200	0.9

3.1.2.4 Schema della rete - parte 4

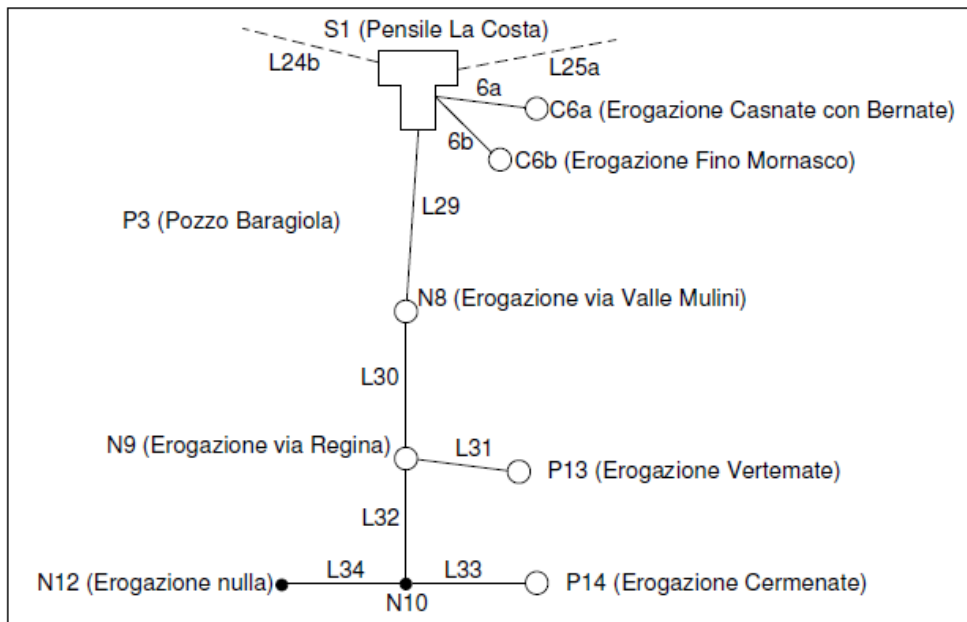


Figura 3.13 - Schematizzazione della rete - parte 4

Tabella 3.19 - Erogazioni della rete parte 4

Erogazione	Casnate con Bernate	Fino Mornasco	Via Valle Mulini Fino Mornasco	Via Regina Fino Mornasco
ID	C6a	C6b	N8	N9
Quota [m s.m.]	343.5	343.5	292	329.6
Portata Q_{24} [l/s]	0.52	4.91	1.03	3.45

Erogazione	Vertemate	Cermenate	Bulgorello Cadorago
ID	P13	P14	N12
Quota [m s.m.]	350.5	325.2	318.5
Portata Q_{24} [l/s]	0.3	0	0

Tabella 3.20 – Serbatoi della rete parte 4: serbatoio pensile La Costa

Pensile La Costa	
ID	S1
Quota terreno [m s.l.m.]	345
Quota fondo pensile [m s.l.m.]	386.5
Livello iniziale [m]	7.6
Livello minimo [m]	0.2
Livello massimo [m]	7.6
Forma	Conica
Volume [mc]	1200
Diametro massimo [m]	21

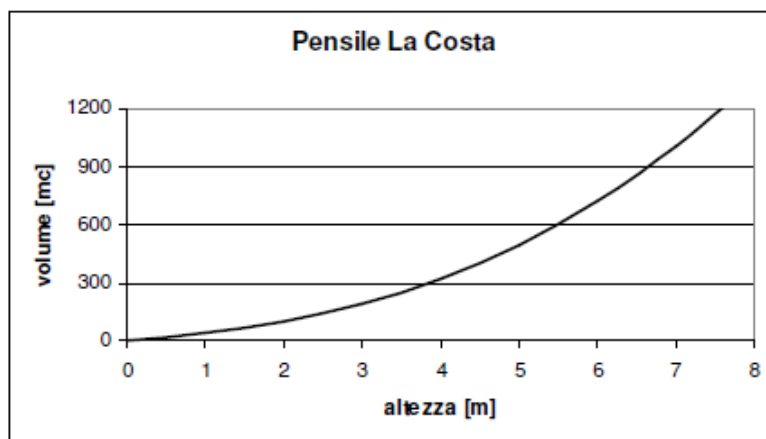


Figura 3.14 – Curva volumi – altezze pensile La Costa

Tabella 3.21 – Nodi della rete parte 4

ID	Quota [m s.l.m.]
N10	304.5

Tabella 3.22 – Condotte della rete parte 4

ID	Tratto	Lunghezza [m]	Diametro [mm]	Scabrezza [mm]
L29	S1-N8	659	350	1.8
L30	N8-N9	766	300	1.8
L31	N9-P13	300	200	1.8
L32	N9-N10	2913	300	1.8
L33	N10-P14	996	300	1.8
L34	N10-N12	2623	350	0.9

3.1.2.5 Schema della rete - parte 5

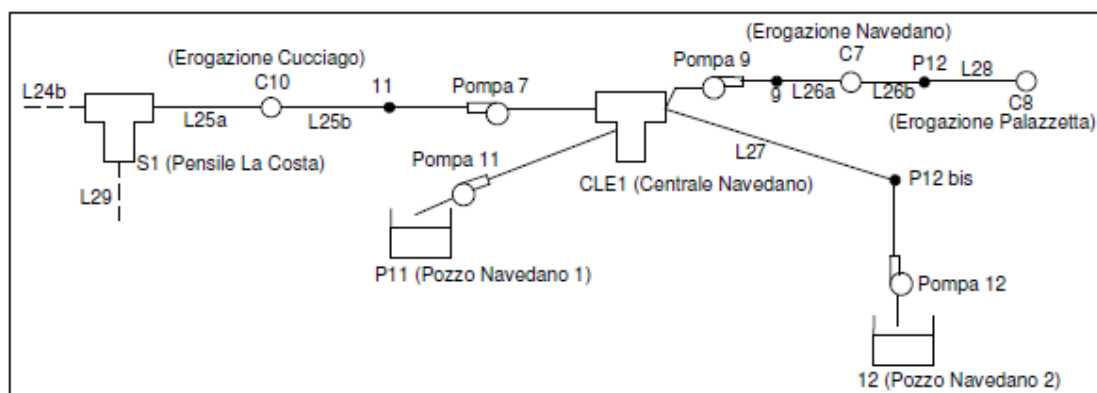


Figura 3.15 - Schematizzazione della rete - parte 5

Tabella 3.23 - Erogazioni della rete parte 5

Erogazione	Cucciago	Navedano	Palazzetta Capiago I. e Senna C.
ID	C10	C7	C8
Quota [m s.m.]	371	273.5	270
Portata Q_{24} [l/s]	10.9	2.13	31.73

Tabella 3.24 – Serbatoi della rete parte 5: serbatoio Centrale Navedano

ID	C.LE1
Quota terreno [m s.l.m.]	280.7
Quota serbatoio [m s.l.m.]	277.2
Livello iniziale [m]	3.5
Livello minimo [m]	0.2
Livello massimo [m]	3.5
Forma	Cilindrico
Volume [mc]	400
Diametro equivalente [m]	12

Tabella 3.25 – Pozzi della rete parte 5

Pozzo	Navedano 1	Navedano 2
ID	P11	12
Quota terreno [m s.l.m.]	280.7	276
Carico totale [m s.l.m.]	216.7	212
Profondità pozzo [m dal p.c.]	70	70

Tabella 3.26 – Pompe della rete parte 5

ID	11	12	7	9
ID nodo iniziale	11	12	CLE1	CLE1
ID nodo finale	CLE1	P12bis	P11	9
Modello	Grundfos SP125-3-A	Grundfos SP60-10	Caprari	Aturia
Curva	11	12	7	9

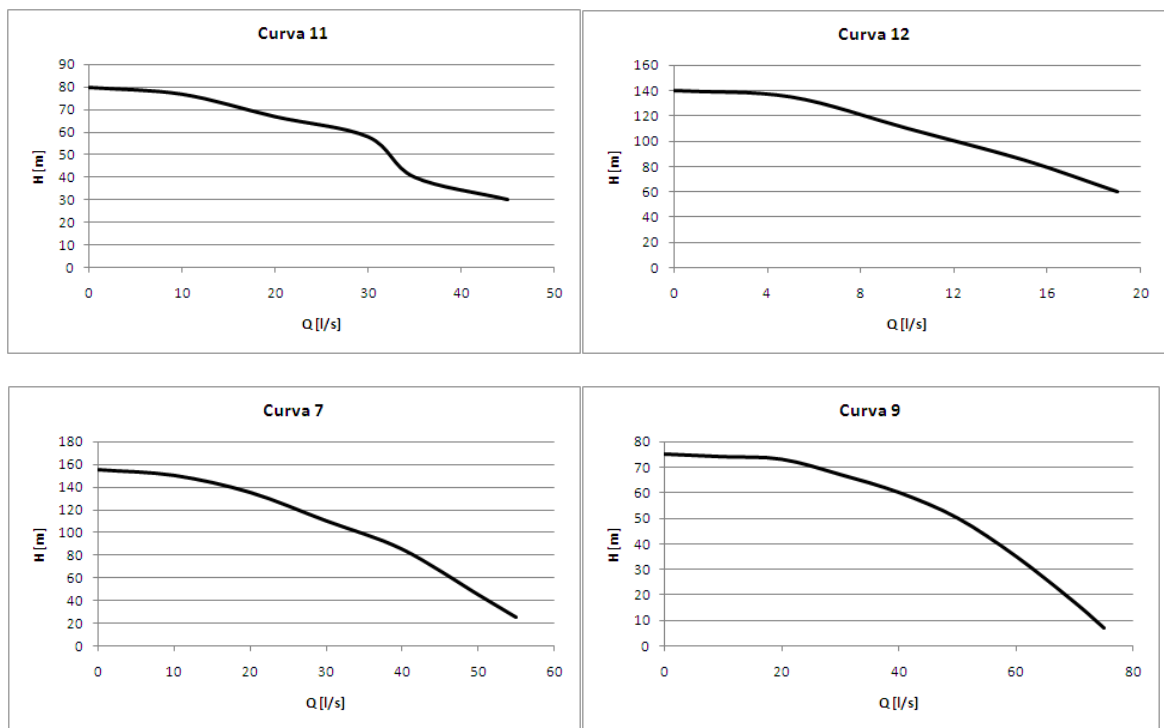


Figura 3.16 – Curve caratteristiche pompe della rete parte 5

Tabella 3.27 – Nodi della rete parte 5

ID	Quota [m s.l.m.]
11	279.2
P12	274.5
9	280.7

Tabella 3.28 – Condotte della rete parte 5

ID	Tratto	Lunghezza [m]	Diametro [mm]	Scabrezza [mm]
L25a	S1-C10	2448	400	1.8
L25b	C10-11	335	400	1.8
L26a	C7-9	194	300	1.8
L26b	C7-P12	710	300	1.8
L27	C.LE1-P12 bis	885	150	1.8
L28	P12-C8	1449	300	1.8

Per le pompe di cui non è nota la curva caratteristica, ma sono noti i valori di portata e prevalenza a cui generalmente funzionano, il programma costruisce una curva sulla base della coppia di valori (Q^* , H^*). Per costruire questa curva EPANET aggiunge altri due punti: il primo associando alla portata nulla una prevalenza pari al 133% della prevalenza H^* , il secondo associando alla prevalenza nulla il doppio della portata Q^* .

3.1.3 Analisi idraulica della rete

Dopo aver riprodotto la rete in Epanet si è provveduto ad effettuare le seguenti verifiche:

- su ogni nodo il carico piezometrico deve essere non inferiore a 20 metri sul piano stradale;
- su ogni nodo il carico piezometrico deve essere non superiore a 80 metri sul piano stradale;
- su ogni nodo la massima oscillazione fra la piezometrica massima e quella minima non deve superare i 25 m;
- le velocità in ogni lato devono mantenersi preferibilmente comprese fra 0.5 m/s e 1.5 m/s, in nessun caso superando il limite di 2 m/s.

La rete così implementata presenta due gravi problemi:

- velocità massima eccessiva nel tratto L23 (con punte pari a circa 3.6 m/s), così come mostrato in Tabella 3.29;
- Elevate pressioni nei nodi 15 ed N8 (con punte superiori ai 100 m sul piano stradale), così come mostrato in Tabella 3.30.

Tabella 3.29 - Caratteristiche del tratto L23

ID	Lunghezza [m]	Scabrezza [mm]	Diametro [mm]	Vmax [m/s]
L23	275	1.8	150	3.66

Tabella 3.30 - Massime pressioni nei nodi 15 ed N8

ID	Pmax [m]
15	104
N8	104

La Figura 3.17 mostra i tratti ed i nodi interessati da tali problemi:

Per ovviare al problema dell'eccessiva velocità si è scelto di aumentare il diametro del tratto L23; così facendo però risultavano eccessive le velocità nei tratti immediatamente adiacenti (L20 ed L21); si sono quindi aumentati i diametri anche di questi due tubi così come mostrato in Tabella 3.31:

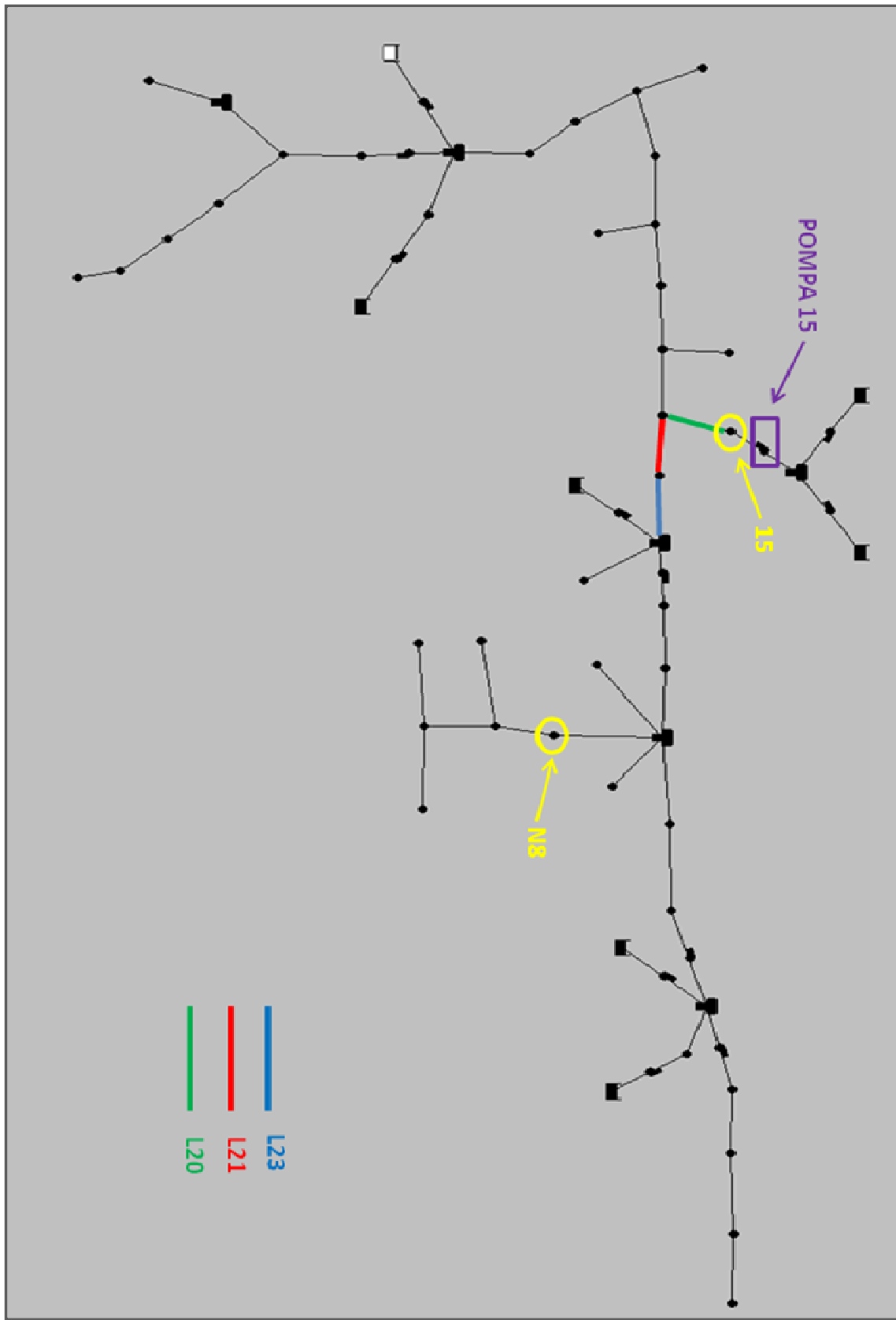


Figura 3.17 - Tratti e nodi soggetti a problemi, rispettivamente di elevate velocità e pressioni

Tabella 3.31 - Modifica dei diametri dei tratti L20, L21 ed L23

ID	Lunghezza [m]	Scabrezza [mm]	Vecchio Diametro [mm]	Nuovo Diametro [mm]	Vmax [m/s]
L23	275	1.8	150	350	1.6
L21	194	0.9	250	350	1.6
L20	1700	0.9	250	300	1.9

Per risolvere il problema delle pressioni eccessive nei nodi 15 ed N8 si sono adottate due diverse strategie:

- per il nodo 15 si è scelto di ridurre la prevalenza della pompa 15 di 1.5 bar e si è verificato che in ogni nodo si rispettasse il limite consigliato di 80 m sul piano stradale;
- per il nodo N8 si è scelto di inserire una valvola lungo il tratto L29 che mantenesse la pressione del nodo interessato pari a circa 90 m sul piano stradale.

In entrambi i casi si sono ottenuti risultati soddisfacenti, mantenendo le pressioni entro i limiti stabiliti.

3.2 Rete di Mondello

3.2.1 Introduzione

Nel Sistema Idrico Palermitano è inquadrato l'insieme delle infrastrutture idrauliche realizzate per soddisfare la richiesta complessiva dei centri di domanda localizzati nella fascia costiera della provincia di Palermo compresa fra il comune di Terrasini e quello di Cefalù.

Il sistema si compone di diversi schemi idrici, ad utilizzo plurimo, attraverso i quali vengono captate, convogliate, trattate e rese disponibili le risorse destinate all'approvvigionamento idropotabile, irriguo ed industriale, delle utenze nella suddetta area geografica, all'interno della quale la città di Palermo, da sola, costituisce circa l'80% della richiesta complessiva.

Studi condotti nell'anno 2000 a cura della *Sogesid S.p.A* per conto della Regione Siciliana, dal titolo "*Documento Base dell'accordo Quadro Risorse Idriche*" stimano un fabbisogno idrico complessivo, a regime, pari a circa 188-208 Mm³/anno deducibile dalla Tabella 3.32:

Tabella 3.32 - Stima dei fabbisogni idrici medi annui al 2015

USO	VOLUME MEDIO ANNUO [Mm ³ /anno]
Civile	138,00
Irriguo	45,00-65,00
Industriale	5,00
Totali	188,00-208,00

Le recenti stime dei fabbisogni idrici civili unitari si basano su metodologie che prevedono una dotazione pro-capite che rappresenti la domanda degli utenti ed i consumi urbani e collettivi.

Lo studio condotto dalla Sogesid S.p.A, sulla scorta di criteri di valutazione per la stima dei fabbisogni idrici unitari adottati dal modello *“Piano Acque della Lombardia”*, aggiorna i parametri di dotazione unitaria da destinare agli usi civili, irrigui ed industriali.

In particolare il documento Sogesid ha stimato le domande idriche per usi civili dei Comuni siciliani nella situazione attuale e di medio termine, adottando un criterio di valutazione che considera i seguenti parametri di riferimento:

- una dotazione base per la popolazione residente di 200 l/ab.giorno, cui si aggiunge un incremento per incidenza dei consumi urbani e collettivi in funzione della classe demografica del Comune di appartenenza;
- una dotazione di 200 l/ab.giorno per la popolazione fluttuante, l’incidenza nel calcolo del fabbisogno annuo totale dei fluttuanti è stata valutata in soli tre mesi all’anno (presenze turistiche e rientro emigrati).

Secondo tale criterio di valutazione, il valore di dotazione unitaria che caratterizza la domanda idrica della città di Palermo è pari a 340 l/ab.giorno cui corrisponde un fabbisogno idrico di circa 89 milioni di m³ all’anno.

La zonizzazione della distribuzione, cioè la divisione della rete in sottoreti, sottoposte ad un regime piezometrico compatibile con le esigenze del servizio, è stata effettuata seguendo il criterio di limitare e, per quanto possibile, di equilibrare le dimensioni delle varie sottoreti, sia con riguardo alla estensione territoriale che ai volumi idrici da distribuire.

Tale criterio di zonizzazione corrisponde all’esigenza di un più agevole controllo dell’esercizio, che va affidato ad apparecchiature di misura delle grandezze fondamentali (portate, pressioni, parametri di qualità dell’acqua) da effettuare nei punti opportuni.

Nella delimitazione delle sottoreti si è inoltre tenuto conto dell’esigenza di utilizzare tutti i serbatoi esistenti.

La zonizzazione adottata comporta il mantenimento delle quote 35 m s.l.m. e 70 m s.l.m. che delimitano in senso altimetrico le reti. A tale zonizzazione “altimetrica” si è sovrapposta una zonizzazione nel senso planimetrico, dividendo, in sostanza, le due grandi reti 0-35 e 35-70 in sottoreti più limitate sia per estensione territoriale che per popolazione servita.

Nella delimitazione delle sottoreti si è cercato di realizzare un ragionevole compromesso tra ampiezza della zona servita e popolazione insediata in ciascuna zona; seguendo questo criterio è

risultato che le sottoreti a servizio delle zone periferiche, con minore densità di abitanti, sono più ampie delle zone centrali più densamente popolate.

In definitiva le sottoreti, individuate con i criteri precedentemente illustrati, sono in totale 17, come si evince dalla

Tabella 3.33 in cui si è operata la distinzione tra un primo gruppo di **7 sottoreti basse** "0-35", alimentate dai serbatoi S.Ciro, Pitрэ, Petrazzi Basso e Gallo, che servono la zona della città al di sotto dell'isoipsa 35 m s.l.m., un secondo gruppo di **6 sottoreti intermedie** "35-70", alimentate dai serbatoi Giardini, Monte Grifone e Petrazzi Alto a servizio delle zone comprese tra le isoipse 35 e 70 m s.l.m., e un terzo gruppo di **4 sottoreti alte** "oltre 70", alimentate dai serbatoi Manolfo, Rocca, Villagrazia e Boccadifalco, che servono le zone al di sopra dell'isoipsa 70 m s.l.m. In particolare, in questo lavoro di tesi, si è presa in considerazione la **sottorete 6 – Mondello**, alimentata dal serbatoio Petrazzi Basso posto ad una quota di 84 m s.l.m.

Tabella 3.33 - Caratteristiche delle sottoreti

SOTTORETI	SERBATOI	ABITANTI PREVISTI	VOL. ANNUO DISTRIBUITO (Mmc)	Q MEDIA ANNUA (l/s)	
SOTTORETI "0-35"					
1	Brancaccio-Romagnolo	S. Ciro	80.000	12,61	400
2	Stazione	"	26.000	4,10	130
3	Centro Storico	Pitрэ	85.000	13,40	425
4	Politeama	"	135.300	21,33	677
5	Libertà	"	148.200	23,37	741
6	Mondello	Petrazzi B.	77.000	12,14	385
7	Sferracavallo	Gallo	10.400	1,64	52
			<u>561.900</u>	<u>88,60</u>	<u>2810</u>
SOTTORETI "35-70"					
8	Giardini	Giardini	4.000	0,63	20
9	Bonagia	M.te Grifone	39.000	6,15	195
10	Calatafimi	"	165.100	26,03	826
11	Noce-Uditore	Petrazzi A.	110.840	17,48	554
12	Strasburgo-Cruillas	"	85.900	13,54	430
13	T. Natale-Pallavicino	"	31.600	4,98	158
			<u>436.440</u>	<u>69</u>	<u>2.182</u>
SOTTORETI "OLTRE 70"					
14	Villa Adriana	Manolfo	34.000	5,36	170
15	Borgo Nuovo-Rocca	Rocca	73.700	11,62	369
16	Villagrazia	Villagrazia A. e B.	19.000	3,00	95
17	Boccadifalco	Boccadifalco A. e B.	6.500	1,02	33
			<u>133.200</u>	<u>21,00</u>	<u>666</u>
		tot.	1.131.540	178,42	5658

3.2.2 Sottorete 6 – Mondello

Mondello, quartiere della città di Palermo, è una località turistica situata ai piedi di monte Pellegrino distante pochi chilometri dal centro della città.



Figura 3.18 - Localizzazione geografica del quartiere di Mondello



Figura 3.19 - Rete idrica del quartiere di Mondello

3.2.3 Calcolo della dotazione idrica dei nodi

Il quartiere di Mondello appartiene alla VII circoscrizione del Comune di Palermo; questa circoscrizione ha le seguenti caratteristiche:

Tabella 3.34 - Numero di abitanti, superficie e densità abitativa della VII circoscrizione del Comune di Palermo

VII circoscrizione	
n° di abitanti	74330
Superficie [ha]	3295.5
Densità abitativa [ab/ha]	22.6

La superficie relativa al quartiere di Mondello è stata quindi calcolata tramite il software Autocad mentre il dato relativo al numero di abitanti è stato gentilmente fornito dal Comune di Palermo.

Tabella 3.35 - Numero di abitanti e superficie del quartiere di Mondello

Mondello	
n° di abitanti	11704
Superficie [ha]	518.85

Per il calcolo del fabbisogno idrico da assegnare in input al programma Epanet si è scelto di suddividere la sottorete 6 in nove maglie principali.

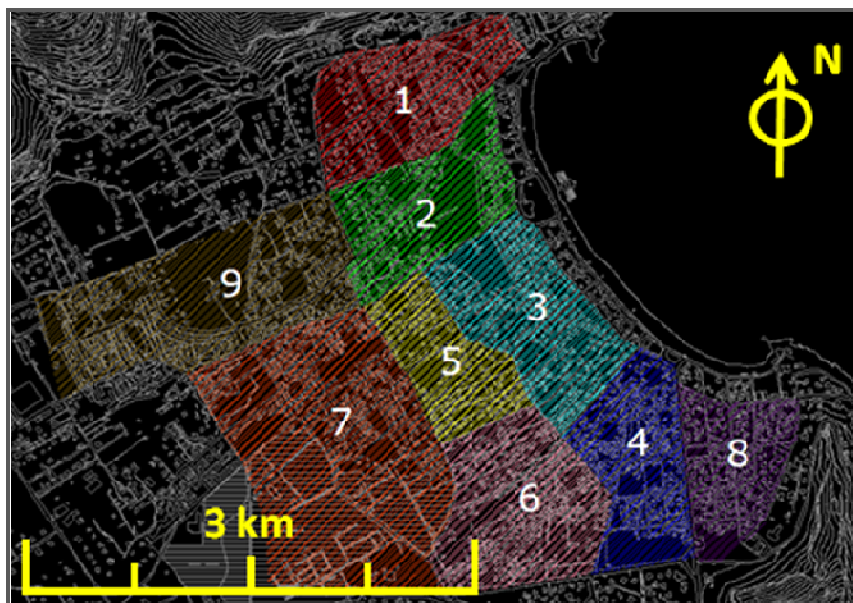


Figura 3.20 - Suddivisione della rete in 9 sottomaglie principali

Per il calcolo della dotazione idrica da assegnare ad ogni nodo si è quindi provveduto a calcolare la superficie di ogni singola maglia utilizzando sempre il software Autocad; quindi si è valutato il fabbisogno idrico attraverso la seguente relazione:

$$d = \frac{\alpha * S * D * da}{(3600 * 24)} \quad (15)$$

dove d = dotazione idrica da assegnare all' i -esimo nodo [l/s]; α = coefficiente che tiene conto dell'incremento della dotazione idrica dovuto alla stagione estiva, assunto pari ad 1,5; S = superficie dell' i -esima maglia[ha]; D = dotazione idrica unitaria, assunta pari a 340 l/ab.giorno
 da = densità abitativa della VII circoscrizione, pari a 22,6 ab/ha.

In Tabella 3.36 si riportano i valori superficie e di dotazione idrica calcolati.

Tabella 3.36 - Superficie dell' i -esima maglia e corrispondente dotazione idrica

Maglia	Superficie [ha]	Dotazione [l/s]
1	28.68	3.82
2	26.84	3.57
3	30.1	4.01
4	25.22	3.36
5	18.45	2.46
6	32.78	4.36
7	68.42	9.11
8	19.93	2.65
9	47.62	6.34

3.2.4 Riproduzione della rete di Mondello in Epanet

La rete in esame è composta da 447 tubi e 377 nodi ed è alimentata a gravità dal serbatoio Petrazzi Basso avente una capacità di 8500 m³ ed è posto ad una quota di 84 m s.l.m.

Per meglio valutare la propagazione degli inquinanti si è provveduto a collegare alla rete un ulteriore serbatoio, denominato Gallo, che nella realtà non alimenta la sottorete 6 di Mondello ma la sottorete 7 di Sferracavallo.

Questo serbatoio ha una capacità di 2000 m³ ed è posto ad una quota di 80 m s.l.m.



Figura 3.21 - Riproduzione in Epanet della sottorete 6

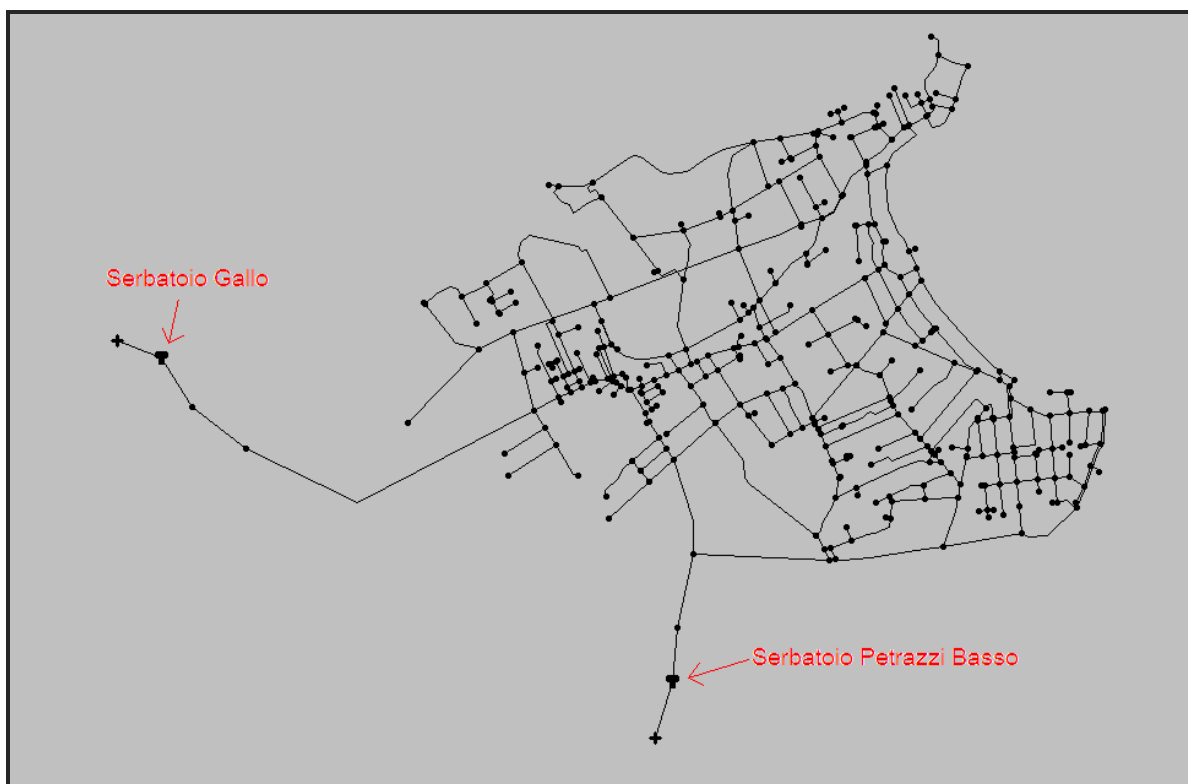


Figura 3.22 - Riproduzione in Epanet della sottorete 6; in questo caso sono presenti 2 serbatoi

4. ANALISI CON EPANET DELLA PROPAGAZIONE DI INQUINANTI NELLE RETI DI COLLINE COMASCHE E MONDELLO

Si è dunque iniziato a considerare il problema della contaminazione dei pozzi da parte di inquinanti di vari tipi, che possono diffondersi in rete compromettendo la qualità idrica nelle erogazioni. Per simulare la propagazione degli inquinanti nelle reti considerate, si è utilizzato il software Epanet 2.0.

4.1 Analisi di scenari di inquinamento nella rete di Colline Comasche

Dall'analisi dei dati storici relativi all'andamento delle concentrazioni di inquinanti nei diversi pozzi che alimentano la rete di Colline Comasche, si possono individuare tre situazioni critiche, ognuna riguardante un differente tipo di inquinante e una diversa zona della rete sovracomunale:

1. Inquinamento da solventi, precisamente tetracloroetilene e tricloroetilene, nel pozzo di via Patrioti (2) e nel pozzo Baragiola (P3)
2. Inquinamento da ione ammonio (NH_4) nei pozzi Fontanino 1 (13) e Fontanino 2 (10)
3. Inquinamento da nitrati (NO_3) nel pozzo Navedano 1 (P11)

Data l'eterogeneità del tipo di inquinante di volta in volta coinvolto e delle zone interessate dai vari casi di inquinamento, si è deciso di analizzare ogni situazione separatamente, effettuando cioè una simulazione con Epanet per ogni caso. Questo anche perché il software permette l'introduzione di un solo tipo di inquinante in rete per volta.

4.1.1 Inquinamento da solventi nei pozzi di via Patrioti e Baragiola

Per quanto riguarda il pozzo 2 (via Patrioti), dalle serie storiche di misurazioni effettuate si evince che il problema dei solventi, il cui limite di concentrazione ammesso dal D.Lgs. 31/2001 è pari a 10 $\mu\text{g}/\text{l}$, si è fatto rilevante a partire dal 2005. La Tabella 4.1 mostra le date in cui si sono rilevati valori di tetra+tricloroetilene superiori al limite consentito.

Da un'analisi analoga svolta sul pozzo P3 (Baragiola), si è rilevato come solo nel 2007 si sia superato il limite legale, ma raggiungendo in una delle due misurazioni il notevole valore di 16 $\mu\text{g}/\text{l}$.

Tabella 4.1 - Superamento del limite consentito di solventi nel pozzo di via Patrioti

ANNO	DATA MISURAZIONE	CONCENTRAZIONE SOLVENTI [$\mu\text{g/l}$]
2005	27 aprile	11
2006	23 gennaio	11
2006	9 maggio	14
2007	10 aprile	10
2007	9 agosto	19

Tabella 4.2 - Superamento del limite consentito di solventi nel pozzo Baragiola

ANNO	DATA MISURAZIONE	CONCENTRAZIONE SOLVENTI [$\mu\text{g/l}$]
2007	21 maggio	10
2007	9 agosto	16

La Tabella 4.1 e la Tabella 4.2 mostrano come nello stesso giorno, ovvero il 9 agosto del 2007, si sono rilevati i massimi valori di concentrazione in entrambi i pozzi, e dunque appare più che giustificato utilizzare proprio questa situazione, la peggiore mai verificatasi in passato, ai fini della simulazione.

Si è quindi proceduto alla modellazione in Epanet introducendo nei due pozzi 2 e P3 le concentrazioni di $C(2) = 19 \mu\text{g/l}$ e $C(P3) = 16 \mu\text{g/l}$, rispettivamente. Tali concentrazioni sono state introdotte sia come “initial quality” che come “source quality”, dal momento che i pozzi immettono continuamente portata nella rete. Invece come concentrazioni di partenza (“initial quality”) negli altri nodi, si sono utilizzate le concentrazioni presenti alle ore 3.00 di notte del secondo giorno di simulazione.

Si è dunque realizzata una simulazione della durata di un mese per valutare la risposta della rete a questo tipo di contaminazione. Al fine di elaborare i dati, si sono considerati i valori di concentrazione nell’arco delle 24 ore riguardanti l’ultimo giorno del mese di simulazione, quando evidentemente la situazione è ormai a regime.

La Tabella 4.3 mostra i massimi valori di concentrazione registrati nei vari nodi nel trentesimo giorno di simulazione. I nodi evidenziati in grassetto sono le erogazioni, e pertanto è in particolare in questi nodi che occorre rispettare i limiti imposti relativamente alla qualità dell’acqua. Si può notare come in tutti i nodi venga superato il limite di legge di $10 \mu\text{g/l}$, ad eccezione di E1. Questo avviene perché tale nodo riceve portata non solo dai pozzi 2 e P3 contaminati, ma anche dai pozzi Fontanino 1 e 2 (ID 10 e 13), che in questa simulazione non sono soggetti a inquinamento. Dunque si ha un effetto di diluizione della portata erogata che consente al nodo E1 di rimanere al di sotto dei limiti di legge durante tutto il periodo considerato. Inoltre, la simulazione ha permesso di appurare che si raggiunge in breve tempo

una situazione di equilibrio, di conseguenza si presume che il valore massimo di 7.72 µg/l non aumenti ulteriormente durante tutto il periodo in cui l'inquinamento dovesse essere presente. Questo consentirebbe in linea teorica di continuare a erogare acqua alle utenze servite dal nodo E1, mentre logicamente le erogazioni C1, C2, C3, C4 e P5 andrebbero interrotte subito. Merita invece un discorso a parte il nodo 5, ossia l'erogazione San Giuseppe. Tale erogazione è alimentata esclusivamente dal serbatoio pensile Guanzate (P15), che accumula progressivamente inquinamento in modo continuo. Quindi non si raggiunge una situazione di equilibrio, bensì i valori di concentrazione aumentano costantemente, anche se gradualmente, fino a superare il limite di 10 µg/l nel venticinquesimo giorno di simulazione. Quindi sarebbe possibile continuare a erogare acqua alle utenze servite dal nodo 5 solo nei primi 25 giorni dall'inizio della situazione di inquinamento.

Tabella 4.3 - Massime concentrazioni nei nodi nell'ultimo giorno di simulazione [µg/l]

Nodo	MAX
C1	15.08
C2	15.1
C3	15.14
N11	15.14
N1	15.16
1	15.16
5	11.05
C4	14.91
P2	19
N2	14.73
N3	14.67
P5	14.67
E1	7.72

La Figura 4.1 mostra l'andamento delle concentrazioni nei nodi nel trentesimo e ultimo giorno di simulazione, seguito da un'istantanea del tratto di rete interessato dalla contaminazione alle ore 13.00 del trentesimo giorno. Dal grafico è interessante notare come la concentrazione di solventi in E1 presenti due picchi che si situano all'incirca un'ora dopo i picchi di consumo idrico (dalle 13 alle 15 e dalle 20 alle 22). Questo perché durante le ore di maggior consumo la portata in arrivo dai pozzi Fontanino viene totalmente erogata da E1, ma non è sufficiente a soddisfare per intero la richiesta delle utenze ad essa collegate: quindi viene utilizzata anche la portata proveniente dai pozzi 2 e P3, contaminati. Invece nelle ore notturne o comunque di minor consumo idrico, la portata di ottima qualità proveniente dai Fontanino soddisfa completamente

la richiesta di E1 e in parte prosegue nella rete fino alla centrale di Bulgarograsso (ID P1). In ogni caso dalla schermata di Epanet riportata si vede come la contaminazione non si propaghi mai oltre il nodo E1, in quanto quella zona di rete è alimentata esclusivamente dai pozzi Fontanino a tutte le ore.

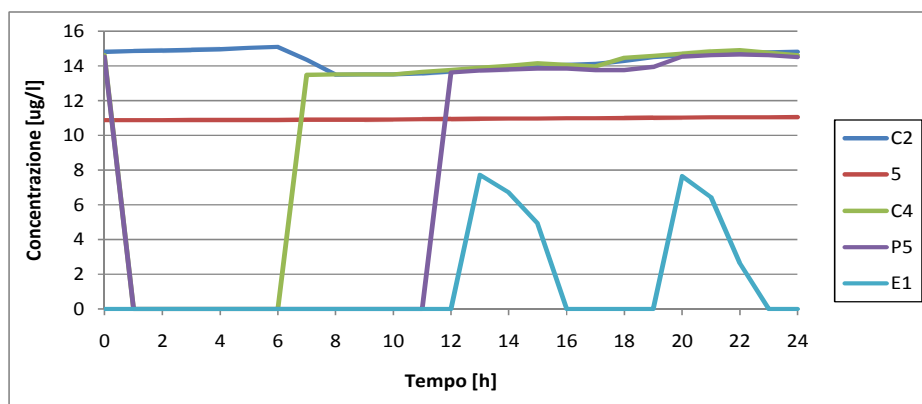


Figura 4.1 - Andamento delle concentrazioni di solventi nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

Successivamente, si sono effettuate altre due simulazioni raddoppiando e triplicando le concentrazioni massime storiche di solventi, per valutare se le dinamiche di diffusione degli inquinanti in rete subissero o meno modifiche rilevanti. Raddoppiando le concentrazioni, si sono inseriti nel pozzo di Via Patrioti (2) e nel pozzo Baragiola (P3) rispettivamente i valori di $C(2) = 38 \mu\text{g/l}$ e $C(P3) = 32 \mu\text{g/l}$. La simulazione è stata eseguita con le medesime tempistiche e modalità rispetto al caso precedente. Si riportano in Tabella 4.4 e in Figura 4.3 i risultati ottenuti:

Tabella 4.4 - Massime concentrazioni nei nodi nell'ultimo giorno di simulazione [$\mu\text{g/l}$]

Nodo	MAX
C1	30.15
C2	30.21
C3	30.28
N11	30.28
N1	30.32
1	30.32
5	22.05
C4	29.83
P2	38
N2	29.45
N3	29.36
P5	29.35
E1	15.43

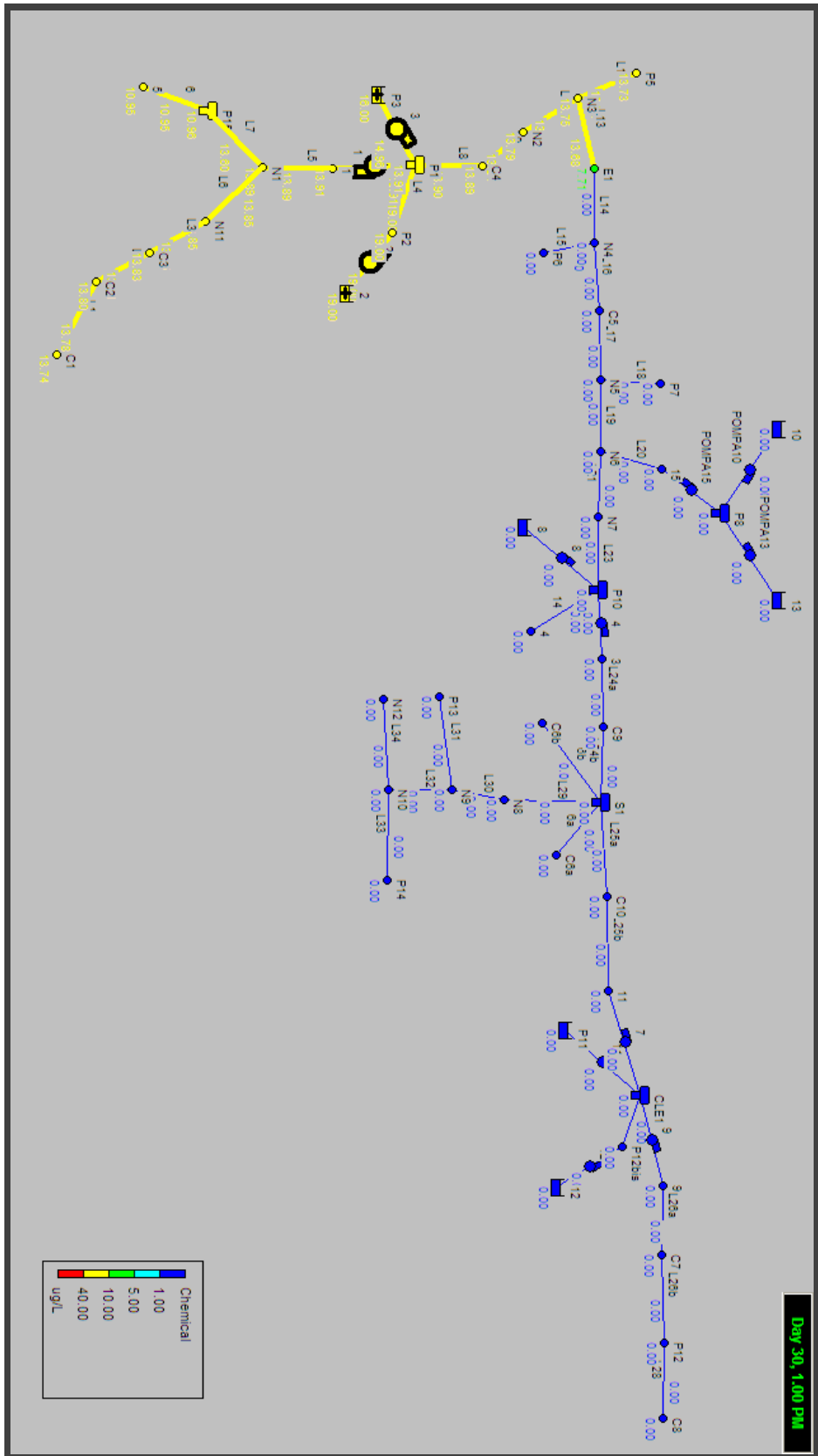


Figura 4.2 - Andamento delle concentrazioni di solventi nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

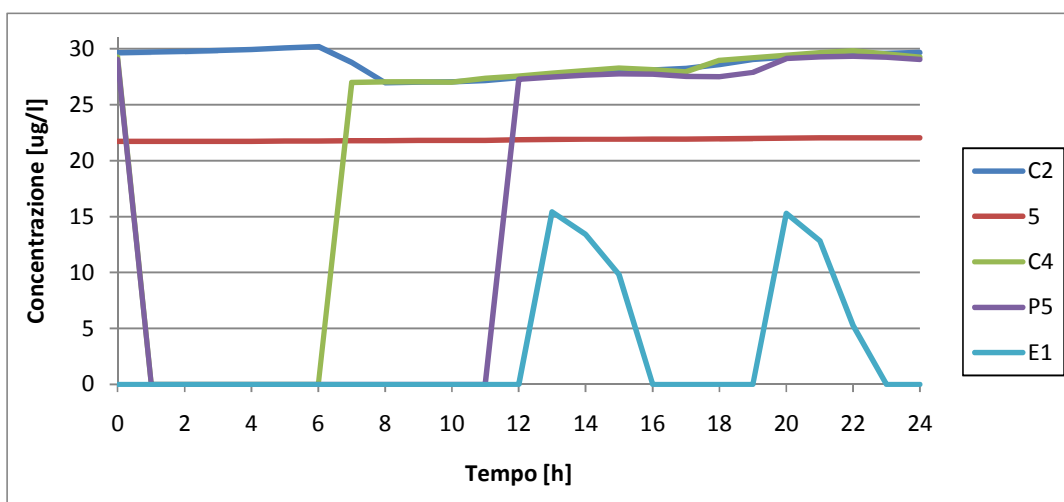


Figura 4.3 - Andamento delle concentrazioni di solventi nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

Com'era prevedibile, l'andamento qualitativo della diffusione dei solventi in rete è analogo, ma c'è una sostanziale differenza che riguarda il nodo E1: infatti mentre nel caso peggiore mai verificatosi, analizzato in precedenza, la concentrazione rimaneva al di sotto dei limiti di legge, in questo caso le "punte" del grafico superano nettamente i 10 µg/l di legge, raggiungendo i 15.43 µg/l. Ciò impedisce, a differenza di quanto si era ipotizzato in precedenza, di continuare ad utilizzare l'acqua erogata da E1.

Per quanto riguarda l'erogazione San Giuseppe, l'andamento continuamente crescente delle concentrazioni porta a superare il limite nel decimo giorno di simulazione, dunque ben prima rispetto al caso precedente.

Triplicando le concentrazioni, si sono inseriti nel pozzo di Via Patrioti (2) e nel pozzo Baragiola (P3) rispettivamente i valori di $C(2) = 57 \mu\text{g/l}$ e $C(P3) = 48 \mu\text{g/l}$. Sempre seguendo le medesime modalità, si è giunti ai risultati riportati in Tabella 4.5 e in Figura 4.4.

L'andamento qualitativo delle concentrazioni ricalca quello delle simulazioni precedenti, salvo il fatto che il nodo E1 raggiunge ovviamente picchi di concentrazione ancor più elevati, corrispondenti a più del doppio del limite di legge. Inoltre, nell'erogazione San Giuseppe si raggiungono i 10 µg/l dopo soli 7 giorni di simulazione.

Sono state effettuate altre prove variando ulteriormente le concentrazioni nei due pozzi, e si è visto che in tutti i casi l'andamento delle concentrazioni è qualitativamente simile, pur variando ovviamente l'entità della contaminazione.

Tabella 4.5 - Massime concentrazioni nei nodi nell'ultimo giorno di simulazione [$\mu\text{g/l}$]

Nodo	MAX
C1	45.22
C2	45.31
C3	45.43
N11	45.43
N1	45.49
1	45.49
5	33.08
C4	44.73
P2	57
N2	44.19
N3	44.04
P5	44.01
E1	23.15

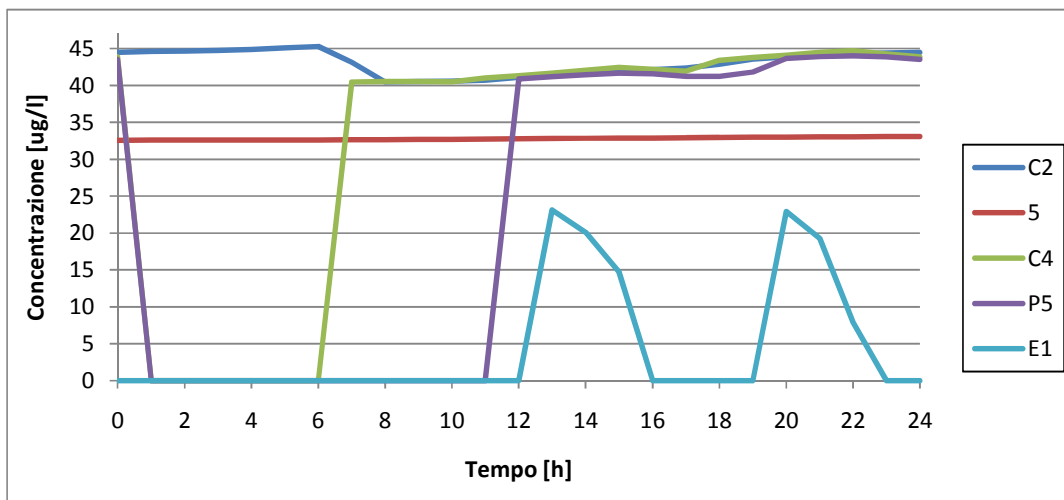


Figura 4.4 - Andamento delle concentrazioni di solventi nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

4.1.2 Inquinamento da NH_4 nei pozzi Fontanino

Spostando l'attenzione sui pozzi Fontanino 1 e 2, si rileva dalle serie storiche come il limite imposto dalla legge sulle concentrazioni di ione ammonio, pari a 0.5 mg/l, sia superato in tre occasioni nel corso del 2007:

Tabella 4.6 - Superamento del limite consentito di NH_4 nel pozzo Fontanino 1

ANNO	DATA MISURAZIONE	CONCENTRAZIONE NH_4 [mg/l]
2007	12 settembre	0.7
2007	20 settembre	0.6

Tabella 4.7 - Superamento del limite consentito di NH₄ nel pozzo Fontanino 2

ANNO	DATA MISURAZIONE	CONCENTRAZIONE NH ₄ [mg/l]
2007	12 settembre	1.2

Come nel caso considerato in precedenza, ai fini della simulazione in Epanet ci si è posti nella peggiore delle condizioni sperimentalmente rilevata in passato. Tale condizione si è avuta il 12 settembre 2007, con le concentrazioni di 0.7 e 1.2 mg/l nei pozzi Fontanino 1 e Fontanino 2, rispettivamente. Anche in questo caso questi valori sono stati inseriti come initial quality e source quality allo stesso tempo, mentre come concentrazioni iniziali degli altri nodi si sono utilizzate quelle alle ore 3.00 del secondo giorno di simulazione. La Tabella 4.8 mostra i massimi valori di concentrazione registrati nei vari nodi nel trentesimo giorno di simulazione:

Tabella 4.8 - Massime concentrazioni nei nodi nell'ultimo giorno di simulazione [mg/l]

Nodo	MAX	Nodo	MAX
C1	0.21	C9	0.84
C2	0.21	15	0.95
C3	0.21	C6a	0.82
N11	0.21	C6b	0.82
N1	0.21	N8	0.82
1	0.21	N9	0.81
5	0.1	P13	0.81
C4	0.95	N10	0
P2	0	N12	0
N2	0.95	P14	0
N3	0.95	C10	0.81
P5	0.95	11	0
E1	0.95	P12bis	0
N4	0.95	9	0
P6	0.95	C7	0
C5	0.95	P12	0
N5	0.95	C8	0
P7	0.95		
N6	0.95		
N7	0.95		
4	0.84		
3	0.84		

Si può notare come la rete risulti sostanzialmente suddivisa in quattro zone, che risentono in maniera alquanto differente della contaminazione.

1. **La zona tra l'erogazione E1 e il pensile La Costa (S1)**, essendo alimentata direttamente dalla centrale Fontanino, e quindi dagli omonimi pozzi, risente in maniera massiccia e persistente della loro contaminazione, con punte massime tra 0.81 e 0.95 mg/l, decisamente inaccettabili. I valori leggermente inferiori, ma comunque molto superiori al limite, si riscontrano nei nodi posti tra la centrale Gervasio (P10) e il Pensile La Costa, a causa del lieve effetto di diluizione fornito dalla portata sollevata alla centrale Gervasio dal pozzo Villette Autostrada (8), esente da contaminazione in questa prova. Questa zona comprende anche la parte di rete alimentata a gravità dal pensile La Costa, ossia i nodi N8, N9 e P13, anch'essi contaminati.
2. **La zona dall'erogazione E1 alla centrale di Bulgarograsso (P1)**, nella quale il flusso cambia direzione a seconda dell'ora della giornata: infatti nelle ore notturne o di minor consumo, l'acqua affluisce verso la centrale di Bulgarograsso provenendo dai pozzi Fontanino inquinati, e dunque nei nodi della rete si raggiungono concentrazioni elevate e paragonabili a quelle della zona 1). Invece nelle ore di punta del consumo idrico, E1 utilizza tutta la portata in arrivo dai pozzi Fontanino, richiamandone anche dalla centrale di Bulgarograsso: quindi il flusso cambia direzione e l'acqua non contaminata ha un effetto di diluizione abbassando anche di molto le concentrazioni nei nodi. Da qui le grandi fluttuazioni della concentrazione degli inquinanti in questa parte della rete nel corso della giornata; tuttavia, dovendo garantire la buona qualità dell'acqua durante tutto il giorno, il superamento dei valori limite anche solo in alcune ore impone ugualmente la chiusura delle erogazioni.
3. **La zona oltre la centrale di Bulgarograsso (P1)**, che beneficia dell'effetto di "volanizzazione" dell'inquinante ad opera della centrale stessa, la quale ne impedisce la significativa propagazione in questa parte della rete, diluendo la portata inquinata in arrivo dai pozzi Fontanino e miscelandola con quella pulita sollevata dai pozzi Baragiola e di via Patrioti. Pertanto in questo caso di inquinamento tale parte della rete potrebbe continuare a funzionare senza problemi di qualità idrica.
4. **La zona oltre il pensile La Costa (S1)**, totalmente immune da contaminazione in quanto utilizza l'acqua proveniente dalla centrale di Navedano (CLE1).

La Figura 4.5 mostra l'andamento delle concentrazioni di NH_4 nelle 24 ore del trentesimo giorno per alcuni nodi della rete.

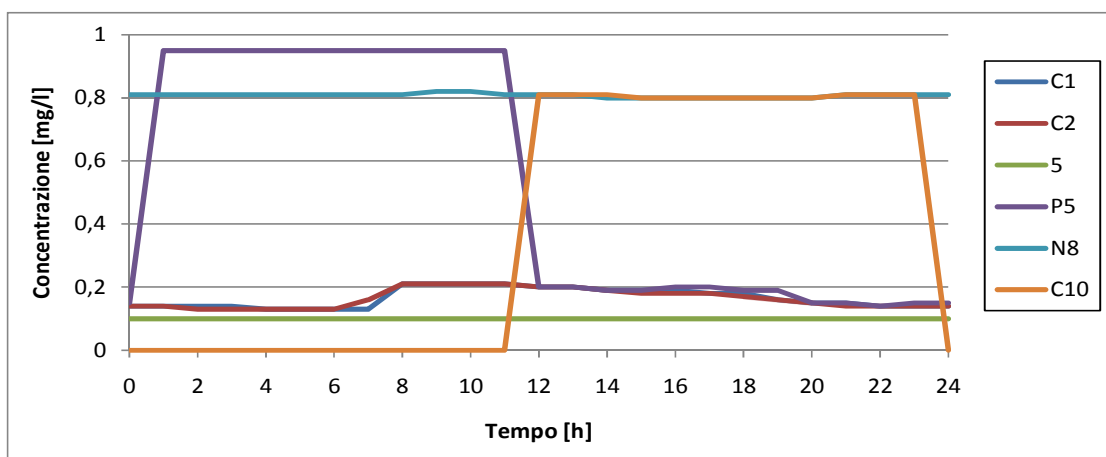


Figura 4.5 - Andamento delle concentrazioni di NH_4 nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

È interessante notare come nella maggior parte dei nodi l'andamento delle concentrazioni sia abbastanza costante, ad eccezione del nodo P5 e del nodo C10. P5 presenta elevate concentrazioni durante la notte e concentrazioni poco rilevanti durante il giorno, per i motivi spiegati in precedenza legati al cambio di direzione del flusso nella zona 2 della rete. L'andamento in C10 è invece opposto, risultando nullo nelle ore notturne e pari a 0.8 mg/l nelle ore diurne: questo perché nelle ore di maggior consumo viene richiamata un'ingente portata inquinata dal pensile La Costa.

Analogamente al caso di inquinamento da solventi, si sono poi eseguite simulazioni aumentando la concentrazione di NH_4 nei pozzi Fontanino, per verificare se vi fossero cambiamenti significativi nella risposta della rete. Raddoppiando le concentrazioni, si è ipotizzato un inquinamento di 1.4 e 2.4 mg/l nei pozzi Fontanino 1 e Fontanino 2, rispettivamente. La Tabella 4.9 mostra i massimi valori di concentrazione registrati nei vari nodi nel trentesimo giorno di simulazione:

Tabella 4.9 - Massime concentrazioni nei nodi nell'ultimo giorno di simulazione [mg/l]

Nodo	MAX	Nodo	MAX	Nodo	MAX	Nodo	MAX	Nodo	MAX
C1	0.42	N2	1.89	N6	1.89	N9	1.63	C7	0
C2	0.42	N3	1.89	N7	1.89	P13	1.63	P12	0
C3	0.42	P5	1.89	4	1.68	N10	0	C8	0
N11	0.42	E1	1.89	3	1.68	N12	0		
N1	0.42	N4	1.89	C9	1.67	P14	0		
1	0.42	P6	1.89	15	1.89	C10	1.63		
5	0.24	C5	1.89	C6a	1.64	11	0		
C4	1.89	N5	1.89	C6b	1.64	P12bis	0		
P2	0	P7	1.89	N8	1.64	9	0		

Per visualizzare meglio la propagazione dell'inquinante attraverso le varie zone della rete, si riporta in Figura 4.6 la rete alle ore 13.00 del trentesimo giorno di simulazione.

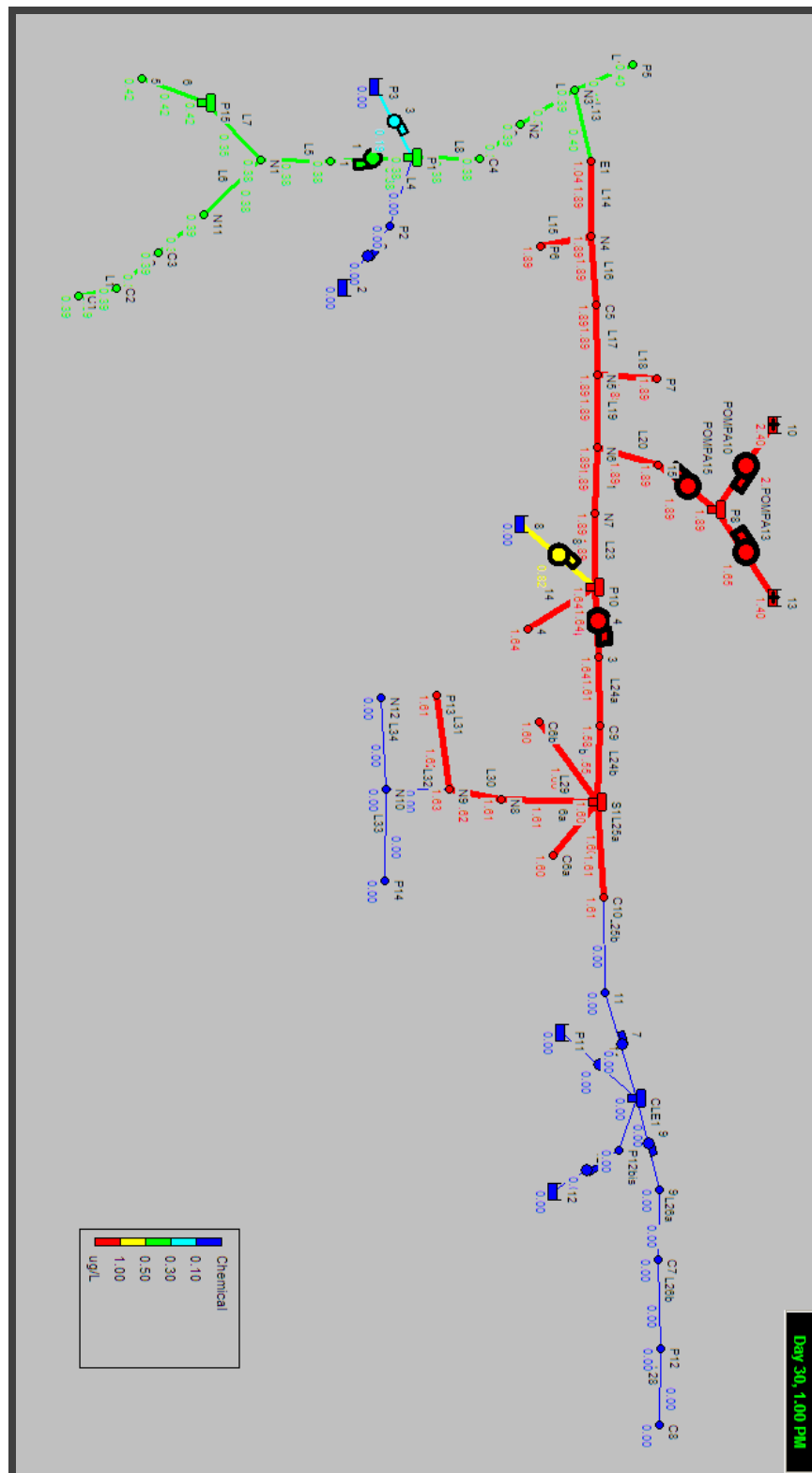


Figura 4.6 - Concentrazioni di NH_4 in rete alle h 13.00 del 30esimo giorno

Salvo l'ovvio aumento dei valori di inquinamento, visto il raddoppio delle concentrazioni nei pozzi, il comportamento qualitativo delle varie zone della rete è analogo al caso storico: la zona 1 si inquina da subito, la zona 2 è sottoposta alle stesse oscillazioni delle concentrazioni a causa del cambio di direzione del flusso, la zona 4 si mantiene pulita. Per quanto riguarda la zona 3, essa beneficia ancora dell'effetto di "volanizzazione" operato dalla centrale di Bulgarograsso ma i valori di concentrazione nei nodi si avvicinano al limite di 0.5 mg/l, pur senza superarlo ancora. La Figura 4.7 mostra con le oscillazioni delle concentrazioni di NH₄ in alcuni nodi:

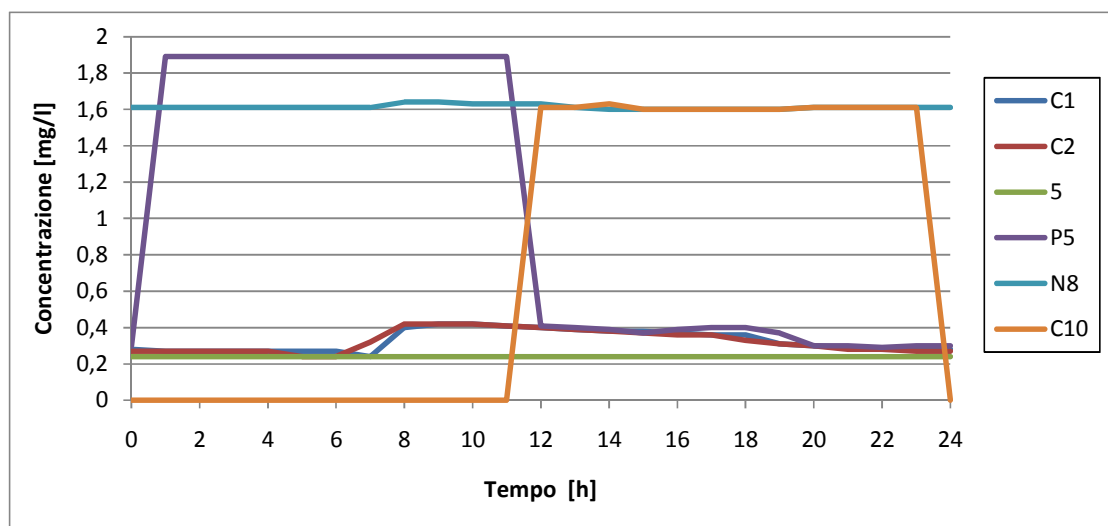


Figura 4.7 - Andamento delle concentrazioni di NH₄ nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

Anche dal grafico è evidente l'analogia qualitativa tra questo caso e il precedente, con le medesime oscillazioni giornaliere, anche se ovviamente più accentuate, per i nodi C10 e P5.

Triplicando le concentrazioni, cioè ipotizzando 2.1 e 3.6 mg/l nei pozzi Fontanino 1 e Fontanino 2, rispettivamente, si ottengono sempre risultati analoghi ma con un'importante differenza: anche nella zona 3, l'effetto di "volanizzazione" della centrale di Bulgarograsso non è più sufficiente a garantire il rispetto dei limiti in questa zona, che pertanto soffre di livelli di NH₄ superiori a 0.5 mg/l in alcune ore della giornata. La Tabella 4.10 e la Figura 4.8 mostrano i risultati ottenuti.

Infine un piccolo commento riguardo all'erogazione San Giuseppe: come nel caso di inquinamento da solventi, anche in questo caso si ha un progressivo continuo accumulo di inquinante dovuto al deterioramento costante della qualità dell'acqua nel serbatoio pensile Guanzate. Tuttavia durante il mese di simulazione non si superano i limiti di legge

(concentrazione massima raggiunta 0.38 mg/l); è però evidente che se l'inquinamento perdurasse, si giungerebbe al superamento di tali limiti in breve tempo.

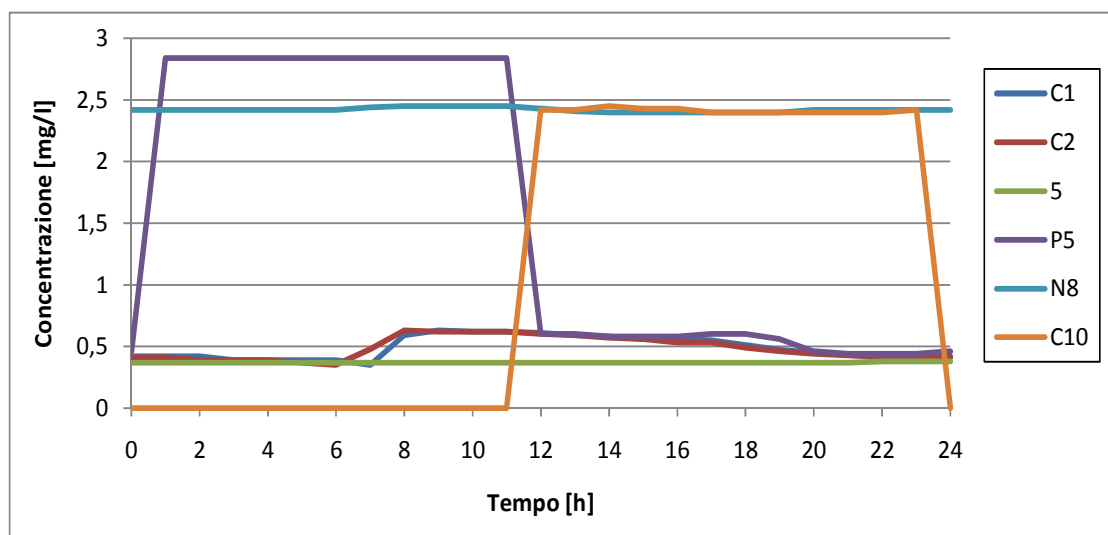


Figura 4.8 - Andamento delle concentrazioni di NH₄ nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

Tabella 4.10 - Massime concentrazioni nei nodi nell'ultimo giorno di simulazione [mg/l]

Nodo	MAX	Nodo	MAX
C1	0.63	N7	2.84
C2	0.63	4	2.52
C3	0.63	3	2.52
N11	0.63	C9	2.51
N1	0.63	15	2.84
1	0.63	C6a	2.46
5	0.38	C6b	2.46
C4	2.84	N8	2.45
P2	0.35	N9	2.45
N2	2.84	P13	2.45
N3	2.84	N10	0
P5	2.84	N12	0
E1	2.84	P14	0
N4	2.84	C10	2.45
P6	2.84	11	0
C5	2.84	P12bis	0
N5	2.84	9	0
P7	2.84	P7	2.84
N6	2.84	N6	2.84

4.1.3 Inquinamento da NO₃ nel pozzo Navedano 1

L'ultimo caso d'inquinamento di cui ci si è occupati in questa fase è relativo al pozzo Navedano 1 (ID P11) che è risultato affetto da nitrati nel 2003. Il limite di legge per tale inquinante è di 50 mg/l; nella Tabella 4.11 sono indicati i giorni in cui le concentrazioni sono risultate eccessive.

Tabella 4.11 - Superamento del limite consentito di NO₃ nel pozzo Navedano 1

ANNO	DATA MISURAZIONE	CONCENTRAZIONE NO ₃ [mg/l]
2003	8 gennaio	57
2003	29 gennaio	55
2003	9 luglio	66.73
2003	4 agosto	68.15
2003	22 settembre	56.2
2003	14 ottobre	53.9
2003	18 novembre	54
2003	15 dicembre	56.85

Negli anni successivi le concentrazioni di nitrati sembrano essere rientrate nei limiti; tuttavia, allo scopo di simulare tramite Epanet il comportamento della rete nella peggiore delle situazioni capitate in passato, si è utilizzato per il pozzo Navedano 1 il valore di **68 mg/l**, approssimando la concentrazione registrata il 4 agosto 2003. La simulazione, eseguita sempre con le medesime modalità dei casi considerati in precedenza, ha portato ai seguenti risultati (si riportano in Tabella 4.12 i nodi contaminati).

Tabella 4.12 - Massime concentrazioni nei nodi nell'ultimo giorno di simulazione [mg/l]

Nodo	MAX
C10	41.53
11	41.6
P12bis	0
9	42.13
C7	42.13
P12	42.15
C8	42.15

Si tratta di una contaminazione molto più localizzata rispetto agli altri casi, in quanto interessa solo i nodi alimentati dalla centrale di Navedano, non interessando la rete oltre il pensile La Costa. In ogni caso tutte le concentrazioni rimangono nel limite di legge: ciò è dovuto al fatto che nel serbatoio della centrale Navedano si mescolano la portata inquinata proveniente dal

pozzo Navedano 1 e quella pulita del pozzo Navedano 2. La Figura 4.9 mostra l'andamento giornaliero delle concentrazioni in due nodi interessati: Il nodo C10 riceve portata in parte anche dal pensile La Costa, non inquinato, in particolare nelle ore di maggior richiesta idrica; questo è il motivo per cui si ha un crollo della concentrazione di inquinante a partire dalle 12.

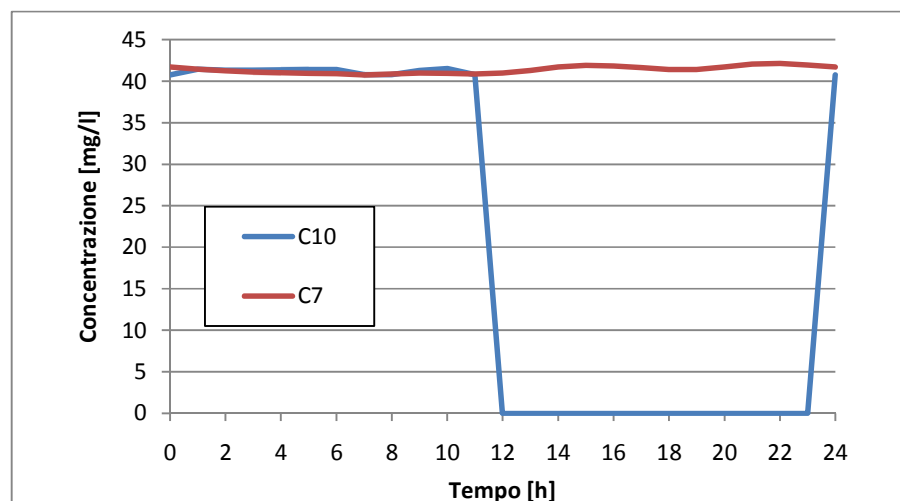


Figura 4.9 - Andamento delle concentrazioni di NO₃ nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

Raddoppiando la concentrazione, ovvero ponendo **136 mg/l** di NO₃ nel pozzo Navedano 1, si sono ottenuti i seguenti risultati:

Tabella 4.13 - Massime concentrazioni nei nodi nell'ultimo giorno di simulazione [mg/l]

Nodo	MAX
C10	83.07
11	83.21
P12bis	0
9	84.25
C7	84.27
P12	84.3
C8	84.3

In questo caso, la concentrazione molto alta nel pozzo Navedano 1 causa il superamento dei limiti di legge nei nodi interessati: risulta quindi insufficiente la miscelazione con l'acqua pulita del pozzo Navedano 2 all'interno del serbatoio CLE1.

Per quanto riguarda l'andamento giornaliero delle concentrazioni l'andamento è analogo al caso con la massima concentrazione storica, salvo ovviamente la fondamentale differenza che raddoppiando le concentrazioni si supera il limite di legge:

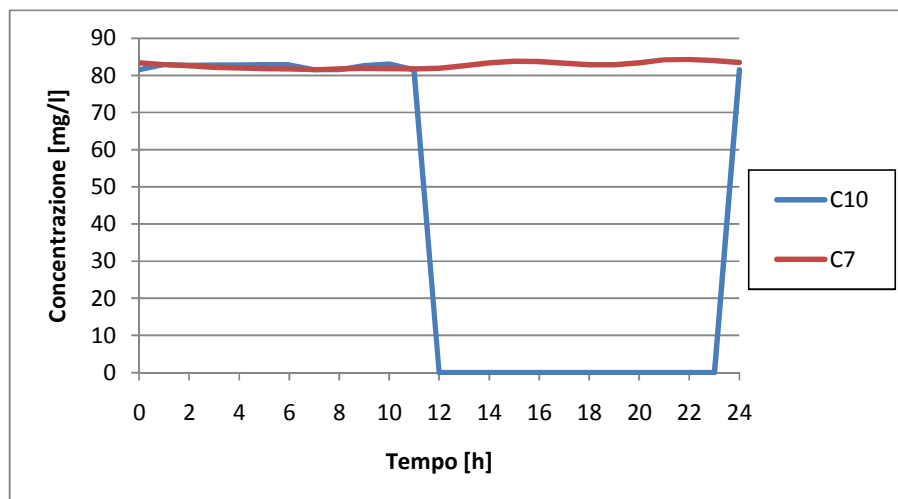


Figura 4.10 - Andamento delle concentrazioni di NO₃ nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

Triplicando la concentrazione, cioè ipotizzando nel pozzo Navedano 1 una concentrazione di NO₃ di **204 mg/l**, la situazione è ovviamente ancora peggiore con il grave superamento dei limiti di legge in tutto il tratto di rete interessato dall'inquinamento. La Figura 4.11 mostra il netto aumento di concentrazione di NO₃ nei nodi:

Tabella 4.14 - Massime concentrazioni nei nodi nell'ultimo giorno di simulazione [mg/l]

Nodo	MAX
C10	124.6
11	124.81
P12bis	0
9	126.38
C7	126.39
P12	126.45
C8	126.45

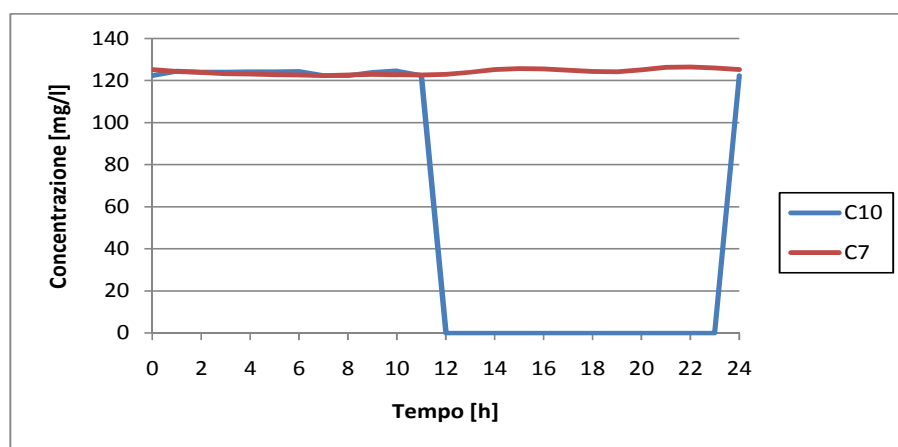


Figura 4.11 - Andamento delle concentrazioni di NO₃ nei nodi (30esimo giorno di simulazione)

Infine, la Figura 4.12 mostra un'istantanea relativa alle ore 13.00 dell'ultimo giorno di simulazione, dalla quale si può ben notare la localizzazione dell'inquinamento nella zona vicino alla centrale di Navedano.

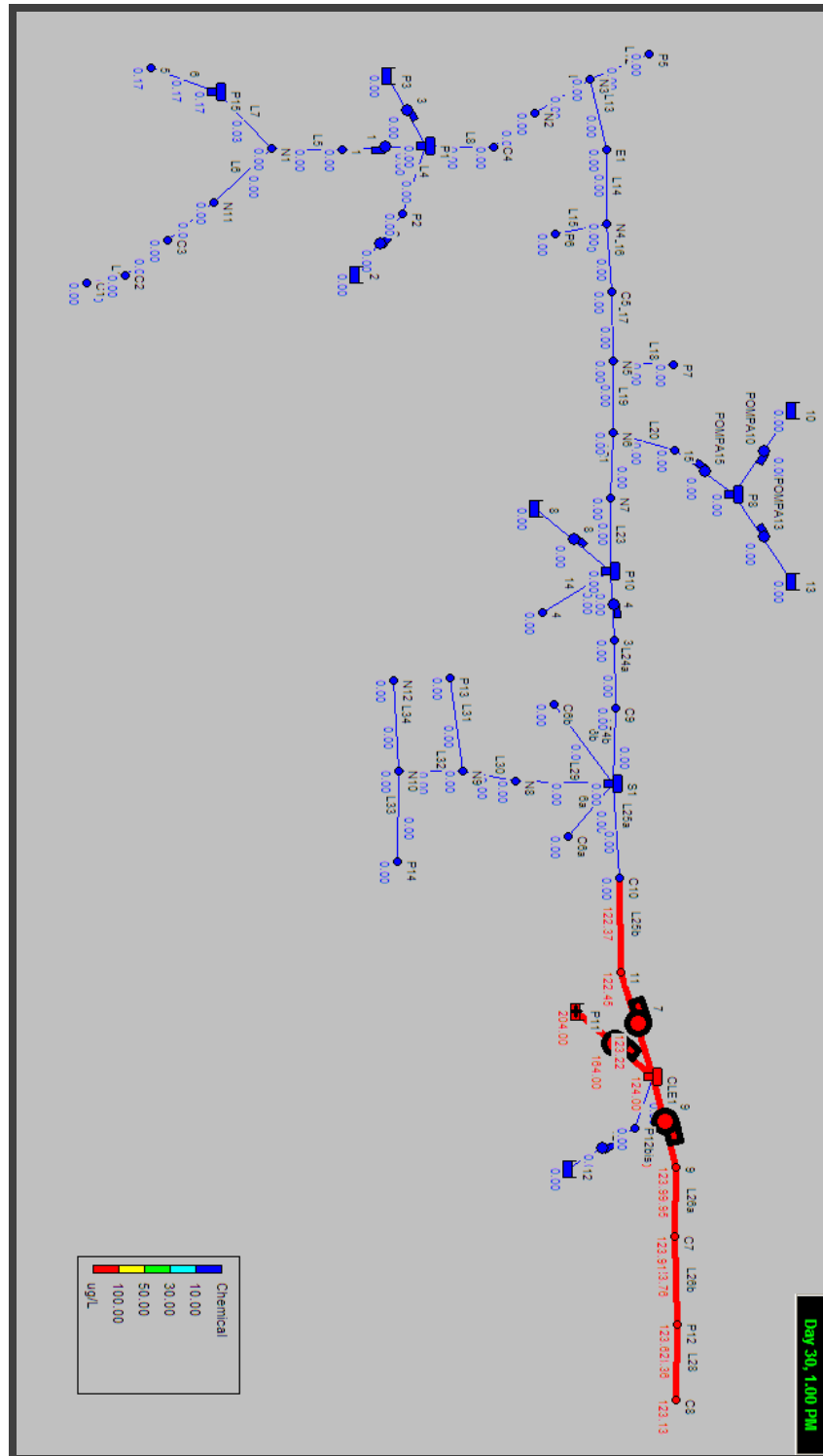


Figura 4.12 - Concentrazioni di NO₃ in rete alle h 13.00 del 30esimo giorno

4.2 Analisi di scenari di inquinamento nella rete di Mondello

Si è poi voluto condurre un'analisi relativa alle modalità di propagazione dei contaminanti anche sulla rete di Mondello.

Tale rete, rispetto a quella di Colline Comasche, presenta una complessità decisamente maggiore, sia perché dotata di un numero molto più elevato di nodi e tubazioni, sia perché si tratta di una rete a maglie chiuse, quindi strutturalmente molto diversa da una rete "ad albero" o a maglie aperte, quale ad esempio quella di Colline Comasche.

Non disponendo di misurazioni ufficiali di inquinamento nei punti di immissione in tale rete, si sono ipotizzate alcune situazioni ritenute particolarmente significative ai fini della comprensione delle modalità di propagazione della contaminazione.

4.2.1 Contaminazione nel serbatoio Gallo

Volendo focalizzare l'analisi sulle modalità di propagazione della contaminazione, non interessa più di tanto la sua reale entità, e neppure è rilevante il tipo di inquinante coinvolto; anzi, è possibile assegnare, ad esempio, una concentrazione unitaria di inquinante ad un'alimentazione, e una concentrazione nulla ad un'altra, per poter valutare immediatamente l'influenza esercitata da entrambe su ciascun nodo della rete.

Tale scelta è ancora più vantaggiosa su una rete, come quella in oggetto, alimentata da due sole fonti. È infatti possibile, assegnando una concentrazione di 1 ad un'alimentazione e una concentrazione pari a 0 all'altra, valutare le aree di influenza di ciascuna di esse semplicemente visualizzando i risultati in Epanet: ad esempio, se in un determinato nodo la concentrazione in un certo istante risultasse pari a 0.3, vorrebbe dire che tale nodo è influenzato per il 70% dall'alimentazione priva di contaminazione e per il 30% da quella inquinata; se in un altro nodo la concentrazione fosse 0.95, ciò significherebbe un'influenza quasi totale (pari al 95%) da parte dell'alimentazione contaminata.

Dunque, si è ipotizzata una concentrazione di 1 µg/l di un inquinante qualsiasi nel serbatoio Gallo, mentre si è supposto privo di contaminazione il serbatoio Petrazzi Basso.

Si è quindi simulata con Epanet tale situazione di inquinamento; di seguito si riportano tre istantanee della rete relative rispettivamente al secondo, al sedicesimo e al trentunesimo giorno di simulazione.

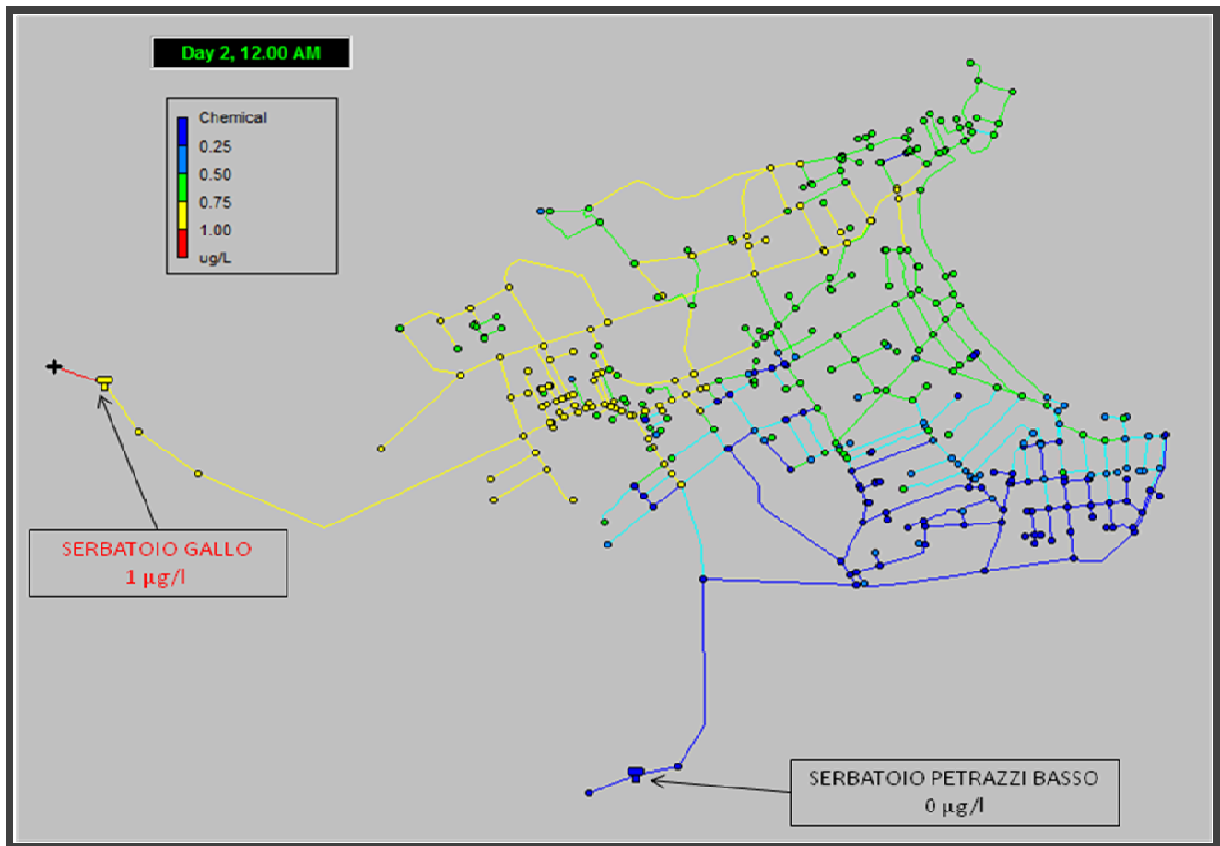


Figura 4.13 - Diffusione della contaminazione in rete all'inizio del secondo giorno di simulazione

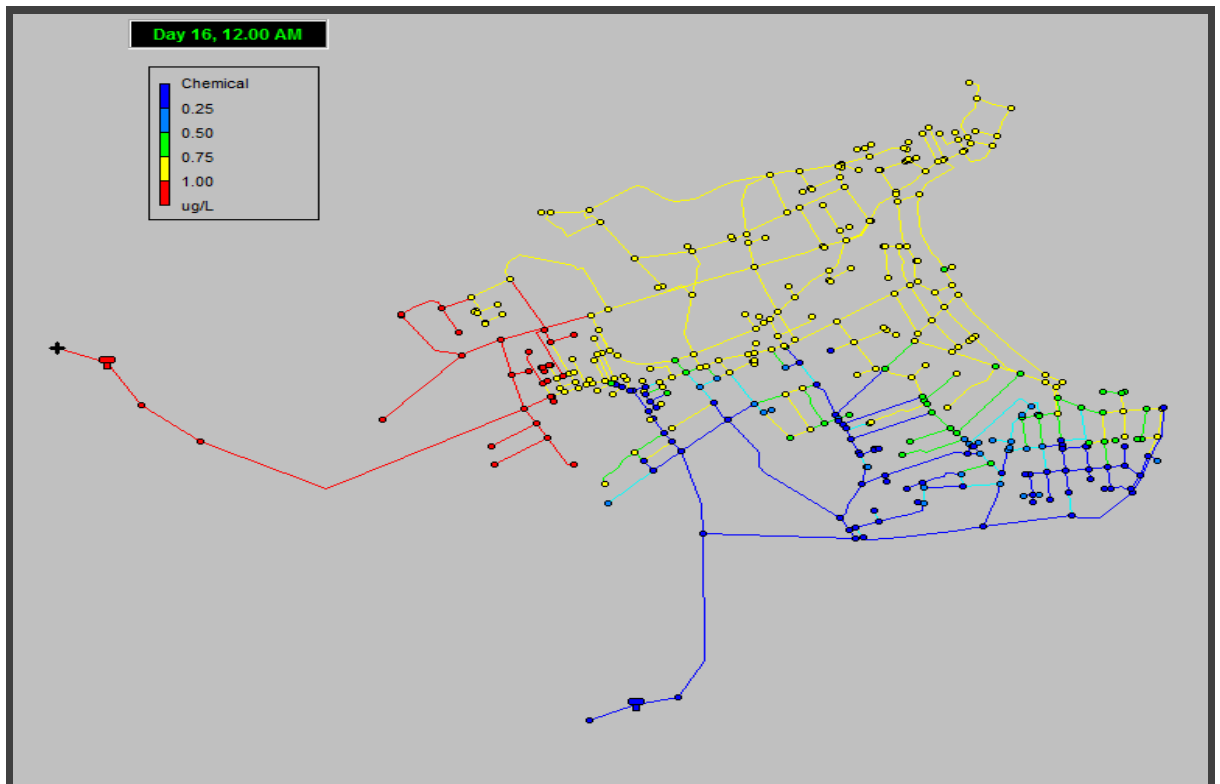


Figura 4.14 - Diffusione della contaminazione in rete all'inizio del 16esimo giorno di simulazione

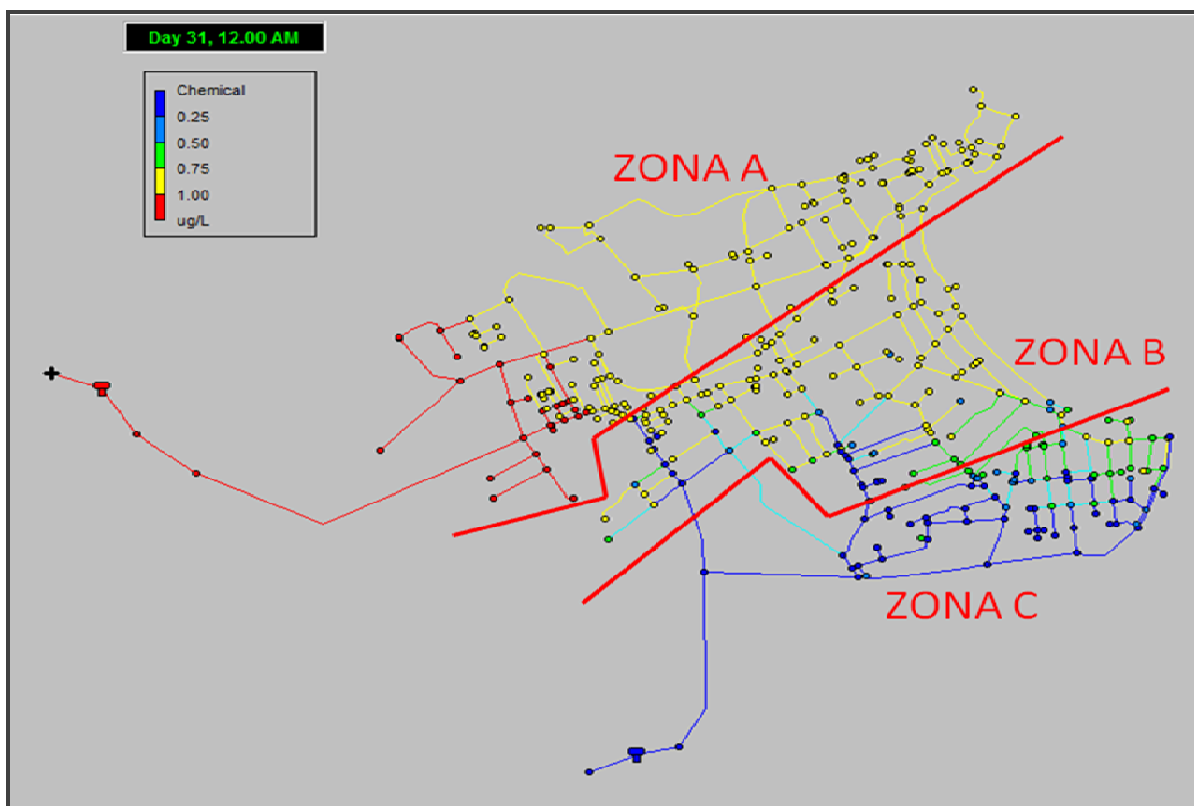


Figura 4.15 - Diffusione della contaminazione in rete all'inizio del 31esimo giorno di simulazione

Dal confronto tra le immagini, si nota innanzitutto come alla mezzanotte del sedicesimo e del trentunesimo giorno la situazione sia pressoché identica; ciò significa che la rete è ormai a regime, e di conseguenza la concentrazione nei vari nodi si modifica solo nell'arco della giornata, con la variazione delle portate richieste ai nodi, ma ripetendosi con il medesimo andamento ogni giorno.

In realtà, analizzando la simulazione nel dettaglio, risulta che la situazione di regime è raggiunta già a partire dal quarto giorno dall'inizio della contaminazione.

Dall'immagine della rete a regime, si possono distinguere sostanzialmente 3 zone d'influenza:

- ZONA A: comprende i nodi con concentrazione pari almeno a 0.8 $\mu\text{g/l}$ in tutto l'arco delle 24 ore. Molti di essi sono influenzati unicamente dal serbatoio Gallo e pertanto mantengono una concentrazione costantemente unitaria; trattasi in particolare, com'è logico, dei nodi più prossimi al serbatoio.
- ZONA B: è la parte centrale della rete, interessata da notevoli oscillazioni orarie di concentrazione; in molti nodi di tale zona si passa con facilità da valori pressoché nulli in alcune ore a concentrazioni unitarie o comunque molto alte in altre. Si rileva quindi un'influenza combinata da parte dei due serbatoi; la variazione delle portate richieste

ora per ora modifica la quota parte di flusso richiamata da ognuno di essi, e quindi il valore di concentrazione risultante.

- ZONA C: è la parte di rete più prossima al serbatoio Petrazzi Basso, caratterizzata da concentrazioni modeste in gran parte dei nodi e per gran parte della giornata, con picchi solo temporanei di contaminazione.

È interessante notare come la zona C, che è sostanzialmente la zona d'influenza del serbatoio Petrazzi Basso, abbia un'estensione più limitata della zona A, a indicare una generale maggiore influenza del serbatoio Gallo sulla rete rispetto al serbatoio Petrazzi Basso. Ciò è confermato anche dal fatto che, se è vero che nella parte "alta" della rete vi sono molti nodi con concentrazione costantemente pari a 1 µg/l, nella parte "bassa" non vi sono nodi a concentrazione costantemente nulla, nemmeno nelle zone più vicine al serbatoio Petrazzi Basso; in questi nodi le concentrazioni sono pari a 0 solo in alcune ore della giornata, ma in altre si rilevano comunque concentrazioni modeste di inquinante.

La diversa influenza dei serbatoi nelle tre zone non provoca soltanto, com'è logico, differenze nei valori medi giornalieri delle concentrazioni ai nodi, ma anche nell'ampiezza delle oscillazioni delle concentrazioni stesse nell'arco della giornata. Infatti, nella zona A le variazioni temporali di concentrazione sono molto limitate, poiché l'influenza pressoché totale del serbatoio Gallo mantiene valori costantemente elevati e prossimi a 1 µg/l nella maggior parte dei nodi. Maggiori oscillazioni giornaliere si osservano invece nella zona C, dato che l'influenza prevalente esercitata dal serbatoio Petrazzi Basso non impedisce una parziale penetrazione delle portate contaminate governate dall'altro serbatoio, che portano qualche picco di concentrazione in alcuni nodi, pur in un contesto generale di inquinamento poco significativo. In assoluto le maggiori variazioni giornaliere di concentrazione si osservano nella zona B, i cui nodi sono influenzati dai due serbatoi in maniera sostanzialmente equivalente.

A dimostrazione di ciò, si riportano gli andamenti giornalieri delle concentrazioni, relativi al trentesimo giorno di simulazione, in tre nodi appartenenti ognuno a una diversa zona: il nodo 276 della zona A, il nodo 71 della zona B e il nodo 217 facente parte della zona C.

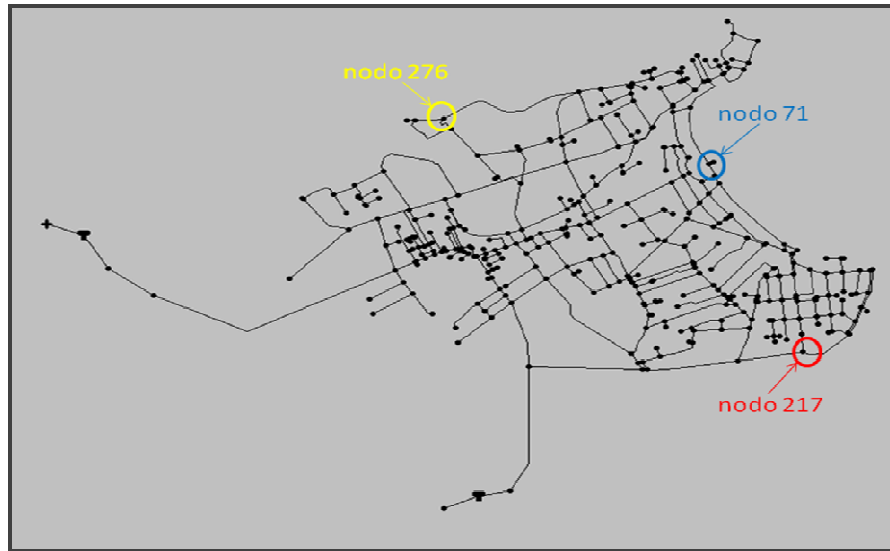


Figura 4.16 - Localizzazione dei nodi scelti

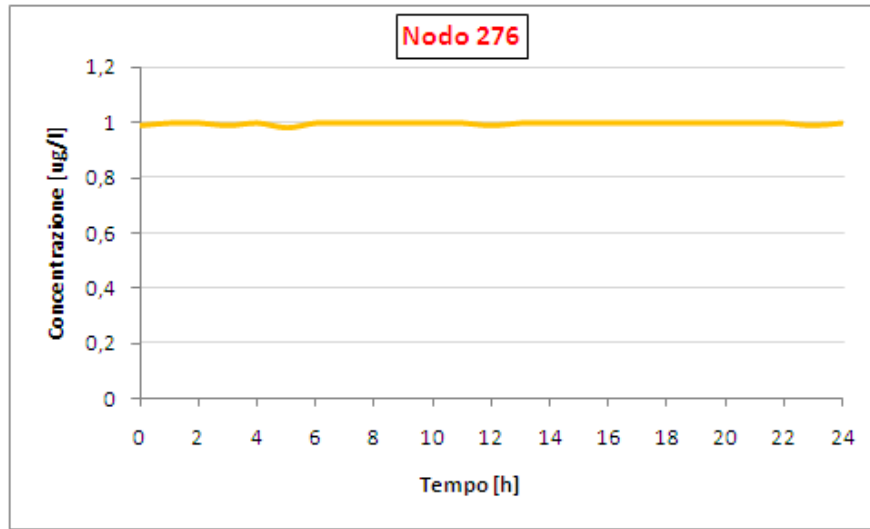


Figura 4.17 - Andamento concentrazione nel nodo 276 (30esimo giorno di simulazione)

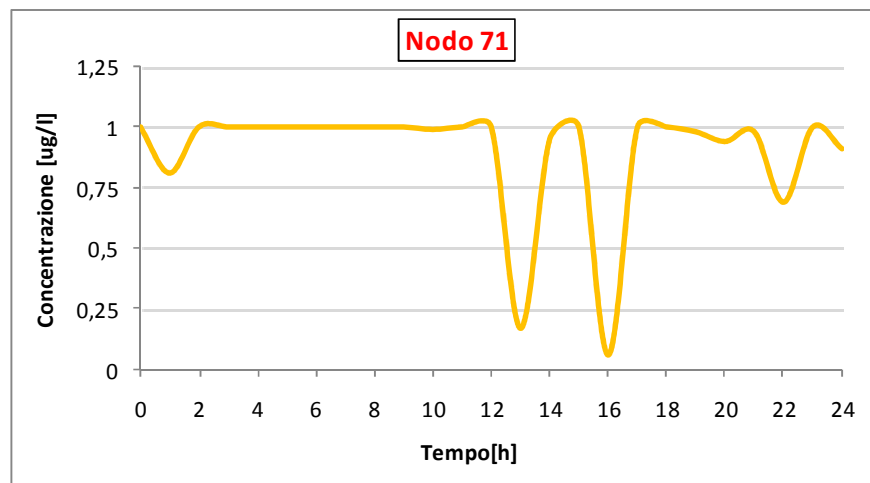


Figura 4.18 - Andamento concentrazione nel nodo 71 (30esimo giorno di simulazione)

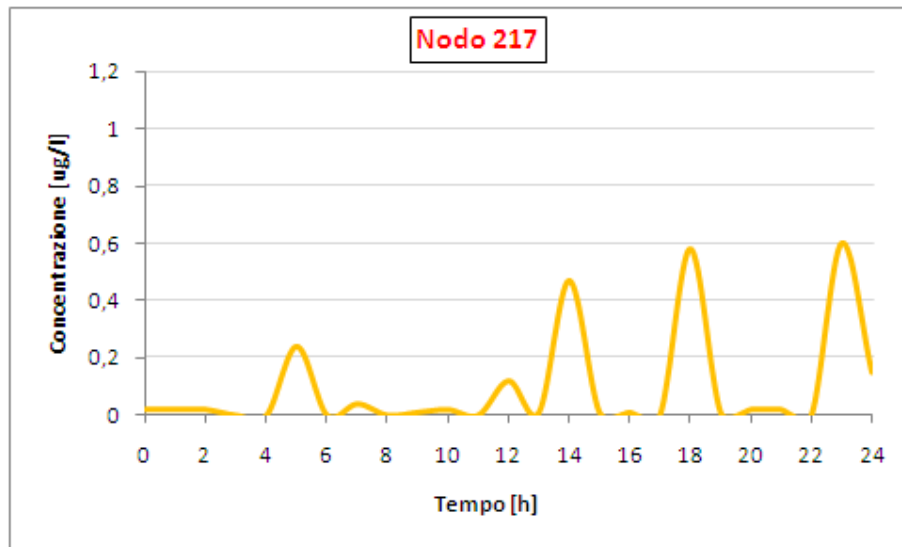


Figura 4.19 - Andamento concentrazione nel nodo 217 (30esimo giorno di simulazione)

Si fa notare un ulteriore vantaggio della scelta compiuta di utilizzare concentrazioni pari a 0 e 1 in ingresso in rete. Tale scelta rende superfluo considerare il caso speculare, ovvero con contaminazione presente solo nel serbatoio Petrazzi Basso; infatti è sufficiente considerare il complemento a 1, in ogni nodo, del valore di concentrazione ottenuto ipotizzando contaminato il serbatoio Gallo, per ottenere la concentrazione che tale nodo registrerebbe in presenza di contaminazione solo nel serbatoio Petrazzi Basso. Ad esempio, un nodo che nel caso considerato registra concentrazione unitaria nel caso speculare registrerebbe concentrazione nulla e viceversa, un nodo che registra una concentrazione pari a 0.3 avrebbe un valore di 0.7 e così via.

4.2.2 Contaminazione nei serbatoi Gallo e Petrazzi Basso

Successivamente si è ipotizzata una contaminazione combinata da parte del medesimo inquinante nei due serbatoi. Si è supposta la presenza di un generico inquinante, il cui limite di legge sia fissato a 10 µg/l, con concentrazione in ingresso costante nel tempo, pari a 15 µg/l nel serbatoio Gallo e a 5 µg/l nel serbatoio Petrazzi Basso.

Si è quindi simulata con Epanet tale situazione di inquinamento; come fatto in precedenza, si riportano tre istantanee della rete relative rispettivamente al secondo, al sedicesimo e al trentunesimo giorno di simulazione.

Per l'interpretazione delle immagini, si tenga presente che essendo 10 µg/l il limite di legge relativo all'inquinante scelto, i nodi colorati in giallo e in rosso risultano interessati da un livello di contaminazione inaccettabile.

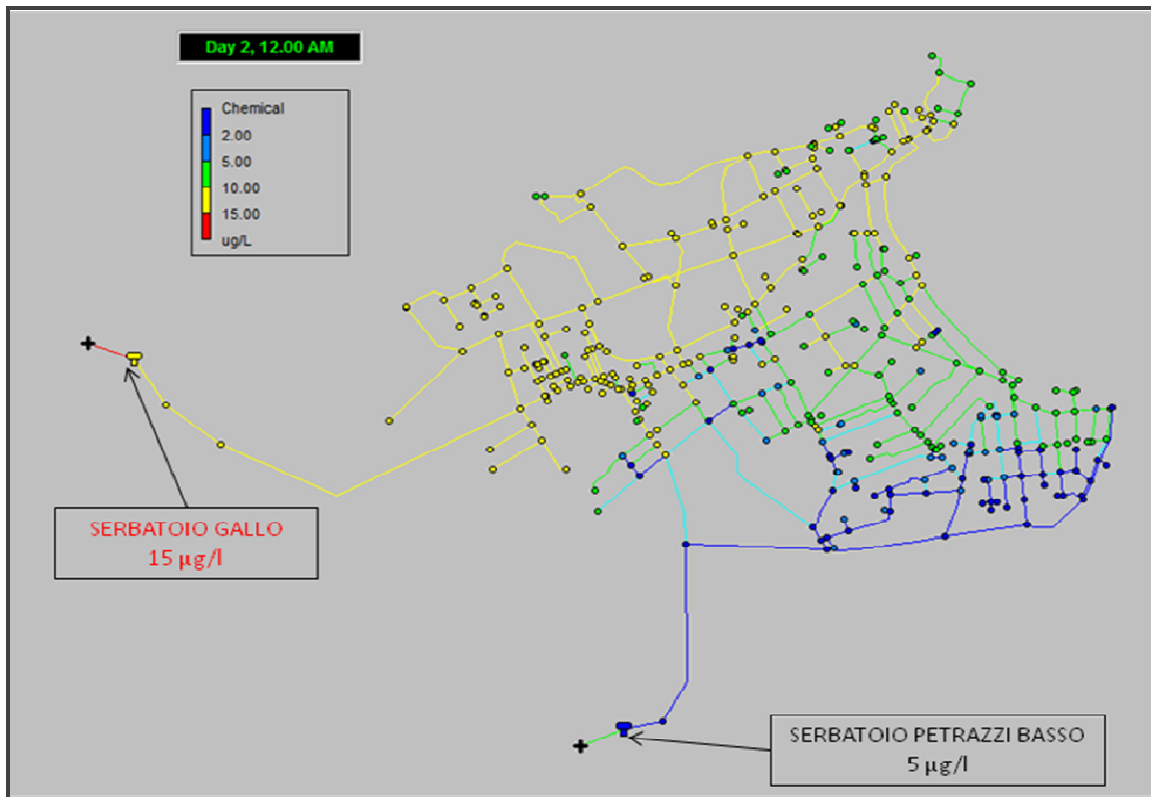


Figura 4.20 - Diffusione della contaminazione in rete all'inizio del secondo giorno di simulazione

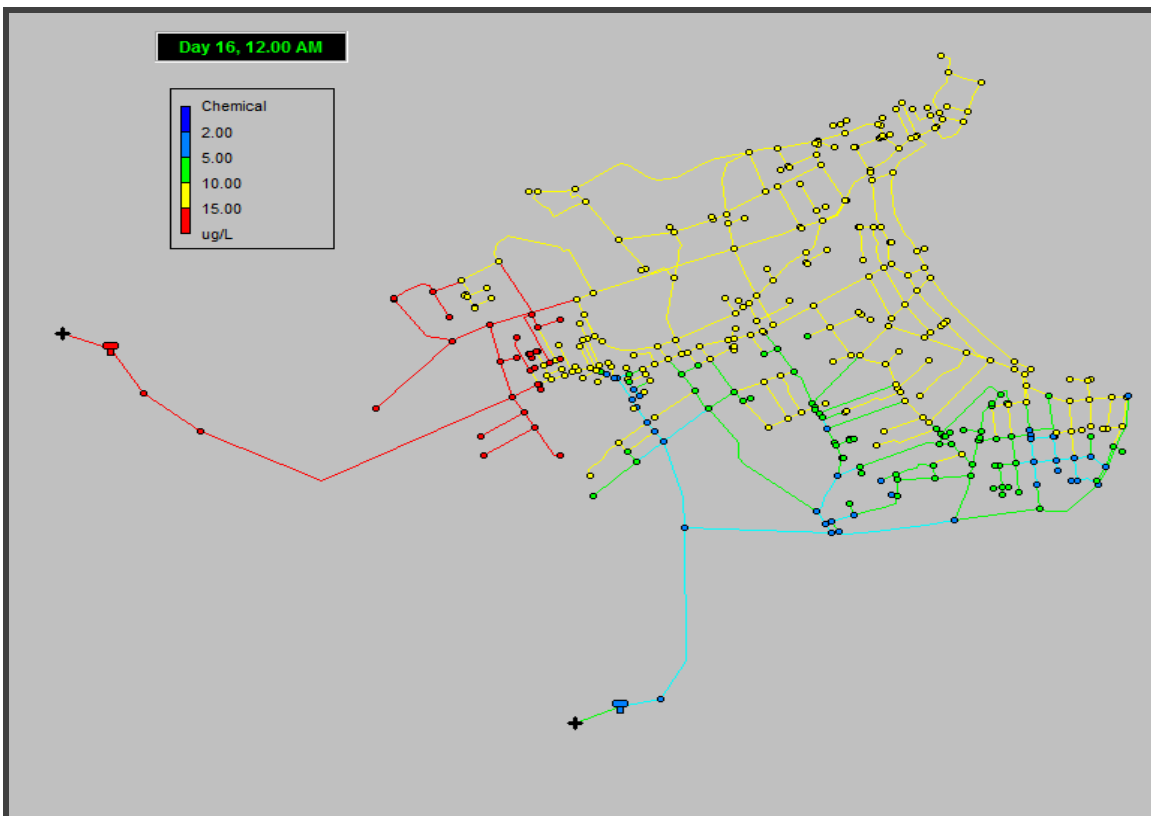


Figura 4.21 - Diffusione della contaminazione in rete all'inizio del 16esimo giorno di simulazione

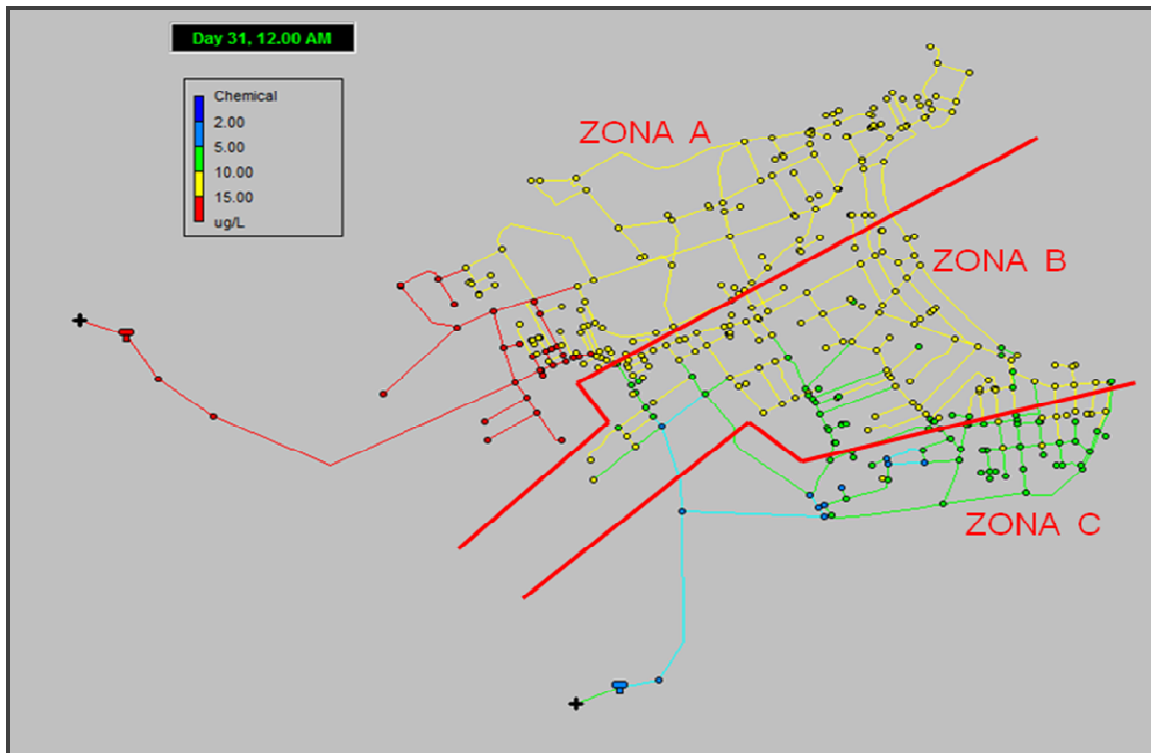


Figura 4.22 - Diffusione della contaminazione in rete all'inizio del 31esimo giorno di simulazione

Anche in questo caso la rete si porta in una situazione di regime molto rapidamente, già a partire dal terzo giorno.

Si individuano tre zone piuttosto simili per estensione e caratteristiche al caso precedente:

- ZONA A: influenzata quasi totalmente dal serbatoio Gallo, registra concentrazioni prossime a $15 \mu\text{g/l}$ in tutti i nodi.
- ZONA B: influenzata da entrambi i serbatoi, i nodi che ne fanno parte registrano oscillazioni molto significative nell'arco della giornata, al variare delle portate richieste dalle utenze.
- ZONA C: influenzata prevalentemente, ma non completamente dal serbatoio Petrazzi Basso; si registrano concentrazioni per lo più basse, ma solo in alcuni nodi esse si mantengono inferiori al limite di legge per tutta la giornata. Infatti, nella maggior parte dei nodi si hanno, in determinate ore, dei picchi di concentrazione che eccedono il limite di $10 \mu\text{g/l}$.

Anche le oscillazioni giornaliere di concentrazione rispecchiano il caso precedente, risultando minime nella zona A e massime nella zona B. A prova di ciò si riportano gli andamenti giornalieri della concentrazione relativi agli stessi tre nodi considerati in precedenza.

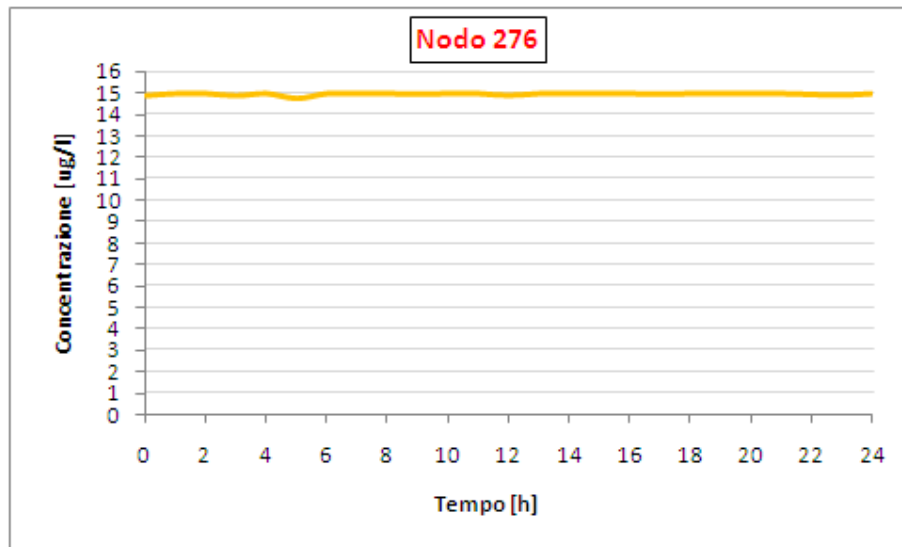


Figura 4.23 - Andamento concentrazione nel nodo 276 (30esimo giorno di simulazione)

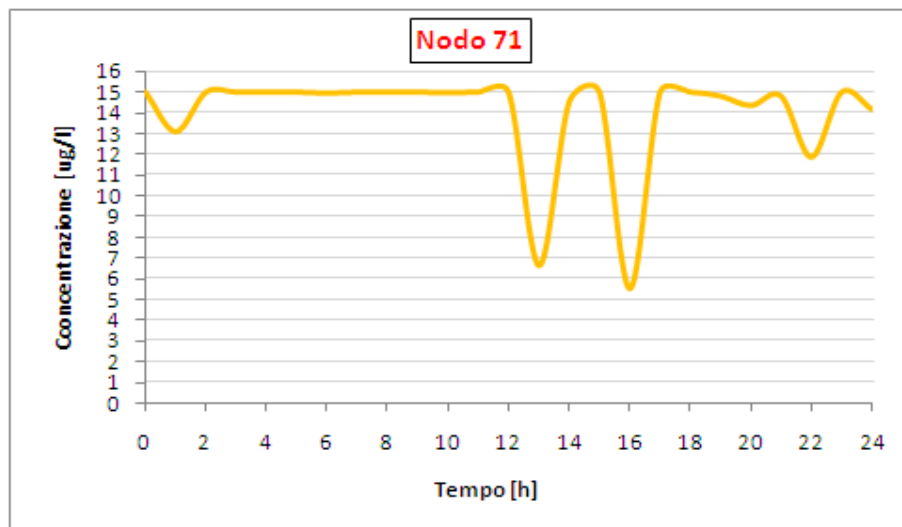


Figura 4.24 - Andamento concentrazione nel nodo 71 (30esimo giorno di simulazione)

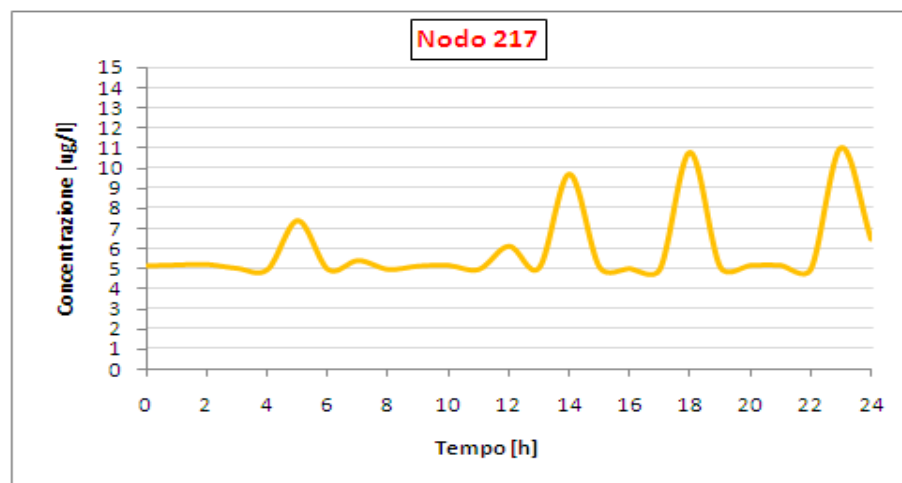


Figura 4.25 - Andamento concentrazione nel nodo 217 (30esimo giorno di simulazione)

Dalle prove effettuate emerge chiaramente la maggiore influenza che il serbatoio Gallo esercita sulla rete, rispetto al serbatoio Petrazzi Basso.

Quindi, dal punto di vista pratico, è particolarmente importante monitorare la qualità delle acque di alimentazione del serbatoio Gallo, poiché una sua contaminazione avrebbe effetti molto gravi, estendendosi in pochissimi giorni alla totalità della parte “superiore” della rete, che comprende le suddette zone A e B; l'erogazione alle utenze di tali zone andrebbe immediatamente interrotta. Non solo, ma anche diversi nodi della zona C, più prossima al serbatoio Petrazzi Basso, sarebbero interessati da picchi rilevanti di contaminazione, che richiederebbero una verifica specifica nodo per nodo, per accertarsi che i limiti di legge non vengano superati in nessuna ora della giornata.

Viceversa, un'improvvisa contaminazione del serbatoio Petrazzi Basso avrebbe certamente pesanti ripercussioni sulla zona C e in parte anche sulla zona B, imponendo probabilmente l'interruzione di gran parte delle erogazioni ivi presenti. Tuttavia la zona A, risultando influenzata quasi soltanto dal serbatoio Gallo, non sarebbe raggiunta dalla contaminazione, e dunque si potrebbero mantenere funzionanti tutte le erogazioni di tale zona senza particolari preoccupazioni.

5. SVILUPPO DI UN MODELLO ALTERNATIVO PER LA STIMA DELLE CONCENTRAZIONI IN RETI D'ACQUEDOTTO

5.1 Media pesata delle concentrazioni

L'obiettivo della seconda parte del lavoro di tesi è stato cercare un modello alternativo che permetta di stimare le concentrazioni nei vari nodi di una rete di acquedotto; ovvero, un modello che consenta di caratterizzare il livello di inquinamento di un certo nodo, e le sue variazioni al passare del tempo, conoscendone la posizione rispetto alle fonti che lo alimentano, le concentrazioni di inquinanti in esse e la quota-parte di portata che tale nodo riceve da ogni fonte di alimentazione.

Il modello elaborato si fonda sull'elementare concetto di media pesata.

Preso un qualunque nodo i -esimo della rete, la portata in esso transitante giungerà da N fonti di alimentazione, ognuna contaminata con concentrazione di inquinante pari a c_j . La concentrazione finale nel nodo C_i si potrà calcolare come media pesata delle concentrazioni j -esime attraverso la relazione:

$$C_i = \sum_{j=1}^N \frac{c_j q_{ij}}{Q_i} \quad (16)$$

dove q_{ij} = portata in arrivo al nodo i dal pozzo j (l/s); Q_i = portata totale circolante nel nodo i (l/s).

Tuttavia tale formula non costituisce da sola una soluzione adeguata. Vi sono infatti due ulteriori fattori che vanno tenuti in considerazione: il tempo di traslazione nelle condotte e la diluizione attuata dai serbatoi.

5.2 Tempo di traslazione nelle condotte

Il primo fattore è il tempo di traslazione nelle condotte. In una rete d'acquedotto, le portate circolanti nei vari tratti non sono costanti, ma generalmente variano nel tempo a causa delle oscillazioni della portata immessa in rete e di quella erogata ai nodi. Le portate in arrivo al nodo i -esimo dal pozzo j -esimo si modificano continuamente, facendo variare conseguentemente il valore della concentrazione risultante nel nodo. È necessario quindi effettuare il calcolo della

concentrazione su ogni intervallo di tempo Δt , ognuno dei quali sarà caratterizzato da differenti valori delle portate q_{ij} in arrivo dai pozzi. Il tempo di traslazione nelle condotte risulta determinante in relazione proprio a tali portate.

Si ipotizzi ad esempio che all'istante t_1 il pozzo j immetta in rete una portata q_1 , e che al nodo i giunga proprio tale portata, mentre all'istante successivo $t_2 = t_1 + \Delta t$ la portata immessa dal pozzo j sia pari a $q_2 = q_1 + \Delta q_1$. Tale variazione di portata all'immissione, Δq_1 , non si riflette immediatamente all'erogazione, in quanto è necessario un certo lasso temporale affinché la "perturbazione" di portata, o in altre parole il nuovo flusso in ingresso, raggiunga il nodo i . Questo tempo di traslazione, indicato nel seguito come T_T , è calcolabile facilmente una volta noto il percorso idraulico che il flusso deve compiere per giungere al nodo i dal pozzo j . Infatti, supponendo che tale percorso sia costituito da m tratti, ognuno con lunghezza l_k (m) e caratterizzato da una velocità v_k del flusso idrico (m/s), è semplicemente pari a:

$$T_T = \sum_{K=1}^m \frac{l_K}{v_K} \quad (17)$$

A questo punto, è necessario confrontare il tempo T_T con l'intervallo di calcolo Δt . Se $T_T < \Delta t$, la portata che giunge al nodo i dal pozzo j all'istante t_2 è effettivamente pari a q_2 , ma se $T_T > \Delta t$ la portata effettiva in arrivo al nodo rimane pari a q_1 , poiché la variazione Δq_1 non ha ancora coperto la distanza presente tra l'immissione e l'erogazione. Per ogni nodo della rete, occorre svolgere questo calcolo con riferimento a tutti i pozzi da cui tale nodo è alimentato, considerando quindi il relativo percorso idraulico e il tempo di traslazione della portata all'interno di esso; una volta fatto ciò, si disporrà delle effettive portate q_{ij} in arrivo da ciascun pozzo j per ogni determinato istante t e sarà dunque possibile applicare la formula (16) per calcolare la concentrazione C risultante nel nodo.

In linea generale, quanto appena visto va applicato anche alle concentrazioni nei flussi in ingresso in rete, nel caso in cui essi siano variabili nel tempo. Infatti, si ipotizzi ad esempio che all'istante t_1 il pozzo j immetta in rete una portata che trasporta un contaminante con concentrazione c_1 , e che al nodo i la concentrazione nel flusso in arrivo dal pozzo j sia proprio pari a c_1 , mentre all'istante successivo $t_2 = t_1 + \Delta t$ la concentrazione nella portata immessa dal pozzo j sia differente, pari a $c_2 = c_1 + \Delta c_1$. Essendo la contaminazione veicolata dal flusso idrico, è chiaro che la variazione di concentrazione Δc_1 avrà effetto sull'erogazione solo dopo che il flusso l'avrà raggiunta, o in altre parole dopo che avrà compiuto l'intero percorso idraulico tra il

pozzo j e il nodo i . Tuttavia nelle applicazioni del modello riportate nei paragrafi successivi si ipotizza che le concentrazioni c_j siano costanti nel tempo; si ritiene accettabile tale ipotesi, poiché in genere la contaminazione nei pozzi presenta variazioni graduali nel tempo, che possono essere trascurate se la simulazione si limita a pochi giorni. In effetti, anche nelle simulazioni della propagazione di inquinanti in reti reali, descritte nel capitolo 4, si sono sempre utilizzate concentrazioni in ingresso costanti. Questa ipotesi semplificativa permette di applicare la traslazione temporale descritta in precedenza solo alle portate in arrivo, considerando sempre costante la concentrazione di inquinante veicolata dal flusso.

Nell'applicazione pratica di tale metodo, ovvero all'atto della sua implementazione in Excel, si deve prestare attenzione ad alcuni fattori che rendono il calcolo più complicato. Innanzitutto, le velocità v_k nei vari tratti di rete cambiano ad ogni intervallo di tempo, e occorre tener conto di ciò nel calcolo del tempo T_T secondo la formula (17). Inoltre, dal momento che si è utilizzato il minimo intervallo di tempo possibile in Epanet, pari a 1 minuto, allo scopo di aumentare al massimo la risoluzione e l'affidabilità dei risultati ottenuti, se le lunghezze dei vari tratti sono rilevanti è assai probabile che il tempo T_T risulti sempre superiore all'intervallo di calcolo. Conviene dunque impostare il foglio di calcolo basandosi sulla distanza spaziale coperta dal flusso in ogni intervallo di tempo.

Riconsiderando l'esempio precedente, si supponga che il nuovo flusso $q_2 = q_1 + \Delta q_1$ "parta" dal pozzo di immissione in un determinato istante t_1 , percorrendo il primo tratto del percorso idraulico verso l'erogazione. Nell'intervallo di tempo Δt_1 il flusso percorre una distanza pari a:

$$x_1 = v_{k,1} \Delta t_1 \quad (18)$$

dove $v_{k,1}$ = velocità nel tratto k nell'intervallo di tempo Δt_1 (m/s); x_1 = percorso compiuto dal flusso nell'intervallo di tempo Δt_1 (m). Nell'intervallo di tempo Δt_2 il flusso considerato percorrerà invece una distanza pari a:

$$x_2 = v_{k,2} \Delta t_2 \quad (19)$$

dove $v_{k,2}$ = velocità nel tratto k nell'intervallo di tempo Δt_2 (m/s); x_2 = percorso compiuto dal flusso nell'intervallo di tempo Δt_2 (m).

Si procede in questo modo, prestando attenzione a modificare la velocità v_k non solo al passare del tempo, ma anche al variare del tratto di rete in cui il flusso considerato scorre in quel particolare istante. Si calcola ad ogni step di calcolo il percorso cumulato del flusso a partire dal

pozzo d'immissione; finché il percorso cumulato è inferiore alla lunghezza del primo tratto si considera la velocità del flusso nel primo tratto, quando viene coperta tutta la lunghezza del primo tratto si considera la velocità del secondo tratto e così via. Quando tale percorso cumulato risulta uguale o superiore alla lunghezza totale del percorso idraulico dal pozzo j al nodo i , costituito dalla somma delle lunghezze l_k degli m tratti che lo compongono, allora la portata in arrivo al nodo i inizierà ad essere q_2 , mentre fino a quel momento si manterrà il precedente valore q_1 .

Svolgendo tali calcoli per ogni nodo d'immissione e ogni pozzo della rete oggetto di studio, si otterranno tutte le portate q_{ij} a ogni intervallo di tempo Δt , da inserire nella formula (16) per il calcolo delle concentrazioni ai nodi.

5.3 Effetto di diluizione nei serbatoi

Il secondo fattore fondamentale da considerare nell'applicare il modello è l'effetto di diluizione nei serbatoi. Infatti, nella formula (16) le concentrazioni c_j sono quelle dei pozzi che immettono portata in rete; tuttavia in genere tali pozzi non sollevano acqua direttamente alla rete, ma a dei serbatoi di compenso che successivamente alimentano i rami della rete, o a gravità oppure mediante ulteriori sistemi di pompaggio.

Un esempio di questa classica configurazione è la centrale Fontanino della rete sovracomunale di Colline Comasche: i pozzi Fontanino 1 e 2 alimentano il serbatoio attraverso le pompe 10 e 13, mentre a sua volta il serbatoio fornisce acqua alla rete a mezzo della pompa 15.

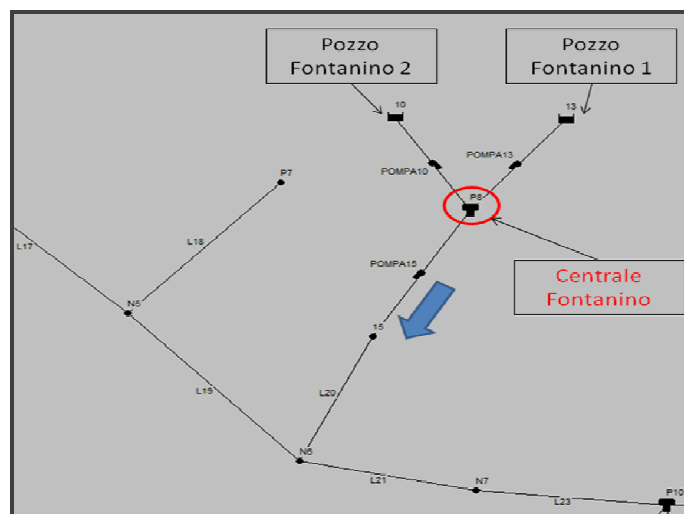


Figura 5.1 - Parte della rete di Colline Comasche comprendente i pozzi Fontanino 1 e 2 e la centrale Fontanino

I serbatoi posizionati tra i pozzi di immissione e le erogazioni costituiscono una capacità indispensabile per compensare i surplus e i deficit della portata immessa in rete rispetto a quella necessaria alle erogazioni.

Oltre a tale funzione di compenso, però, tali serbatoi hanno un effetto significativo sulla contaminazione che viene immessa in rete, favorendo la diluizione delle portate inquinate nel volume idrico del serbatoio stesso, che si ipotizza inizialmente privo di contaminazione e viene inquinato solo progressivamente. Tale effetto risulta fondamentale nel transitorio iniziale, ovvero nelle prime ore successive all'inizio della contaminazione, diventando gradualmente meno importante all'aumentare della concentrazione di inquinante nel serbatoio, fino ad annullarsi una volta che la rete raggiunga una situazione di regime; quando ciò accade, dal punto di vista della diffusione della contaminazione è come se non fosse presente il serbatoio, nonostante esso mantenga ovviamente la funzione di compenso idraulico.

Con riferimento alla formula (16), le c_j non dovrebbero quindi rappresentare le concentrazioni relative alle portate immesse in rete dai pozzi, bensì le concentrazioni in uscita dai serbatoi, che nella rete a regime coincideranno con quelle immesse dai pozzi, ma nel transitorio iniziale sono sensibilmente inferiori a causa dell'effetto di diluizione delle portate operato dai serbatoi stessi. È quindi palese che non tenendo conto del ruolo dei serbatoi in genere si sovrastimano fortemente le concentrazioni in rete nelle prime ore dall'ingresso della contaminazione.

Nel paragrafo seguente si illustra la soluzione adottata per tenere conto dell'effetto dei serbatoi nel modello di stima delle concentrazioni ai nodi.

5.3.1 Serbatoi come bioreattori completamente miscelati a flusso continuo

È evidente, anche da quanto descritto nel paragrafo precedente, come la capacità di compenso dei serbatoi produca un effetto di miscelazione delle portate e di diluizione degli inquinanti.

In un'ipotetica rete priva di serbatoi la contaminazione entrerebbe nella rete stessa in modo pressoché istantaneo, ma nella realtà questo non succede. In effetti, la presenza dei serbatoi ha un effetto di "volanizzazione" che rallenta l'ingresso dell'inquinamento in rete; in altre parole, se uno o più pozzi si inquinano la diluizione delle portate immesse nei corrispondenti serbatoi permette il mantenimento di un buon livello di qualità dell'acqua erogata alle utenze per alcune ore, o giorni. Il tempo in cui si riescono a mantenere gli standard di qualità, una volta che uno o più pozzi risultino compromessi, dipende dall'entità della contaminazione, dei limiti di legge per l'inquinante in questione e della capacità dei serbatoi, ed è fondamentale affinché il gestore

della rete abbia il tempo di attuare i provvedimenti necessari a isolare, contenere o ridurre la contaminazione.

Risulta quindi necessario interpretare correttamente il ruolo dei serbatoi nello sviluppo del modello di stima. Pertanto si sono studiati separatamente tali serbatoi, per ricavare l'andamento delle concentrazioni in uscita dai serbatoi stessi in funzione delle portate e delle concentrazioni di inquinanti note in ingresso, ovvero caratteristiche dell'acqua immessa dai pozzi. Una volta fatto ciò, è stato possibile sostituire nella formula (16) tali valori come c_j , al posto delle concentrazioni nei pozzi. In altre parole, nell'espressione del modello si introducono delle concentrazioni di inquinante già "attenuate" a priori tramite un modello teorico che rappresenti l'effetto di diluizione operato dai serbatoi.

L'ipotesi principale consiste nel considerare i serbatoi paragonabili a reattori a miscelazione completa e alimentazione continua. L'alimentazione è continua perché la portata entrante nei serbatoi della rete è costantemente diversa da zero. La miscelazione si assume completa, ovvero tutta l'acqua che entra nel serbatoio viene istantaneamente e completamente miscelata con l'acqua già presente in esso, sia in Epanet assegnando loro la modalità "complete mixing", sia nel modello teorico con le opportune correzioni che vengono descritte qui di seguito.

Inoltre si assume che all'interno di tali serbatoi, non avvengano reazioni chimiche o biologiche significative, ma che l'attenuazione delle concentrazioni sia unicamente legata alla diluizione operata dal volume idrico a disposizione. Appare dunque possibile utilizzare le equazioni tipiche di tali reattori applicandole al caso dei serbatoi, ponendo la costante di reazione $K_0 = 0$.

Si riassume brevemente il procedimento per ricavare l'equazione associata a un reattore CSTR (Completely Stirred Tank Reactor) con alimentazione continua, considerando inizialmente il volume V nel serbatoio costante, per poi eliminare tale prima ipotesi.

Serbatoio a volume costante

Se il funzionamento è continuo, dall'ipotesi di volume costante segue che:

$$Q_{in} = Q_{out} = Q \quad (20)$$

Inoltre essendo la miscelazione completa, la concentrazione di inquinante in uscita dal reattore è pari a quella dell'inquinante all'interno del reattore stesso, cioè:

$$C_{out} = C \quad (21)$$

Si può dunque scrivere il seguente bilancio di massa per un singolo inquinante:

$$V \frac{dC}{dt} = -K_0 \cdot V + C_{in} \cdot Q - C \cdot Q \quad (22)$$

Dividendo per Q:

$$\frac{V}{Q} \frac{dC}{dt} = -K_0 \frac{V}{Q} + C_{in} - C \quad (23)$$

La quantità V/Q rappresenta il tempo di residenza idraulico (t_r), tempo necessario per riempire un serbatoio di volume V con una portata Q , quindi tempo medio di permanenza della singola particella fluida all'interno del reattore a flusso continuo. Riscrivendo l'espressione precedente:

$$t_r \frac{dC}{dt} = -K_0 t_r + C_{in} - C \quad (24)$$

E quindi:

$$\frac{dC}{C + K_0 t_r - C_{in}} = -\frac{dt}{t_r} \quad (25)$$

Per procedere all'integrazione, si può effettuare un cambio di variabile:

$$x = C + K_0 t_r - C_{in} \Rightarrow dx = dC \quad (26)$$

Conseguentemente, si ha:

$$\frac{dx}{x} = -\frac{dt}{t_r} \quad (27)$$

Integrando:

$$\int_{x_0}^x \frac{dx}{x} = -\frac{1}{t_r} \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{x}{x_0} = -\frac{t}{t_r} \Rightarrow x = x_0 \cdot e^{-t/t_r} \quad (28)$$

Sostituendo a x la (26) e considerando una concentrazione iniziale C_0 nel reattore/serbatoio:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-t/t_r} + (C_{in} - K_0 t_r) \cdot (1 - e^{-t/t_r}) \quad (29)$$

Per $t \rightarrow \infty$ si ha la concentrazione in condizioni di equilibrio:

$$C_E = C_{in} - K_0 t_r \quad (30)$$

Tali passaggi per un bioreattore valgono nell'ipotesi che la cinetica di degradazione dell'inquinante sia di ordine zero. Nel caso di interesse ai fini di questo lavoro tuttavia, come

già ribadito, non vi sono reazioni biologiche o chimiche significative e pertanto la costante K_0 è nulla. Dunque l'espressione (30) diventa:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-t/t_r} + C_{in} \cdot (1 - e^{-t/t_r}) \quad (31)$$

Quindi, conoscendo la portata entrante nel serbatoio, il volume del serbatoio, la concentrazione di inquinante in esso presente inizialmente e la concentrazione nel flusso in ingresso, è possibile calcolare tramite la (31) l'andamento della concentrazione uscente dal serbatoio.

Per verificare se questa formula sia effettivamente valida applicata a un serbatoio di una rete di acquedotto, si è preso ad esempio il caso del serbatoio "Petrazzi Basso" della rete di Mondello, ipotizzando che sia alimentato con acqua contaminata con una concentrazione costante pari a $C_{in} = 1 \mu\text{g/l}$. Si è proceduto quindi a calcolare con la formula precedente la concentrazione ora per ora nel serbatoio, ipotizzando una concentrazione iniziale C_0 nulla, e confrontando poi i risultati con la concentrazione automaticamente calcolata dal software.

E' importante sottolineare che la portata uscente in questo caso è costante nel tempo e uguale alla portata entrante nel serbatoio, condizione necessaria per poter mantenere costante il volume idrico nel serbatoio stesso. Il serbatoio in oggetto è cilindrico a base circolare e livello idrico rispetto al fondo in questo caso costante nel tempo. Si calcolano quindi il volume del serbatoio e il tempo di residenza idraulico a partire dai dati in Tabella 5.1.

Tabella 5.1 - Calcolo volume del serbatoio e tempo di residenza idraulico

$Q_{in} = Q_{out}$	0.0214	mc/s
C_{in}	1	$\mu\text{g/l}$ (mg/mc)
R	21.25	m
h	8	m
V	11349	mc
t_r	147.3131	h

Svolgendo i calcoli durante i primi 30 giorni dal momento in cui il serbatoio inizia a ricevere la portata inquinata, si ottiene la curva di saturazione: si noti dal grafico riportato in Figura 5.2 la perfetta corrispondenza tra i valori calcolati da Epanet e quelli derivati dall'utilizzo della formula (31).

Si noti anche che, com'era logico attendersi logico, la concentrazione di equilibrio per $t \rightarrow \infty$ è pari a $C_E = C_{in} = 1 \mu\text{g/l}$, cioè pari alla concentrazione entrante, dal momento che la costante di

reazione è nulla. Questo conferma come una volta terminato il transitorio l'effetto dei serbatoi diventi influente sulla propagazione della contaminazione all'interno della rete.

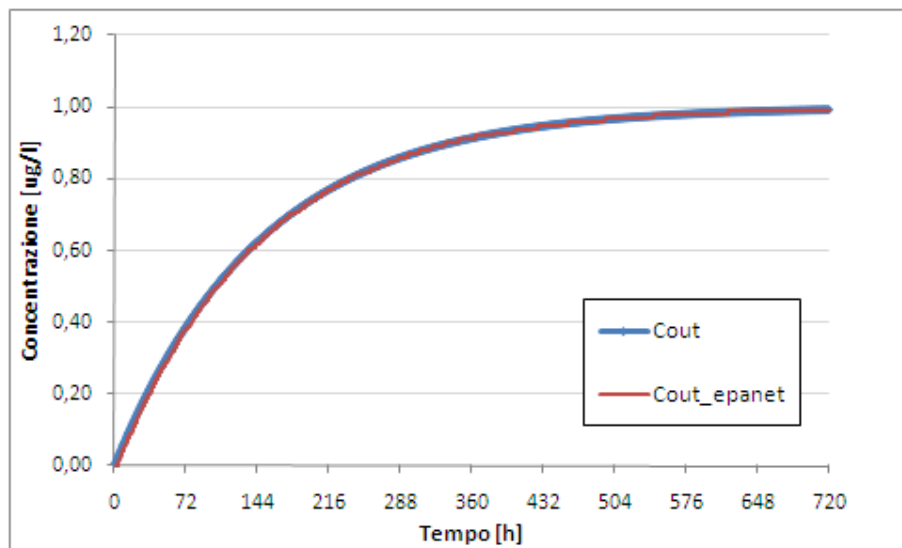


Figura 5.2 - Curva di saturazione per il serbatoio Petrazzi Basso ottenuta col il modello, confrontata con le concentrazioni calcolate da Epanet.

In Figura 5.3 si riportano due istantanee, tratte da Epanet, del tratto della rete palermitana interessato dalla contaminazione, rispettivamente all'inizio e a metà del mese di simulazione. Si notino le portate entranti e uscenti costanti nel tempo e il progressivo aumento della concentrazione di inquinante nel serbatoio, fino a raggiungere sostanzialmente la concentrazione C_{in} alla fine del mese di simulazione.

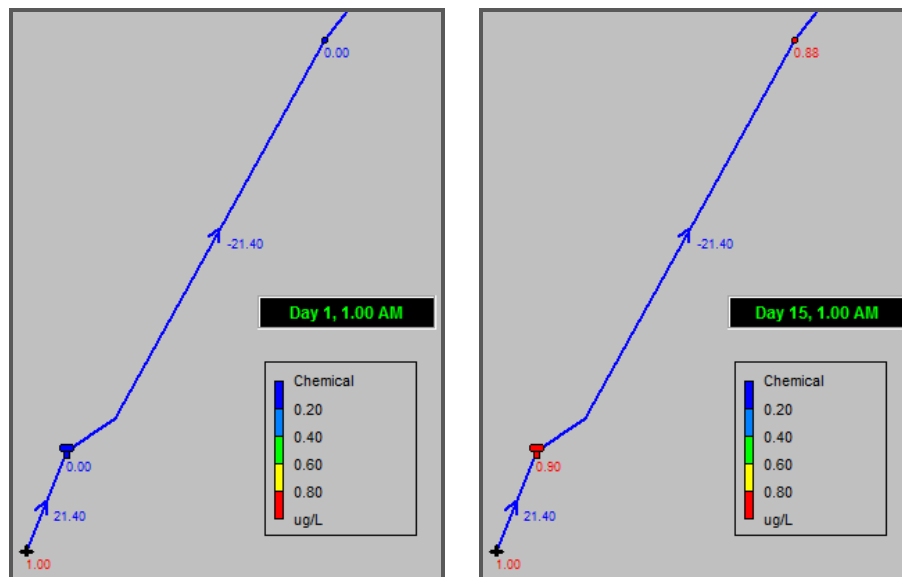


Figura 5.3 - Serbatoio Petrazzi Basso della rete di Mondello all'inizio (a sinistra) e a metà (a destra) del mese di simulazione.

Si è dunque provata la validità della similitudine, in termini di effetto di diluizione degli inquinanti, tra i serbatoi di una rete di acquedotto contaminata e un reattore completamente miscelato a flusso continuo, in cui si suppongano nulle le reazioni biochimiche, nel caso in cui si ipotizzi costante nel tempo il volume idrico contenuto nel serbatoio.

Serbatoio a volume variabile

Successivamente si è provato ad estendere il medesimo modello ad un caso più complesso, ma che in sostanza corrisponde alle reali caratteristiche dei serbatoi nelle reti di acquedotto, ovvero con volume V non costante nel tempo. Ciò avviene se, diversamente da quanto ipotizzato nel caso precedente, la portata uscente dal serbatoio è diversa da quella entrante, essendo entrambe variabili nel tempo; questa è una situazione più realistica, dal momento che la principale funzione dei serbatoi è proprio quella di compenso, a causa della variabilità temporale nel regime delle portate.

In questo caso è necessario discretizzare il calcolo, operando su intervalli temporali della durata ad esempio di un minuto, ed applicando ad ogni intervallo la formula del caso precedente modificando l'espressione del volume idrico nel serbatoio, che cambia continuamente nel tempo. In particolare, data la concentrazione in ingresso costante, pari ad esempio a $C_{in} = 1 \mu\text{g/l}$, i passaggi necessari sono i seguenti.

Calcolo del volume $V_{0,i}$ inizialmente contenuto nel serbatoio, dato il suo diametro (per serbatoio cilindrico) e il livello iniziale. Poi, per ogni intervallo di tempo, occorre: estrarre da Epanet la portata entrante Q_e e uscente dal serbatoio Q_u ; calcolo del volume invasato nel serbatoio alla fine dell'intervallo $V_{f,i}$, tramite la (32); calcolo del volume idrico medio $V_{m,i}$ contenuto nel serbatoio in tale intervallo, tramite la (33); infine calcolo della concentrazione $C_{out,i}$ in uscita dal serbatoio (pari a quella contenuta nel serbatoio nell'ipotesi di miscelazione completa) alla fine dell'intervallo i con la (34):

$$V_{f,i} = V_{0,i} + (Q_{e,i} - Q_{u,i})\Delta t \quad (32)$$

$$V_{m,i} = \frac{V_{0,i} + V_{f,i}}{2} \quad (33)$$

$$C_{out,i} = C_{out,i-1} \cdot e^{-Q_{e,i} \cdot \Delta t / V_{m,i}} + C_{in} (1 - e^{-Q_{e,i} \cdot \Delta t / V_{m,i}}) \quad (34)$$

dove $C_{out,i-1}$ è la concentrazione in uscita dal serbatoio alla fine dell'intervallo precedente.

La differenza fondamentale rispetto al caso a volume costante, oltre all'espressione stessa del volume, è costituita dal fatto che ad ogni intervallo è necessario considerare la concentrazione

già presente nel serbatoio; anche nel caso in cui si supponga l'acqua nel serbatoio inizialmente pulita, a partire dal secondo intervallo di tempo è necessario utilizzare nella formula la concentrazione alla fine del primo intervallo e così via.

Per verificare la validità di questa seconda versione del modello, si è utilizzata la rete di Colline Comasche, e in particolare il serbatoio della centrale Fontanino (P8). Il serbatoio in oggetto è cilindrico, ha diametro pari a 8.5 metri e altezza idrica disponibile di 3.5 metri.

Una precisazione importante riguarda la concentrazione in ingresso C_{in} : in questo caso vi sono due pozzi, e quindi due pompe che immettono portata nel serbatoio (P8), la pompa 10 e la pompa 13, come si vede chiaramente in Figura 5.4.

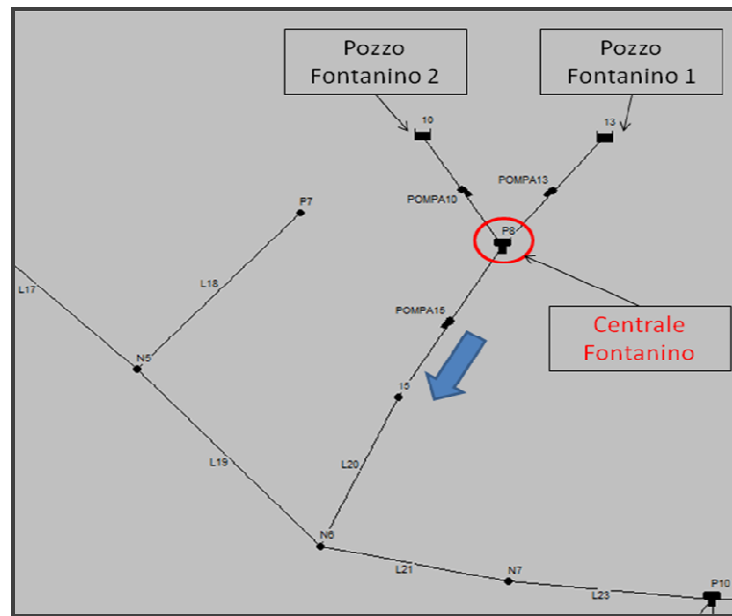


Figura 5.4 - Parte della rete di Colline Comasche comprendente i pozzi Fontanino 1 e 2 e la centrale Fontanino

Ovviamente le concentrazioni $C_{in,13}$ e $C_{in,10}$ dei due flussi in ingresso saranno in genere differenti, così come le portate $Q_{in,13}$ e $Q_{in,10}$ caratterizzanti ogni intervallo di calcolo. Tuttavia la formula (34) richiede in input un solo valore di concentrazione e di portata in ingresso. Per quanto riguarda la portata, si farà semplicemente la somma delle due portate entranti, mentre il calcolo della concentrazione entrante risultante richiede di svolgere una media pesata fra le due concentrazioni in ingresso:

$$Q_{in} = Q_{in,13} + Q_{in,10} \quad (35)$$

$$C_{in} = \frac{C_{in,13} Q_{in,13} + C_{in,10} Q_{in,10}}{Q_{in}} \quad (36)$$

In effetti, volendo qui verificare l'accuratezza del modello di stima a prescindere dalle caratteristiche specifiche della contaminazione, si è posta una concentrazione in ingresso pari a 1 µg/l in entrambi i pozzi. Si inizia calcolando il volume idrico iniziale nel serbatoio (Tabella 5.2), quindi, si applica il metodo precedentemente descritto per trovare l'andamento delle concentrazioni in uscita dal serbatoio nel tempo.

Tabella 5.2 - Calcolo del volume iniziale del serbatoio

C_{in} (COSTANTE)	1	ug/l
R	4.25	m
h	3.5	m
V₀	199	mc

In questo secondo caso, il serbatoio si inquina molto più rapidamente rispetto al caso precedente, ad esempio dopo 1 ora la concentrazione è già pari a 0.63 µg/l; quindi per arrivare a una situazione di equilibrio, sempre caratterizzata dal raggiungimento di un valore di concentrazione nel serbatoio pari a quella delle portate immesse, ossia 1 µg/l, sono sufficienti 6 ore. Si riporta in Figura 5.5 un confronto in forma grafica tra l'andamento temporale di concentrazione derivato dall'applicazione del modello e quello calcolato da Epanet. Anche in questo caso, con volume idrico nel serbatoio variabile nel tempo, il modello basato sul bioreattore CSTR interpreta bene l'accumulo di inquinante nel serbatoio, fornendo risultati praticamente coincidenti con quelli calcolati dal software, salvo una leggera divergenza nelle prime ore del calcolo, che può ritenersi trascurabile.

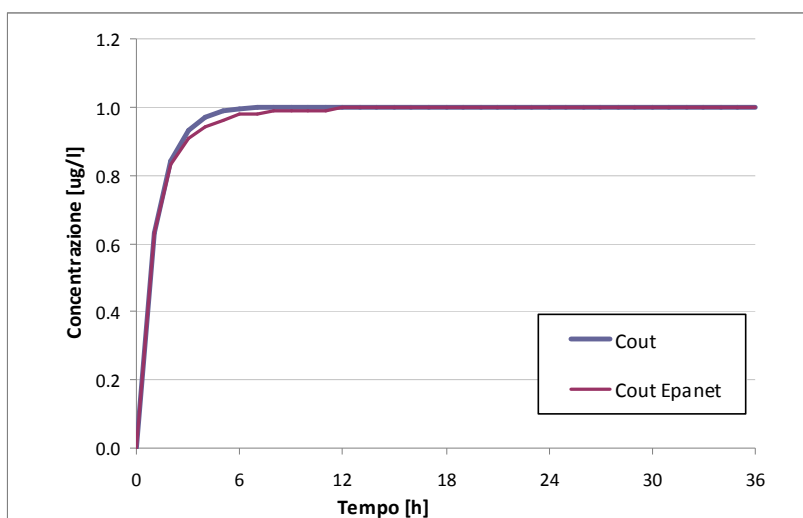


Figura 5.5 - Andamento della concentrazione di inquinante nella centrale Fontanino calcolata tramite il modello e il software Epanet

Dunque, viste le due verifiche effettuate, si può affermare la validità della similitudine, in termini di effetto di diluizione degli inquinanti, tra i serbatoi di una rete di acquedotto contaminata e i reattori completamente miscelati a funzionamento continuo, in cui si suppongano trascurabili le reazioni biochimiche. Tale similitudine è applicabile sia nel caso in cui si ipotizzi costante nel tempo il volume idrico contenuto nei serbatoi, sia nel caso in cui esso vari nel tempo a causa di un diverso andamento delle portate entranti e uscenti.

Pertanto è possibile effettuare un'analisi preliminare, tramite questa schematizzazione, su ognuno dei serbatoi di una rete generica, conoscendo le dimensioni del serbatoio stesso, le portate e le concentrazioni di inquinanti nell'acqua immessa in rete. Quest'analisi fornisce l'andamento delle concentrazioni in uscita dai serbatoi, che possono essere utilizzate come input nella (16).

Infine occorre segnalare che in un primo tempo le concentrazioni calcolate con la formula divergevano in maniera significativa dai risultati di Epanet; il problema è stato risolto riducendo l'intervallo di calcolo del software. Infatti, in alcune applicazioni, la risoluzione di calcolo che il programma utilizza in automatico si rivela insufficiente, pertanto è necessario aumentare tale risoluzione modificando le impostazioni del software. In tutte le simulazioni si è perciò utilizzato un intervallo di tempo pari a 1 minuto, ovvero il minimo possibile, per aumentare al massimo la precisione dei calcoli, a costo ovviamente di una maggiore lentezza operativa del software.

5.4 Applicazione del modello teorico alla rete di Colline Comasche

Dopo aver sviluppato il modello di stima delle concentrazioni di inquinante ai nodi, descritto nei paragrafi da 5.1 a 5.3, il passo successivo è stato verificarne l'efficacia applicandolo ad alcune reti di acquedotto. In particolare si è considerata la rete sovracomunale di Colline Comasche, e in particolare si è fatto riferimento ai principali casi storici di inquinamento già ampiamente analizzati nel capitolo 4.

In tutte le applicazioni successive l'intervallo di calcolo utilizzato in Epanet è pari a 1 minuto.

5.4.1 Inquinamento da NH_4 nei pozzi Fontanino

Il primo caso di inquinamento considerato è quello da ione ammonio nei pozzi Fontanino 1 e 2, supponendo tutti gli altri pozzi della rete privi di contaminazione.

Si ricorda che le massime concentrazioni storiche rilevate in tali pozzi risalgono al 12 settembre 2007 e sono pari a 0.7 mg/l nel pozzo Fontanino 1 (ID 13) e a 1.2 mg/l nel pozzo Fontanino 2 (ID

10). Si riporta in Figura 5.6 la situazione iniziale di inquinamento considerata. Le pompe 10 e 13 sollevano acqua rispettivamente dai pozzi Fontanino 2 e Fontanino 1 alla centrale, mentre la pompa 15 preleva acqua dal serbatoio e la immette in rete.

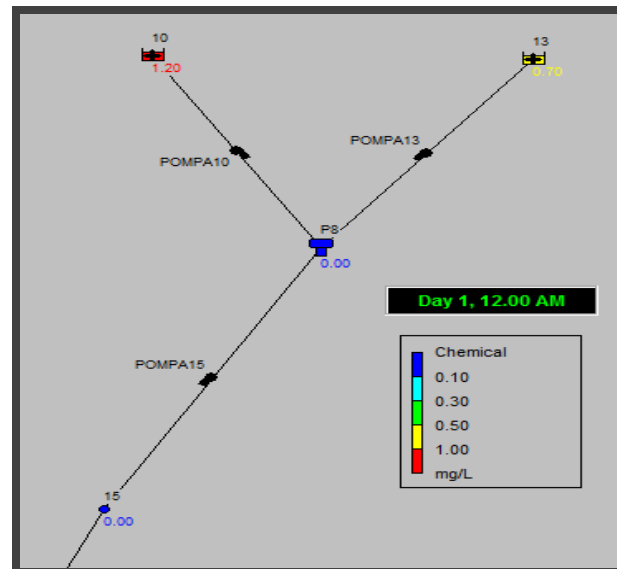


Figura 5.6 - Inquinamento da NH_4 nei pozzi Fontanino, a inizio contaminazione

Il primo passo è calcolare le concentrazioni in uscita dal serbatoio della centrale Fontanino, tenendo in conto dell'effetto di diluizione iniziale operato dal volume idrico a disposizione, che all'istante $t=0$ si assume privo di contaminazione. A questo scopo si applica il procedimento descritto nel paragrafo 5.2; in particolare il secondo esempio considerato nel suddetto paragrafo è analogo al caso in oggetto, salvo il fatto che le concentrazioni in ingresso qui sono pari alle massime storiche e non a 1 mg/l. I risultati vengono confrontati con le concentrazioni calcolate da Epanet nel grafico seguente, al fine di verificarne l'accuratezza.

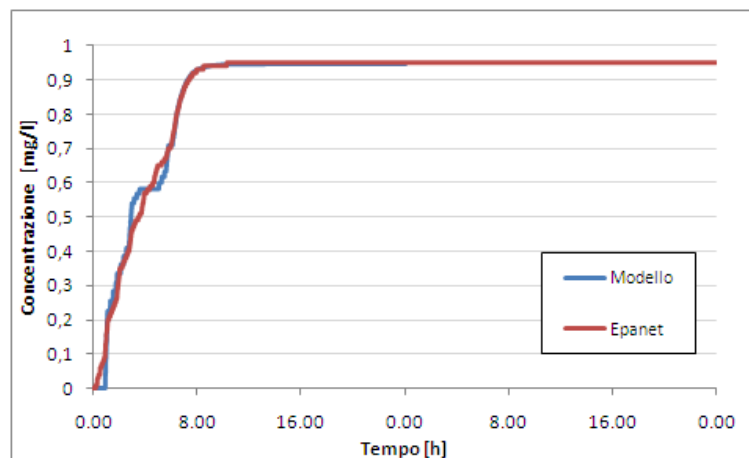


Figura 5.7 - Concentrazione in uscita dalla centrale Fontanino calcolata con il modello e tramite il software

Le concentrazioni trovate costituiscono l'input per il modello di stima, o in altre parole le c_j della formula (16). In Figura 5.8 è possibile visualizzare il tratto di rete su cui è stato applicato il modello. Non si sono considerati tutti i nodi della rete sovracomunale, bensì solo quelli raggiunti dal flusso proveniente dai pozzi Fontanino; questo perché, avendo ipotizzato che il serbatoio della centrale Fontanino sia l'unico ad essere inquinato, non avrebbe senso applicare il modello su tratti di rete in cui già a priori possiamo dire che le concentrazioni saranno nulle. Si è dunque utilizzato il procedimento descritto nel paragrafo 5.1 per i nodi N6, N5, P7, C5, N4, P6, E1, N3, P5, N2 e C4, tenendo conto ovviamente anche dei vari tempi di traslazione all'interno delle condotte; nei grafici seguenti si riportano le concentrazioni risultanti dall'applicazione del modello, confrontate con quelle calcolate da Epanet in automatico. I risultati sono riferiti alle prime 48 ore di simulazione dall'inizio della contaminazione.

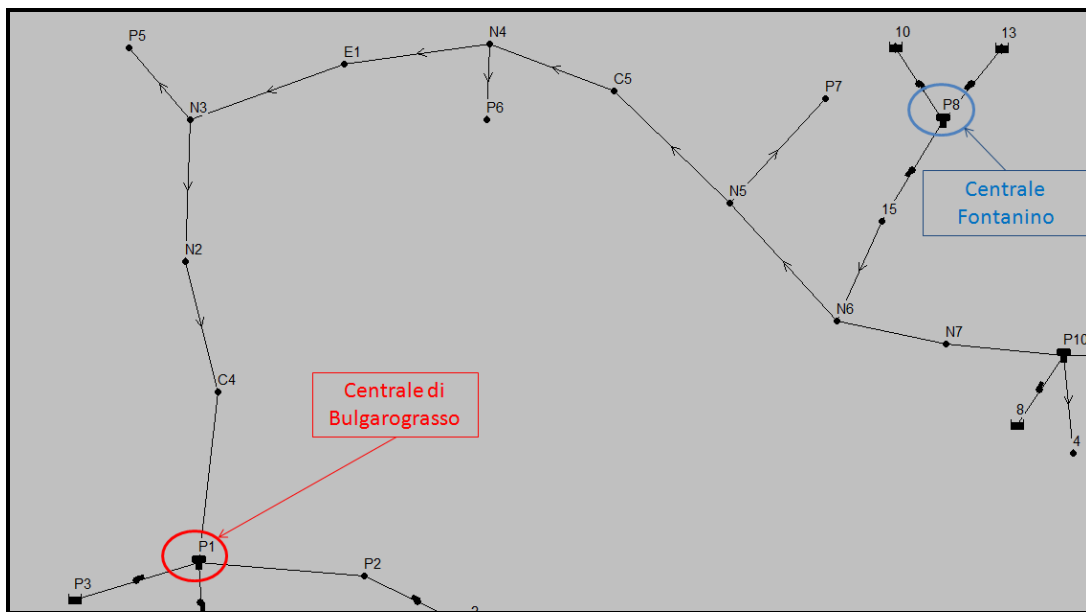


Figura 5.8 - Nodi oggetto di applicazione del modello per questo caso di inquinamento

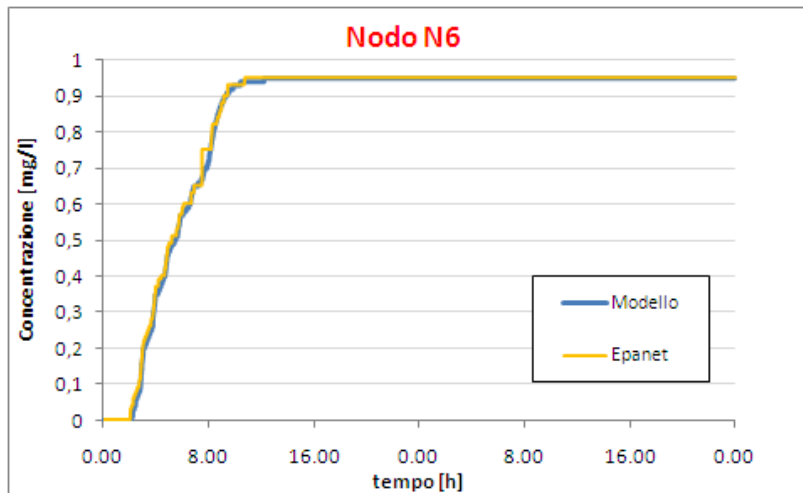


Figura 5.9 - Concentrazione nel nodo N6 calcolata con il modello e tramite il software

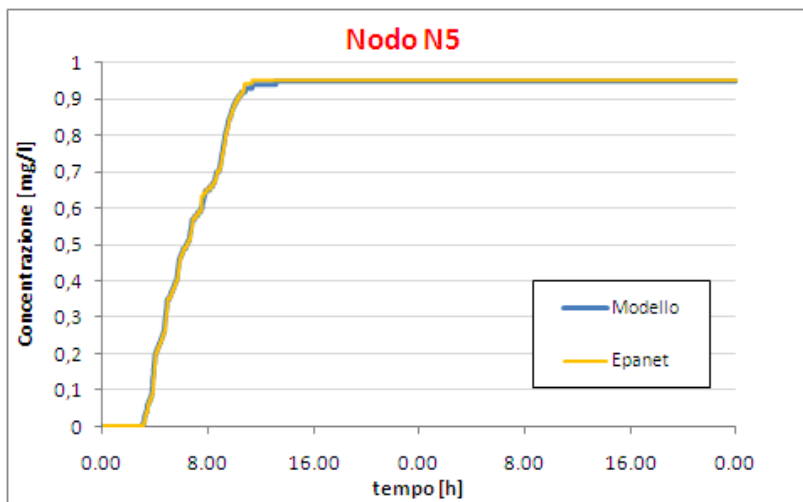


Figura 5.10 - Concentrazione nel nodo N5 calcolata con il modello e tramite il software

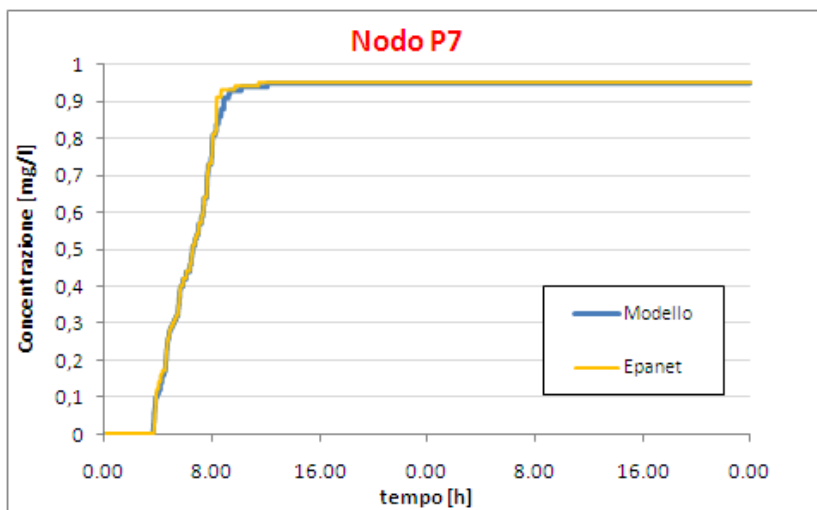


Figura 5.11 - Concentrazione nel nodo P7 calcolata con il modello e tramite il software

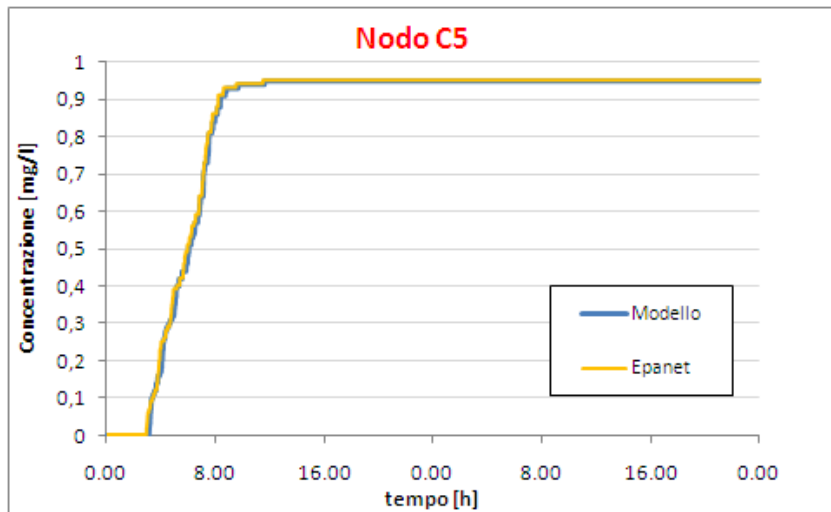


Figura 5.12 - Concentrazione nel nodo C5 calcolata con il modello e tramite il software

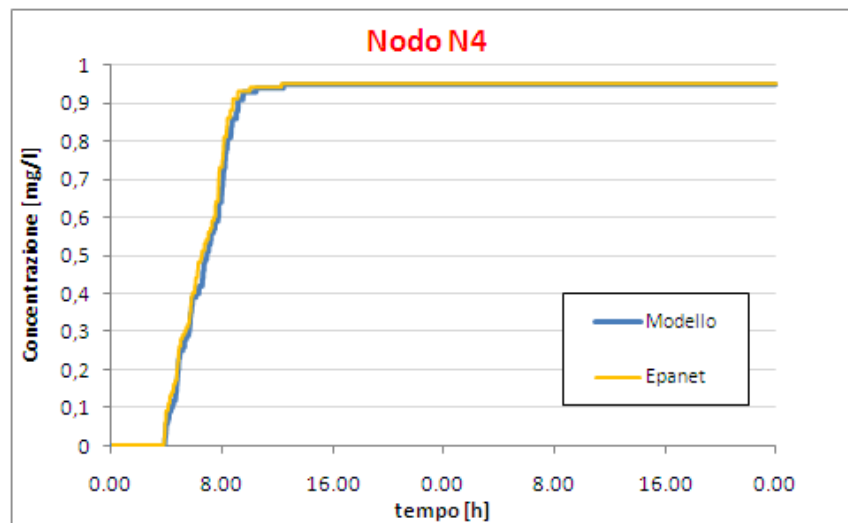


Figura 5.13 - Concentrazione nel nodo N4 calcolata con il modello e tramite il software

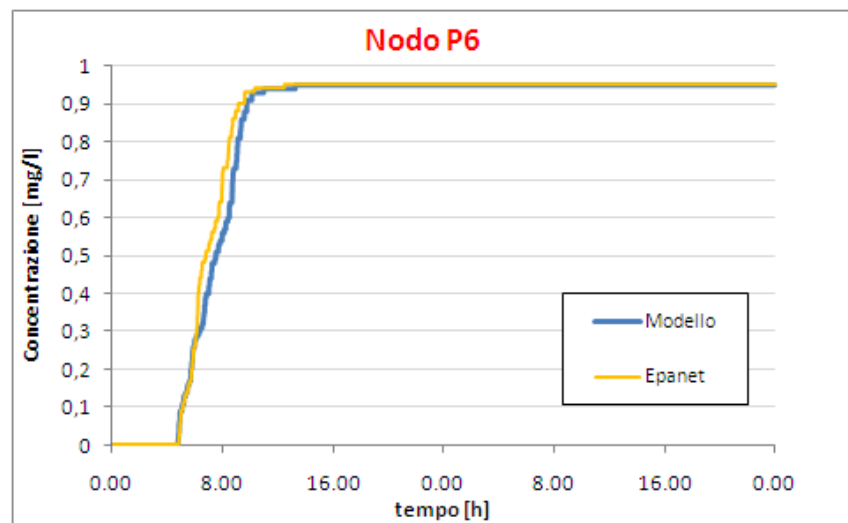


Figura 5.14 - Concentrazione nel nodo P6 calcolata con il modello e tramite il software

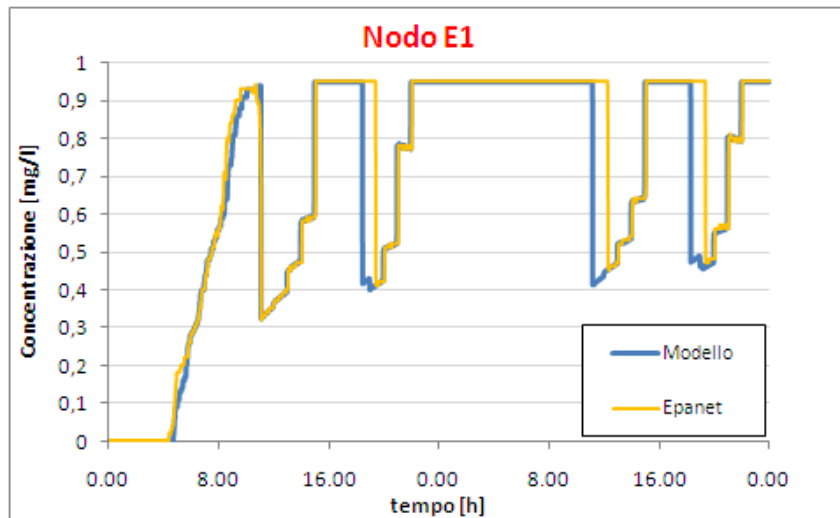


Figura 5.15 - Concentrazione nel nodo E1 calcolata con il modello e tramite il software

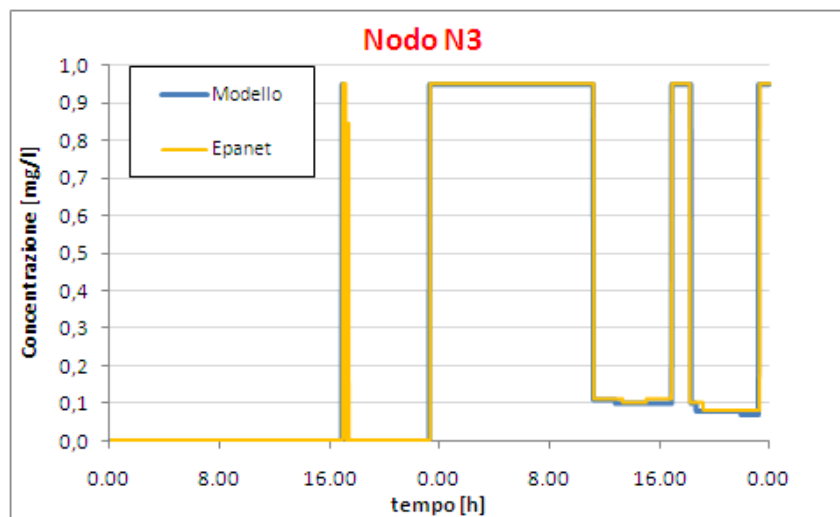


Figura 5.16 - Concentrazione nel nodo N3 calcolata con il modello e tramite il software

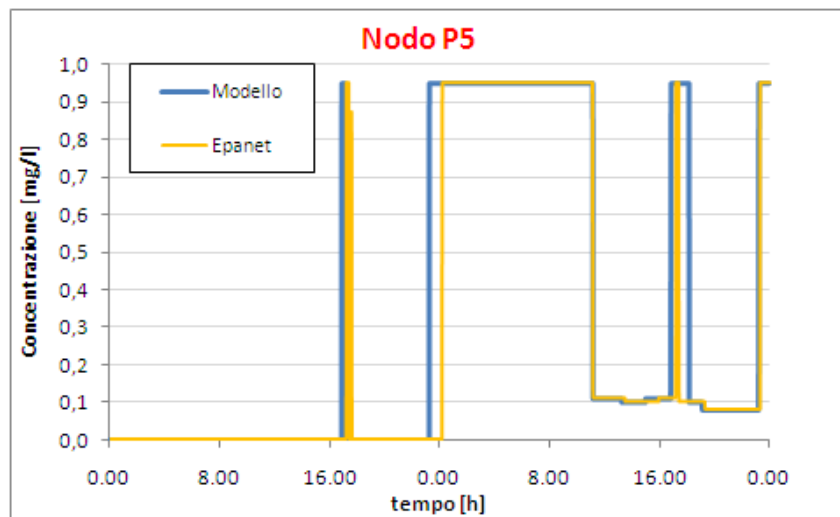


Figura 5.17 - Concentrazione nel nodo P5 calcolata con il modello e tramite il software

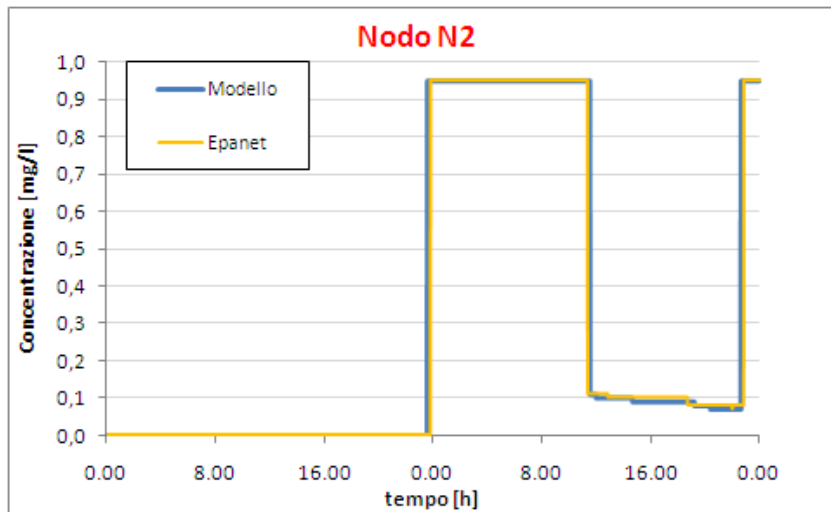


Figura 5.18 - Concentrazione nel nodo N2 calcolata con il modello e tramite il software

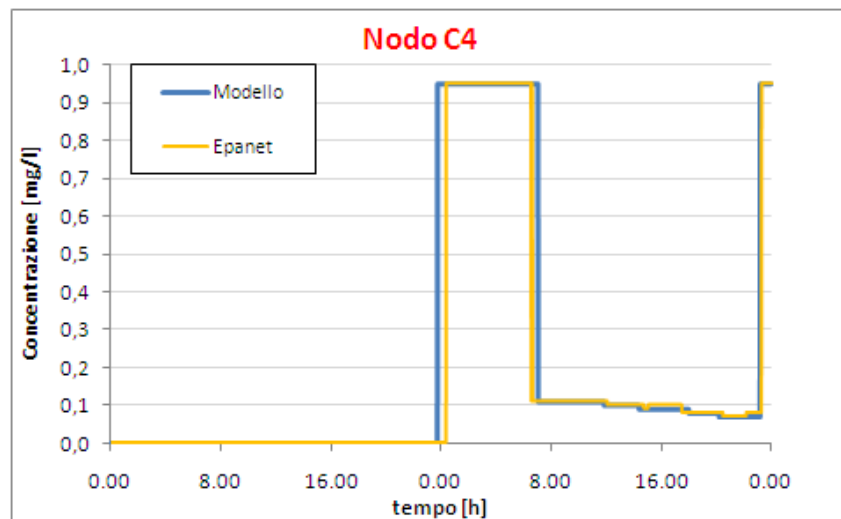


Figura 5.19 - Concentrazione nel nodo C4 calcolata con il modello e tramite il software

I risultati sono ampiamente soddisfacenti, in quanto le differenze tra i valori stimati dal modello e quelli calcolati dal software sono modeste e per molti nodi quasi nulle. Maggiori differenze, per quanto sempre di scarsa entità, si rilevano per i nodi E1, C4 e P5; per gli ultimi due nodi la spiegazione di questa relativa minore affidabilità del modello sta nella loro notevole distanza dai punti di immissione del flusso contaminato, ovvero i pozzi Fontanino: infatti per quanto sia preciso, evidentemente il modello commette qualche lieve imprecisione di calcolo, che tende ad amplificarsi quanto maggiore è la distanza tra immissione e nodo di erogazione.

Per quanto riguarda il nodo E1, la stima è resa più complessa dal fatto che, come già descritto nel capitolo 4, tale nodo rappresenta in molte ore il “confine” tra il flusso pulito proveniente dalla centrale di Bulgarograsso e quello contaminato proveniente dalla centrale Fontanino. In altre ore invece il flusso contaminato oltrepassa il nodo stesso giungendo fino alla centrale di

Bulgarograsso. Si ritiene che i frequenti cambi di direzione del flusso transitante per tale nodo contribuiscano ad aumentare le imprecisioni; ad ogni modo, il modello interpreta molto bene l'entità dei picchi minimi e massimi di concentrazione, registrandoli però con un anticipo di qualche minuto rispetto al software. In ogni caso si tratta di imprecisioni minime che non compromettono il buon funzionamento del modello applicato a questo caso di inquinamento.

A prescindere dalla verifica del modello di stima, è interessante notare il differente andamento delle concentrazioni nei nodi compresi tra la centrale Fontanino e il nodo E1 (cioè N6, N5, P7, C5, N4 e P6) rispetto agli altri. Nei suddetti nodi, infatti, il flusso proviene costantemente e unicamente dai pozzi Fontanino contaminati; di conseguenza, la concentrazione aumenta nel tempo fino a raggiungere il valore della concentrazione media in ingresso, cioè 0.95 mg/l. Una volta che la rete raggiunge una situazione di regime, la concentrazione si mantiene costante su tale valore. Invece, nel tratto di rete tra il nodo E1 e la centrale di Bulgarograsso il flusso si inverte a seconda dell'ora della giornata, quindi la portata in arrivo ai corrispondenti nodi è contaminata in alcune ore e pulita in altre; di conseguenza, i nodi E1, N3, P5, N2 e C4 sono soggetti a rilevanti oscillazioni giornaliere di concentrazione.

5.4.2 Inquinamento da NO_3 nel pozzo Navedano 1

Si è quindi considerato il caso in cui il pozzo Navedano 1 sia inquinato da nitrati, presenti nella massima concentrazione storica, pari a 68 mg/l e registrata il 4 agosto 2003. Si ipotizza che non vi sia contaminazione nel pozzo Navedano 2, così come in tutti gli altri pozzi della rete.

Si riporta in Figura 5.20 la situazione iniziale di inquinamento considerata. Le pompe 11 e 12 sollevano acqua dai pozzi Navedano 1 (ID P11) e Navedano 2 (ID 12) alla centrale Navedano (ID CLE1). La rete, a sua volta, riceve portata dalla centrale a mezzo delle pompe 7 e 9.

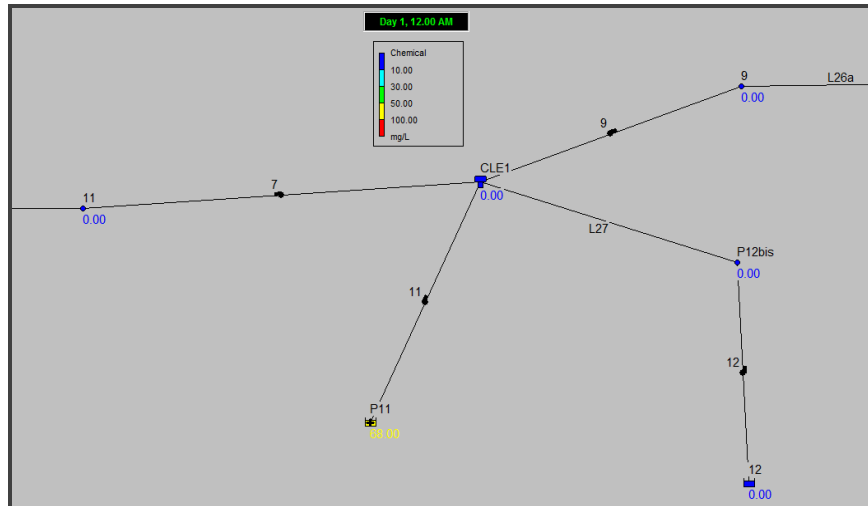


Figura 5.20 - Inquinamento da NO₃ nel pozzo Navedano 1, a inizio contaminazione

Anche in questo caso, il passo preliminare all'applicazione del modello vero e proprio è costituito dal calcolo delle concentrazioni in uscita dal serbatoio, ovvero dell'andamento temporale delle concentrazioni nei flussi sollevati dalle pompe 7 e 9. La concentrazione iniziale in CLE1 è assunta pari a 0, poiché si sta considerando l'inizio del fenomeno di inquinamento. Tramite il medesimo procedimento, basato sulla similitudine tra i serbatoi e i reattori CSTR con alimentazione continua, si ottengono i risultati seguenti:

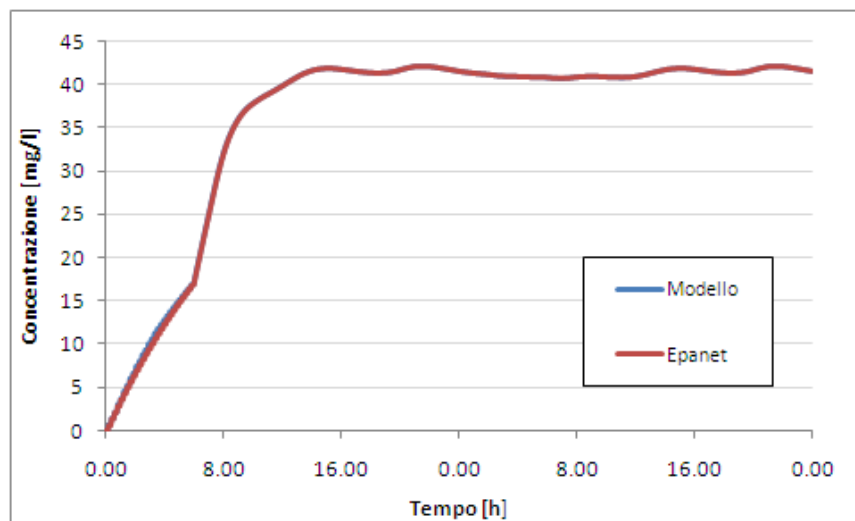


Figura 5.21 - Concentrazione in uscita dalla centrale Navedano calcolata con il modello e tramite il software

Come si vede dal grafico, la verifica dell'accuratezza del modello tramite il confronto con le concentrazioni calcolate da Epanet da risultati estremamente positivi, con una perfetta coincidenza tra gli output dei due metodi.

Le concentrazioni trovate costituiscono l'input per il modello di stima, cioè le c_j della formula (16). Analogamente al caso precedente, si è applicato il modello solo ai nodi raggiunti dal flusso proveniente dalla centrale Navedano, in quanto per le ipotesi fatte tutti i restanti nodi non sono raggiunti da contaminazione. I nodi oggetto di studio sono quelli di Figura 5.22.

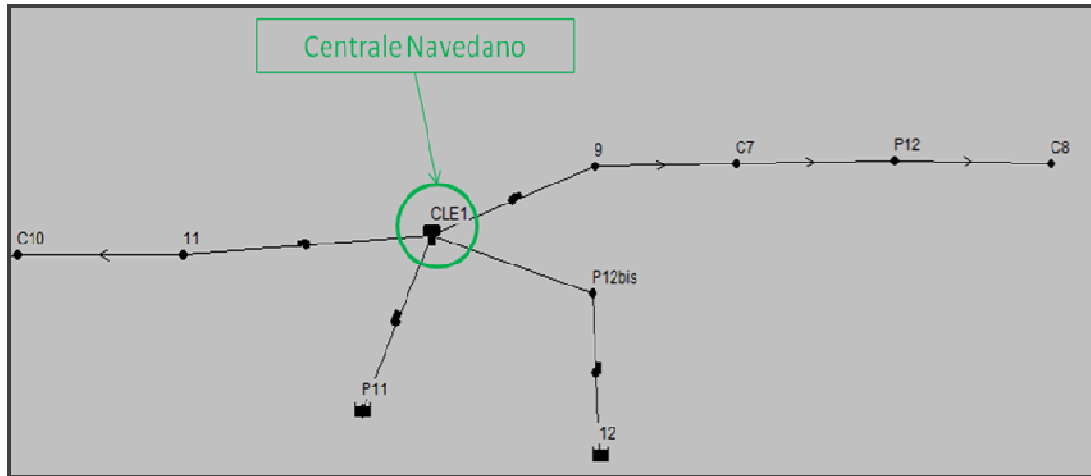


Figura 5.22 - Oggetto di applicazione del modello per questo caso di inquinamento

Si è quindi applicato il modello ai nodi C10, C7, P12 e C8. I risultati, con i rispettivi andamenti calcolati da Epanet, sono riportati di seguito.

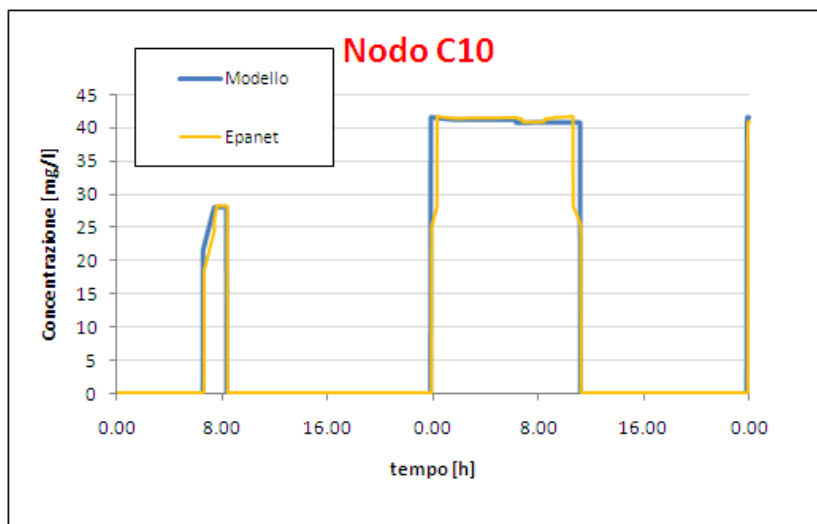


Figura 5.23 - Concentrazione nel nodo C10 calcolata con il modello e tramite il software

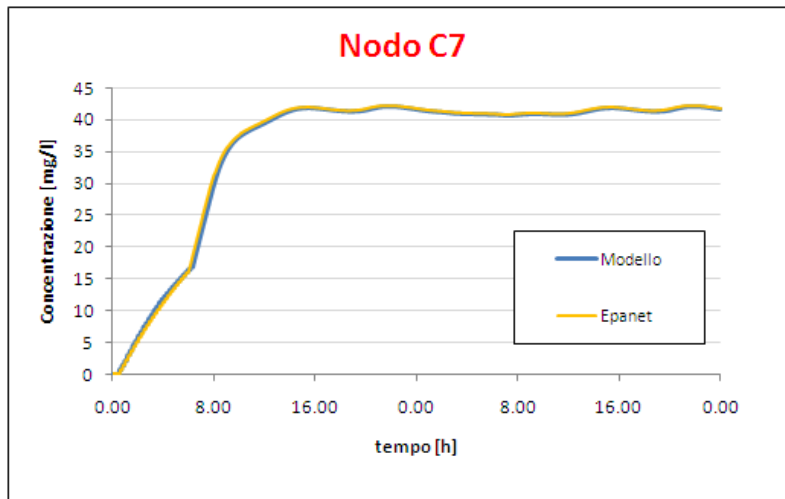


Figura 5.24 - Concentrazione nel nodo C7 calcolata con il modello e tramite il software

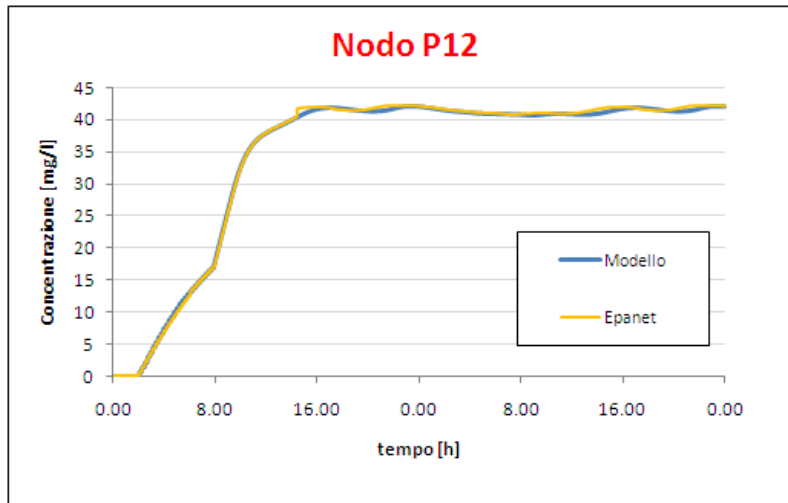


Figura 5.25 - Concentrazione nel nodo P12 calcolata con il modello e tramite il software

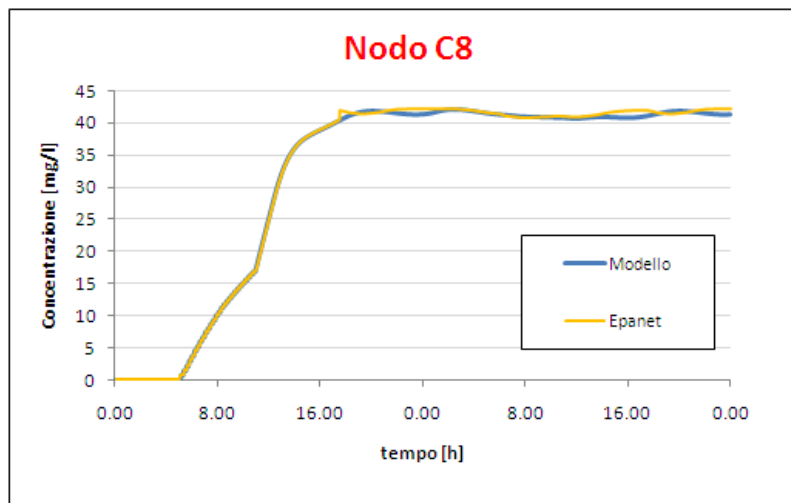


Figura 5.26 - Concentrazione nel nodo C8 calcolata con il modello e tramite il software

I risultati sono molto buoni, migliori anche rispetto al caso di inquinamento dei pozzi Fontanino. D'altra parte la contaminazione considerata in questo caso interessa una porzione ristretta della rete, le distanze in gioco sono minori rispetto al caso precedente, e quindi vi è un minor accumulo di errori procedendo dal pozzo verso i nodi di erogazione. I nodi C7, P12 e C8, alimentati unicamente dalla centrale Navedano, vedono crescere costantemente nel tempo la concentrazione, che si stabilizza poi intorno al valore di regime di 42 mg/l; invece il nodo C10 riceve anche un flusso privo di contaminazione proveniente dal resto della rete, che converge con il flusso contaminato proprio in tale nodo, determinando oscillazioni importanti di concentrazione a livello giornaliero.

5.4.3 Inquinamento da solventi nei pozzi di via Patrioti e Baragiola

Per completare i casi di inquinamento relativi alla rete di Colline Comasche, l'intenzione era quella di affrontare il caso di inquinamento da tricloroetilene e tetracloroetilene nei pozzi Baragiola e di via Patrioti, applicandovi il modello sviluppato.

Ci si è tuttavia scontrati con una difficoltà legata alla natura del serbatoio della centrale di Bulgarograsso. Trattasi infatti di un serbatoio mantenuto in pressione intorno a 4 bar, per poter alimentare le camerette di consegna in direzione dell'erogazione di Bulgarograsso C4.

Al momento di rappresentare in Epanet tale serbatoio, ci si è trovati di fronte a due esigenze contrapposte: dal punto di vista idraulico, vi era la necessità di rappresentare in qualche modo il carico a cui era mantenuto il serbatoio; dal punto di vista della qualità, tuttavia, si doveva introdurre in input il volume idrico realmente a disposizione per la diluizione degli inquinanti.

Per soddisfare le esigenze idrauliche, e quindi avere portate e pressioni in rete corrispondenti alla realtà, si sono aggiunti circa 40 m di colonna d'acqua ai livelli minimi e massimi del serbatoio (pari a 0.2 e 2.8 m); tuttavia tale soluzione mette a disposizione per la diluizione degli inquinanti un volume molto maggiore di quello reale, compromettendo inevitabilmente l'attendibilità dei risultati relativi alla propagazione degli inquinanti nel transitorio iniziale.

Perciò si è deciso di non considerare questo caso di inquinamento negli esempi di applicazione del modello di stima, non potendo verificare la validità dei risultati del software in tale caso. Tuttavia, relativamente alle simulazioni di cui al capitolo 4, l'attendibilità dei risultati non è compromessa, in quanto si è fatto riferimento al trentesimo giorno dall'inizio dell'inquinamento, quando la rete è ormai a regime e l'effetto di diluizione degli inquinanti nei serbatoi è nullo.

5.5 Applicazione del modello a schemi base di reti a maglie chiuse

Dopo aver verificato il buon funzionamento del modello applicato alla rete a maglie aperte di Colline Comasche, si è voluto effettuare ulteriori prove su alcune reti a maglie chiuse, caratterizzate da geometria e caratteristiche idrauliche relativamente semplici. Trattasi di reti non realmente esistenti, ma create proprio allo scopo di verificare l'efficacia del modello anche su reti che non siano a maglie aperte. Su tali reti si sono effettuate simulazioni della durata di una settimana dall'inizio dell'inquinamento.

5.5.1 Primo schema di rete a maglie chiuse

Lo schema della prima rete utilizzata, denominata "rete 1", è rappresentato in Figura 5.27.

Lo schema geometrico è in effetti molto semplice, trattandosi di una rete di forma quadrata con un ramo ulteriore a fare da diagonale, due immissioni (ID 1 e 4) e due erogazioni (ID 7 e 8); sono presenti due serbatoi di compenso lungo i rami d'immissione.

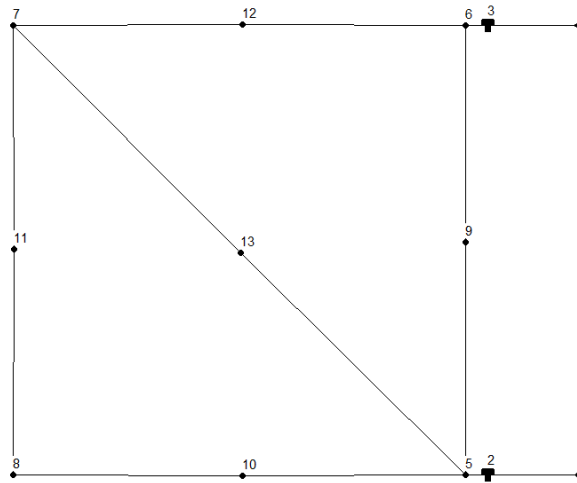


Figura 5.27 - Schema della rete 1 con ID dei nodi.

Da Figura 5.28 a Figura 5.30 si riportano i principali dati di tale rete, in termini di lunghezza dei rami, quote dei nodi ed entità delle portate medie entranti e uscenti. Nello schema di Figura 5.30 le portate positive sono in uscita dalla rete, mentre quelle negative entrano in rete. Tali portate sono state calcolate assumendo che le utenze da servire con tale rete siano pari a 1000 abitanti per ognuna delle due erogazioni (ID 7 e 8); supponendo una dotazione idrica di 250 l/ab/giorno, si ottiene una portata media in ingresso in rete di 5.78 l/s. Si è ripartita in due parti uguali sia la portata entrante, nelle immissioni 1 e 4, che la portata uscente, nelle erogazioni 7 e 8, ottenendo 2.89 l/s in ogni nodo. Tuttavia si è differenziato l'andamento giornaliero per le

erogazioni e le immissioni, essendo il pattern variabile nelle prime e costante nelle seconde, come rappresentato in Figura 5.31 e Figura 5.32.

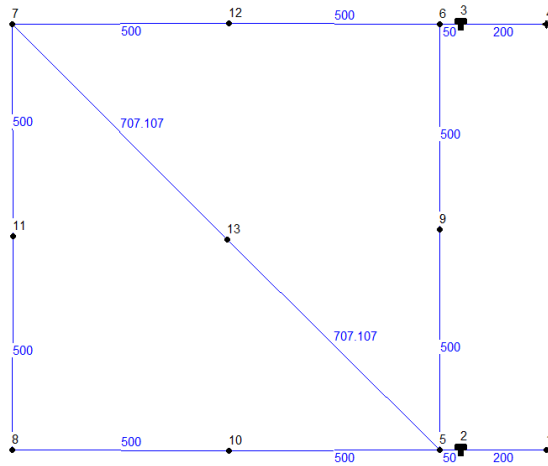


Figura 5.28 - Lunghezza delle tubazioni della rete 1 [m]

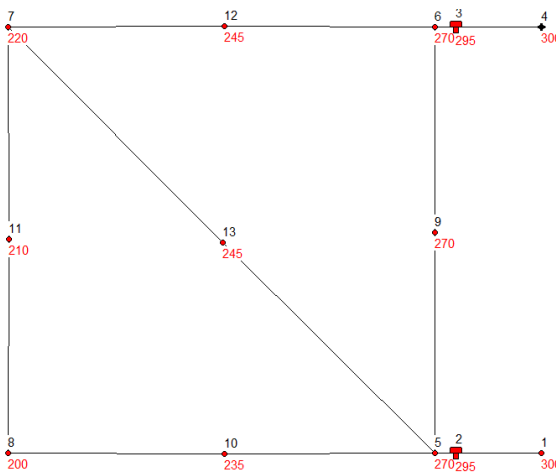


Figura 5.29 - Quote dei nodi della rete 1 [m s.l.m.]

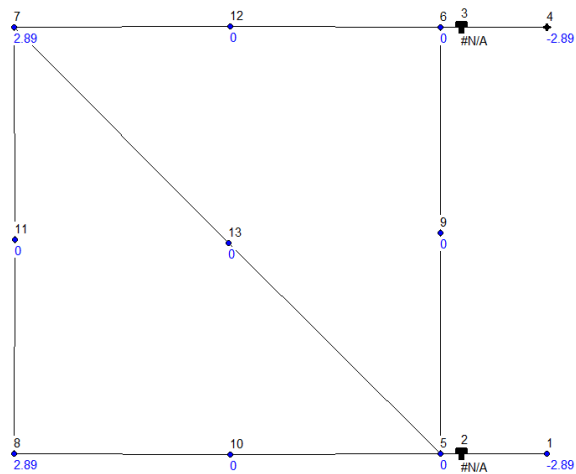


Figura 5.30 - Portate medie in ingresso e in uscita della rete 1 [l/s]

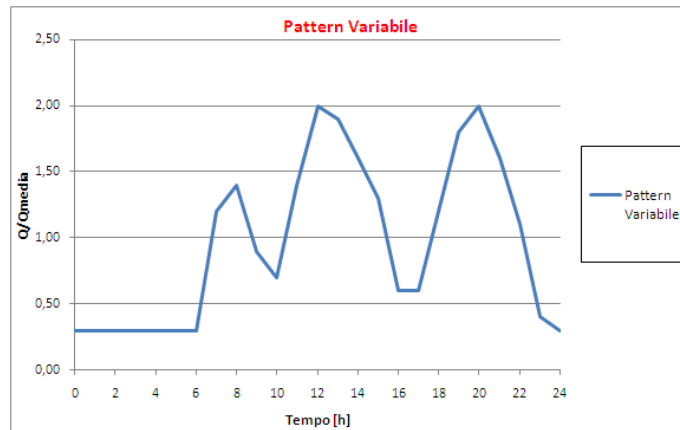


Figura 5.31 - Pattern variabile nelle erogazioni 7 e 8

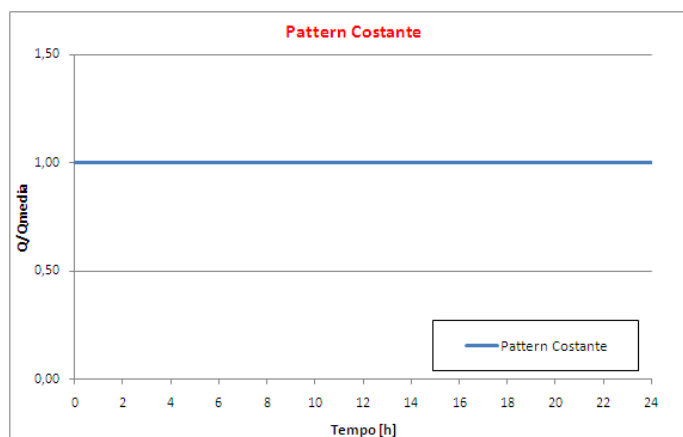


Figura 5.32 - Pattern costante nelle erogazioni 1 e 4

Per quanto riguarda i due serbatoi, si assume che essi abbiano le medesime caratteristiche riportate in Tabella 5.3. Ai fini di una più immediata interpretazione dei risultati, si è assegnata una concentrazione di inquinante di 1 mg/l ad un'immissione e una concentrazione nulla all'altra; si è ipotizzata inquinata l'immissione 4.

Tabella 5.3 - Caratteristiche dei serbatoi 2 e 3 della rete 1

Forma	cilindrica
Livello iniziale	4 m
Livello minimo	0.5 m
Livello massimo	8 m
Diametro	10 m

Una volta implementata tale rete in Epanet e verificato il suo funzionamento dal punto di vista idraulico, si è applicato il modello sviluppato nei precedenti paragrafi per stimare le concentrazioni nei nodi. Inizialmente si sono calcolate le concentrazioni in uscita dal serbatoio contaminato 3, confrontando i risultati con quelli offerti in output dal software (Figura 5.33).

Successivamente si è calcolata la concentrazione nei nodi durante la settimana di simulazione attraverso il modello di stima, confrontando per ogni nodo i valori trovati con quelli calcolati automaticamente da Epanet. Si riportano i risultati nei grafici da .

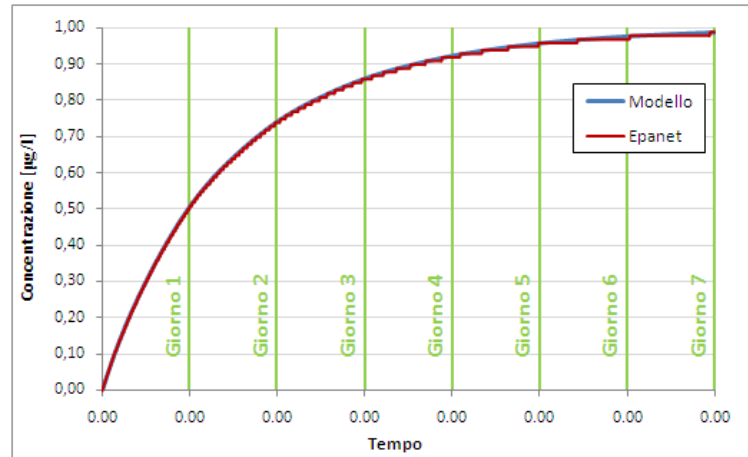


Figura 5.33 - Concentrazione in uscita dal serbatoio 3 calcolata con il modello e tramite il software

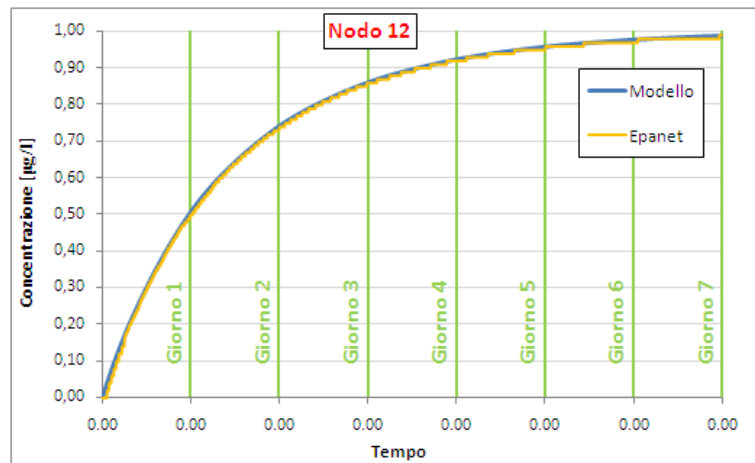


Figura 5.34 - Concentrazione nel nodo 12 calcolata con il modello e tramite il software

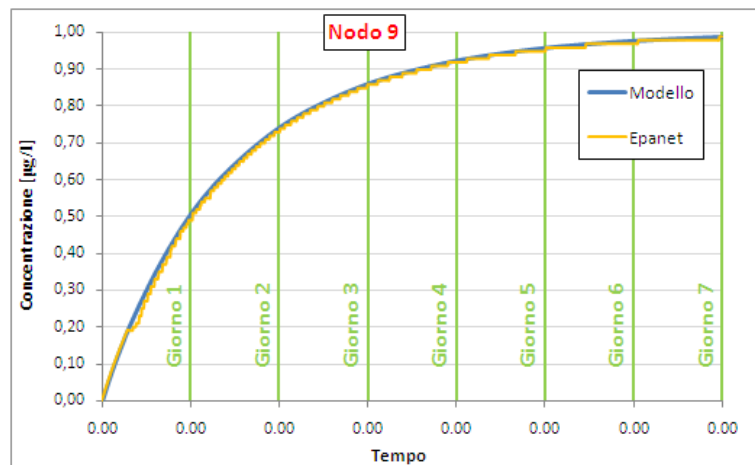


Figura 5.35 - Concentrazione nel nodo 9 calcolata con il modello e tramite il software

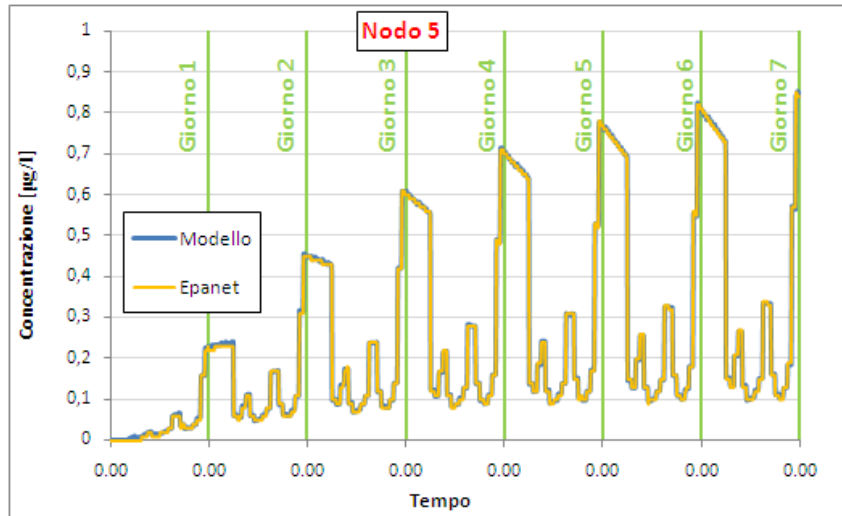


Figura 5.36 - Concentrazione nel nodo 5 calcolata con il modello e tramite il software

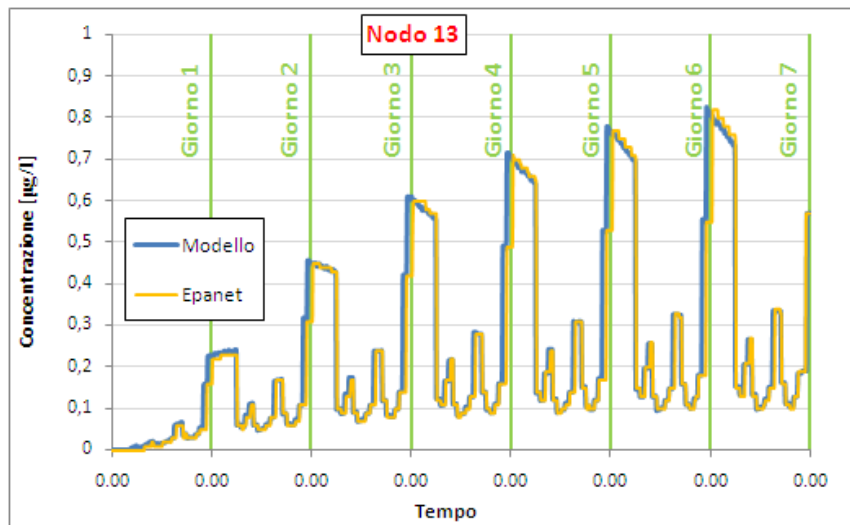


Figura 5.37 - Concentrazione nel nodo 13 calcolata con il modello e tramite il software

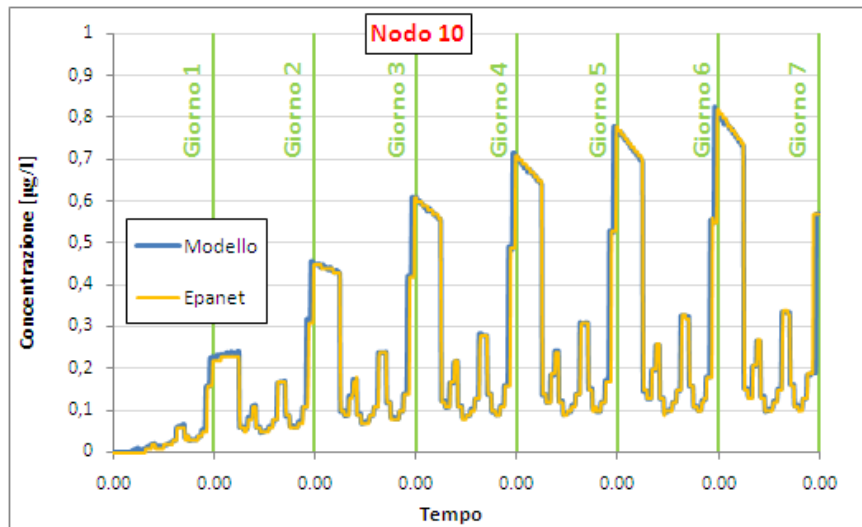


Figura 5.38 - Concentrazione nel nodo 10 calcolata con il modello e tramite il software

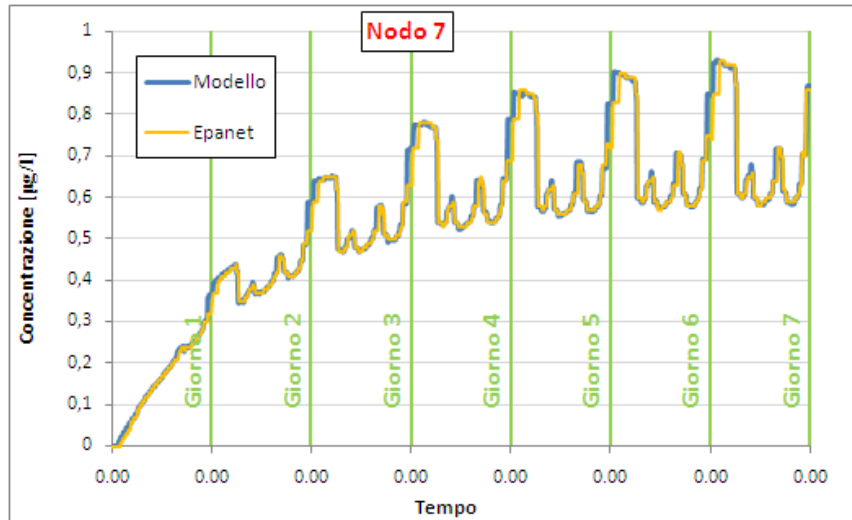


Figura 5.39 - Concentrazione nel nodo 7 calcolata con il modello e tramite il software

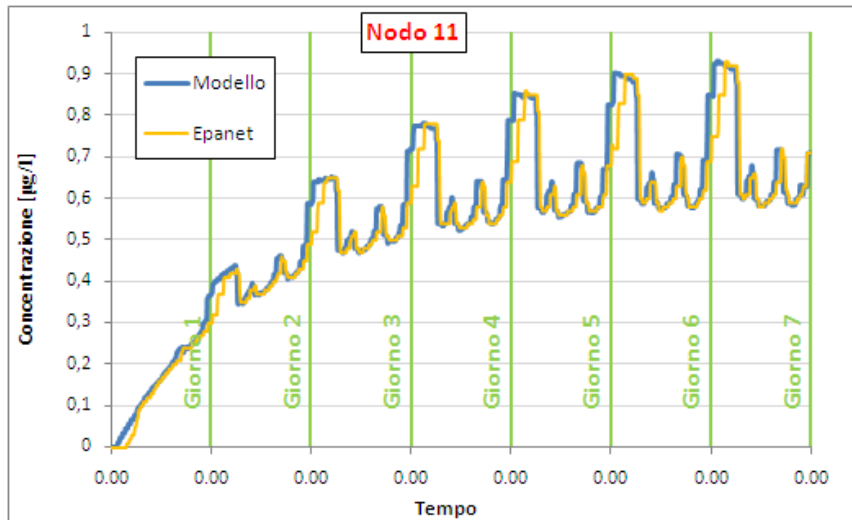


Figura 5.40 - Concentrazione nel nodo 11 calcolata con il modello e tramite il software

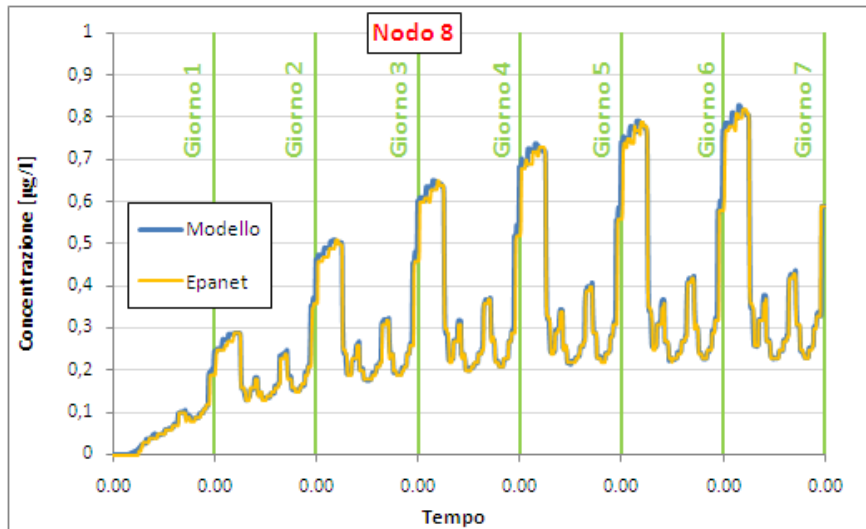


Figura 5.41 - Concentrazione nel nodo 8 calcolata con il modello e tramite il software

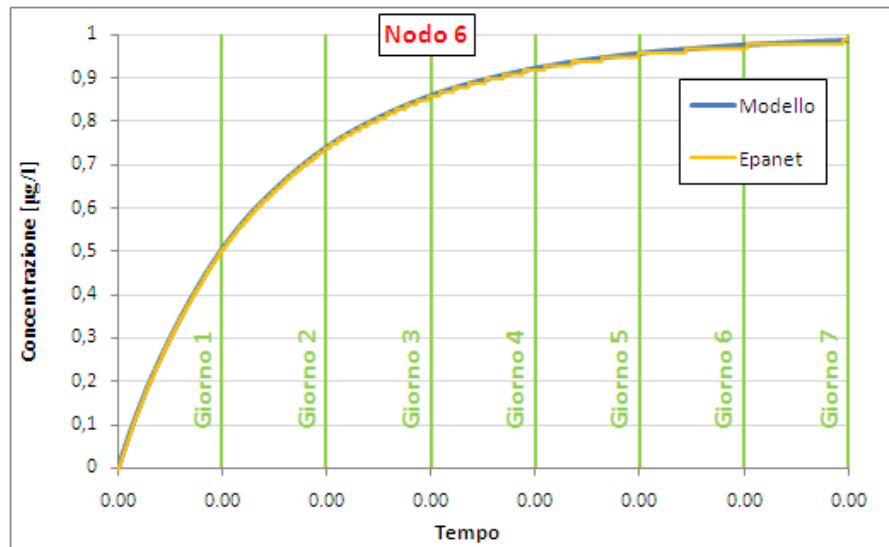


Figura 5.42 - Concentrazione nel nodo 6 calcolata con il modello e tramite il software

I risultati sono in genere molto buoni. Come già notato nel paragrafo precedente, differenze leggermente più marcate tra risultati del modello e risultati di Epanet si osservano in nodi lontani dalle immissioni, ovvero nel caso in oggetto i nodi 11 e 13. Trattasi comunque, anche in questo caso, di errori assolutamente trascurabili.

Fermo restando che in tutti i nodi della rete le concentrazioni aumentano al passare del tempo, le modalità di crescita sono molto diverse a seconda del nodo considerato. Infatti i nodi 6, 9 e 12 sono alimentati unicamente dal serbatoio 3 contaminato, e pertanto la curva di crescita è regolare e tende a raggiungere il valore di regime, pari a 1 mg/l. Invece i restanti nodi della rete sono alimentati non solo dal serbatoio 3, ma anche dal serbatoio 2, non contaminato; la miscelazione dei due flussi, in proporzioni variabili nell'arco della giornata, è all'origine delle forti oscillazioni di concentrazione ben visibili dai grafici.

5.5.2 Secondo schema di rete a maglie chiuse

Come ulteriore verifica del modello, si è poi considerata una seconda rete, denominata "rete 2" con caratteristiche simili alla rete 1 ma con il serbatoio situato in una posizione diversa, come mostra lo schema di Figura 5.43.

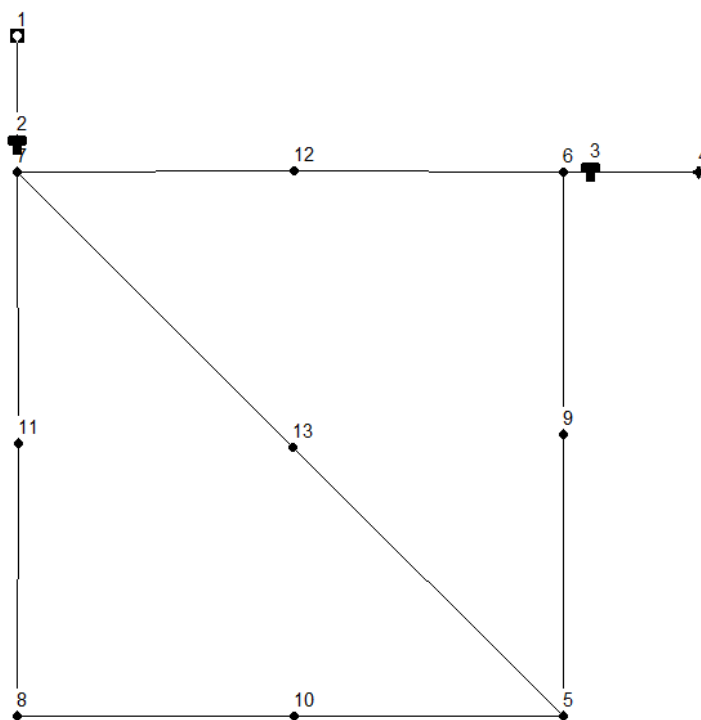


Figura 5.43 - Schema della rete 2

Si noti che le portate in ingresso, come per la rete 1, sono ripartite a metà tra le immissioni 1 e 4. Come nel caso precedente, la portata contaminata, con concentrazione di 1 mg/l, viene immessa tramite il nodo 4, mentre la portata immessa dal nodo 1 si ipotizza priva di contaminazione. Tutte le altre caratteristiche, compresi i pattern giornalieri delle portate immesse ed erogate, vengono mantenute identiche rispetto alla rete 1.

I risultati dell'applicazione del modello, confrontati con i risultati forniti dal software, sono visualizzabili nei grafici da Figura 5.47 a Figura 5.56: il primo rappresenta l'andamento delle concentrazioni in uscita dal serbatoio 3 contaminato, mentre negli altri grafici sono rappresentati gli andamenti delle concentrazioni nei vari nodi della rete.

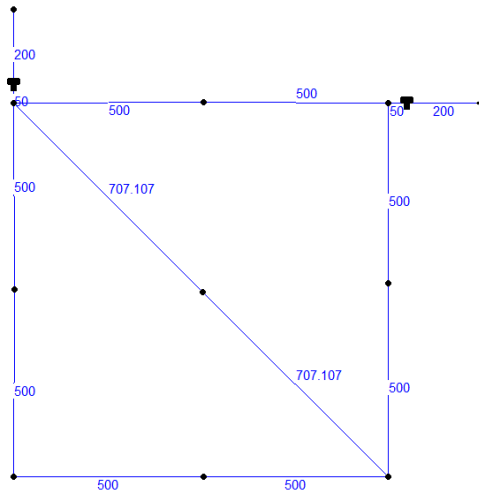


Figura 5.44 - Lunghezza delle tubazioni della rete 2 [m]

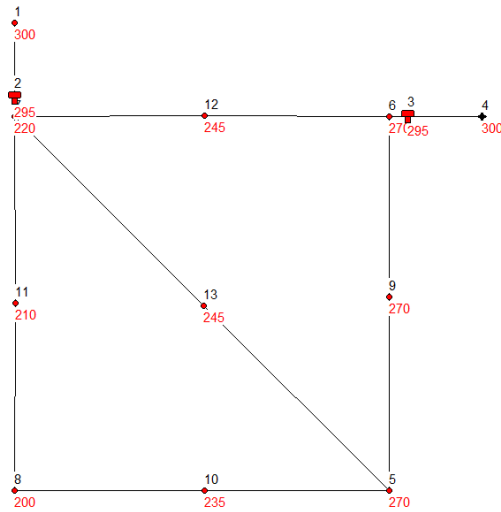


Figura 5.45 - Quote dei nodi della rete 2 [m s.l.m.]

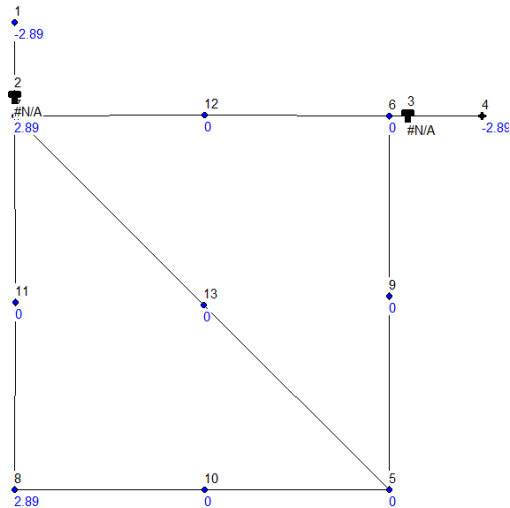


Figura 5.46 - Portate medie in ingresso e in uscita della rete 2 [l/s]

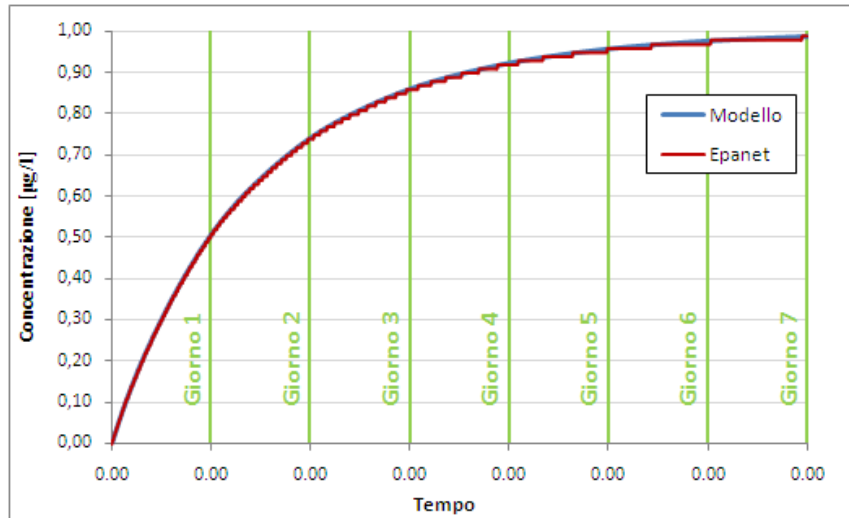


Figura 5.47 - Concentrazione in uscita dal serbatoio 3 calcolata con il modello e tramite il software

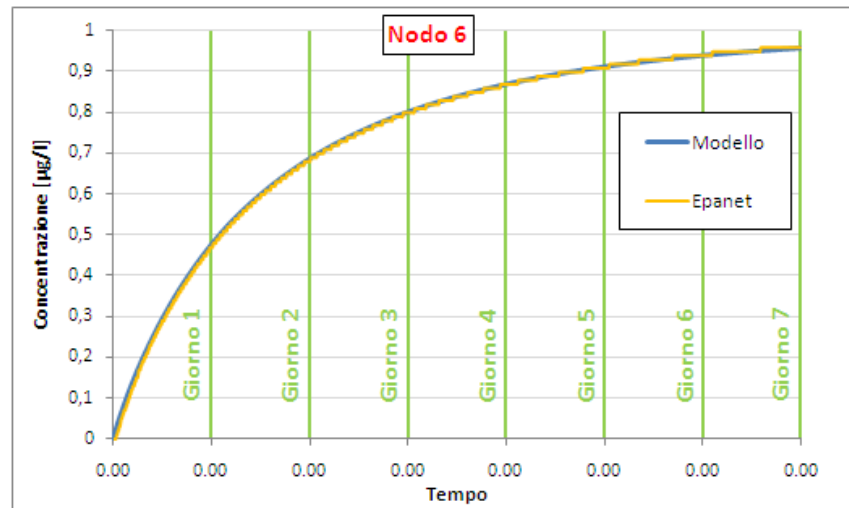


Figura 5.48 - Concentrazione nel nodo 6 calcolata con il modello e tramite il software

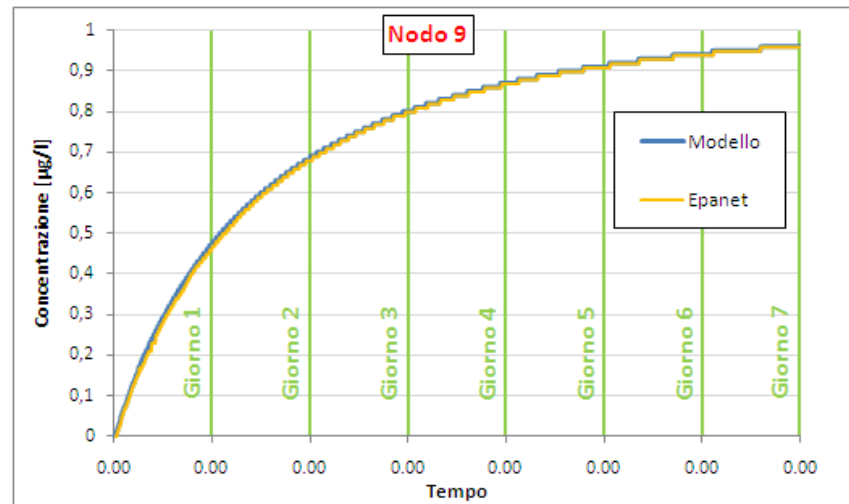


Figura 5.49 - Concentrazione nel nodo 9 calcolata con il modello e tramite il software

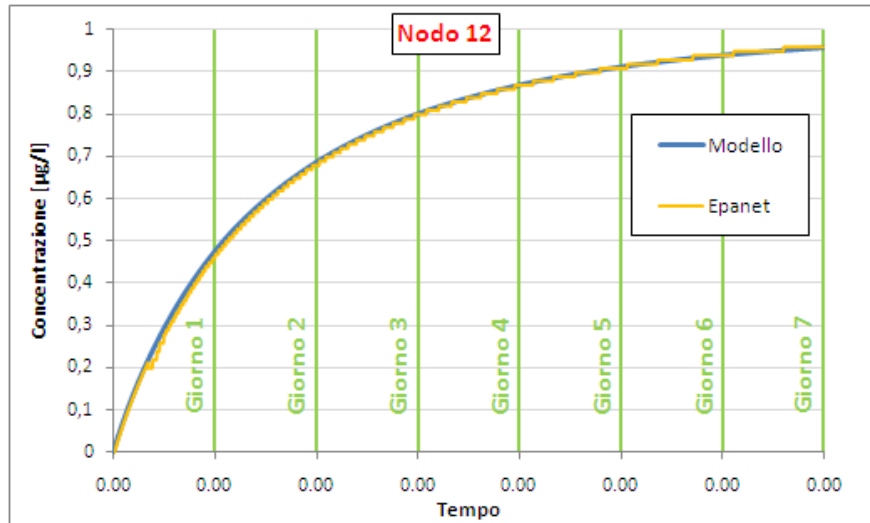


Figura 5.50 - Concentrazione nel nodo 12 calcolata con il modello e tramite il software

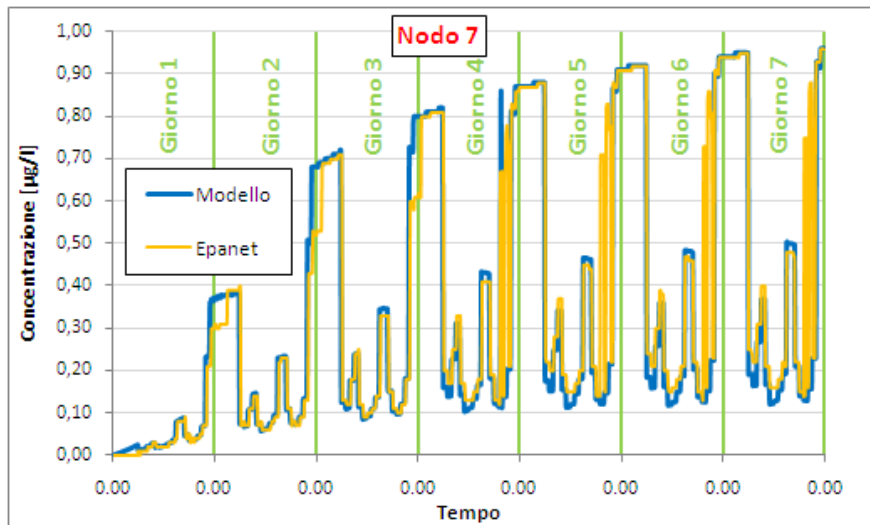


Figura 5.51 - Concentrazione nel nodo 7 calcolata con il modello e tramite il software

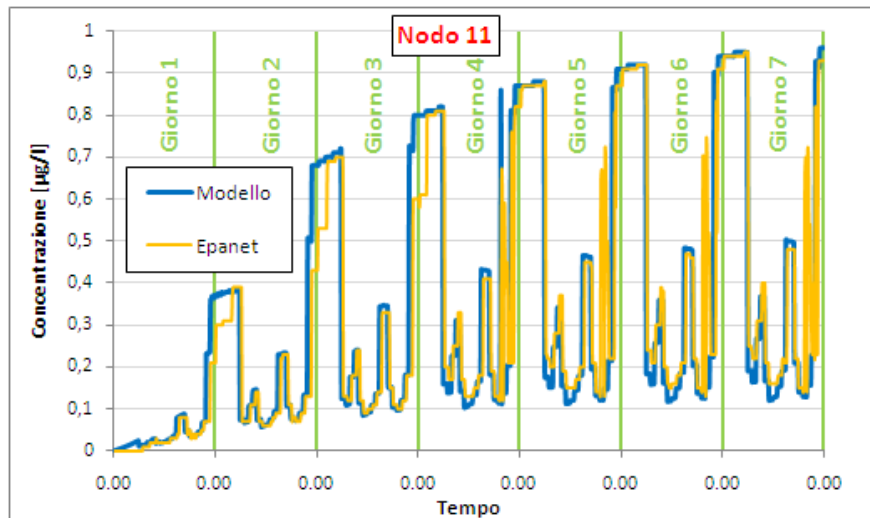


Figura 5.52 - Concentrazione nel nodo 11 calcolata con il modello e tramite il software

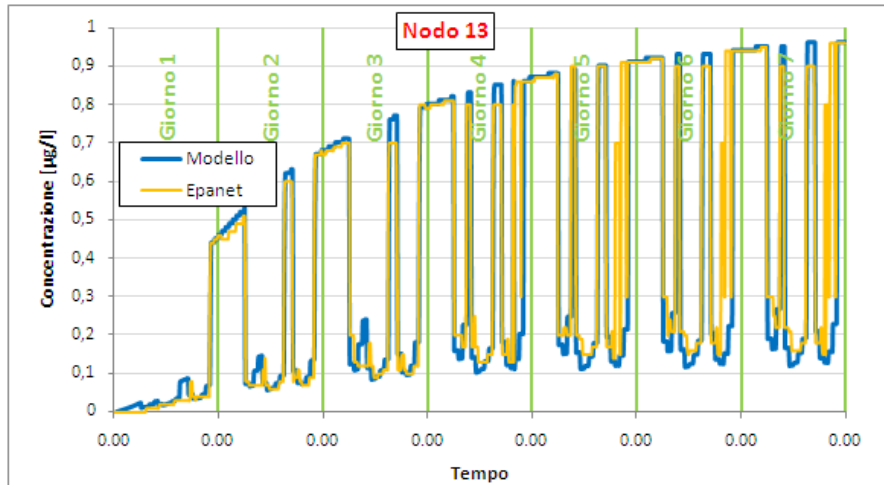


Figura 5.53 - Concentrazione nel nodo 13 calcolata con il modello e tramite il software

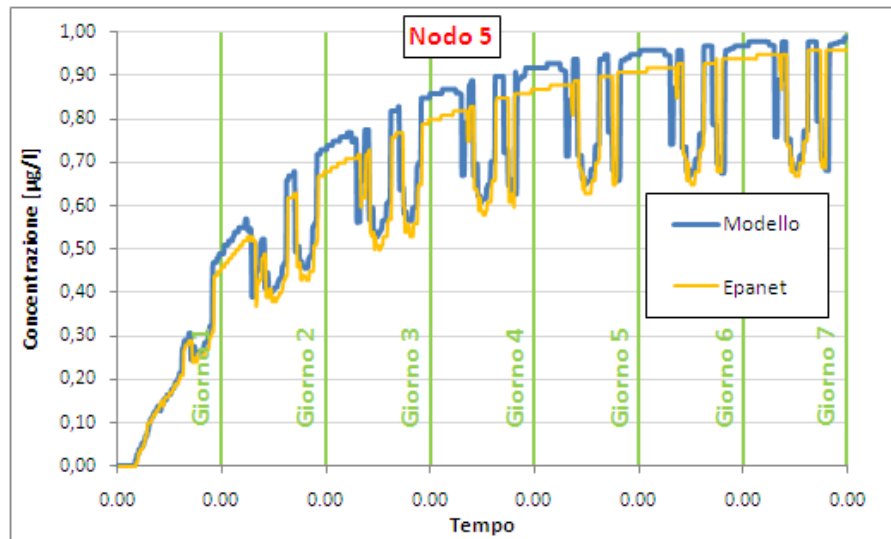


Figura 5.54 - Concentrazione nel nodo 5 calcolata con il modello e tramite il software

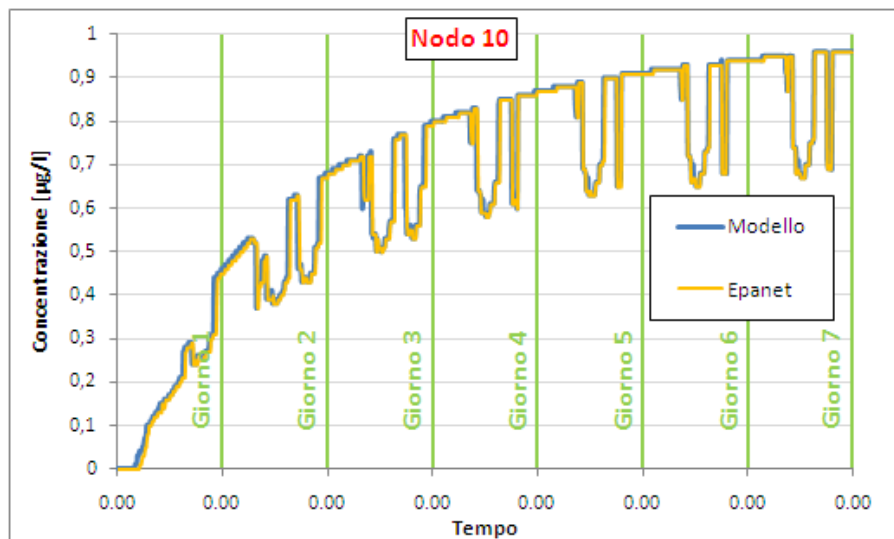


Figura 5.55 - Concentrazione nel nodo 10 calcolata con il modello e tramite il software

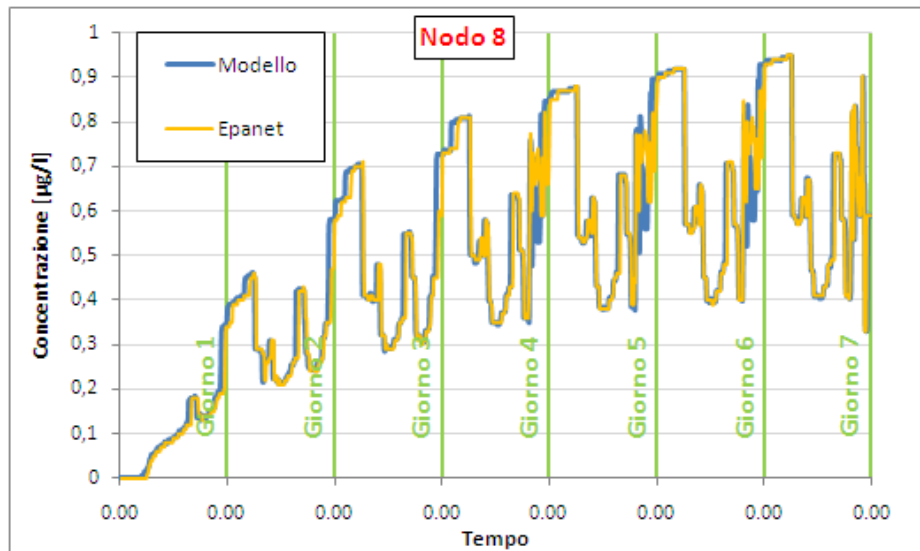


Figura 5.56 - Concentrazione nel nodo 8 calcolata con il modello e tramite il software

L'applicazione del modello a questa rete costituisce un'ulteriore verifica della sua validità, dato che anche in questo caso i risultati ottenuti si avvicinano molto a quelli calcolati in automatico dal software. Ancora una volta i nodi dove si registrano lievi imprecisioni sono quelli idraulicamente più distanti dalle immissioni, in questo caso soprattutto i nodi 5 e 13. Per quanto riguarda l'andamento delle concentrazioni, analogamente al caso precedente, la crescita è regolare fino al valore di regime nei nodi 6, 9 e 12, costantemente alimentati dal serbatoio 3 contaminato, mentre presenta notevoli oscillazioni giornaliere altrove, a causa della miscelazione del flusso pulito con quello contaminato.

5.6 Effetto dei serbatoi sulla propagazione della contaminazione

Nel modello di stima presentato, i serbatoi rivestono un ruolo di primissimo piano; non tenere in considerazione tale ruolo porterebbe ad errori significativi, in particolare ad una sovrastima delle concentrazioni ai nodi nel transitorio successivo all'ingresso della contaminazione in rete. A questo punto del lavoro, si è voluto caratterizzare meglio tale aspetto, cercando di comprendere meglio l'effetto della presenza di serbatoi più o meno grandi sulla propagazione della contaminazione in una rete di acquedotto.

A tale scopo, si è ritenuto che la rete 1 presentata nel paragrafo 5.4.1 fosse particolarmente adatta, in virtù della sua semplice geometria e della presenza di due serbatoi, di cui soltanto uno è soggetto a contaminazione. Dunque, tramite varie simulazioni con Epanet variando il

volume del serbatoio inquinato, si è analizzato il modificarsi delle modalità di diffusione della contaminazione in rete. In Figura 5.57 si riporta nuovamente lo schema di tale rete:

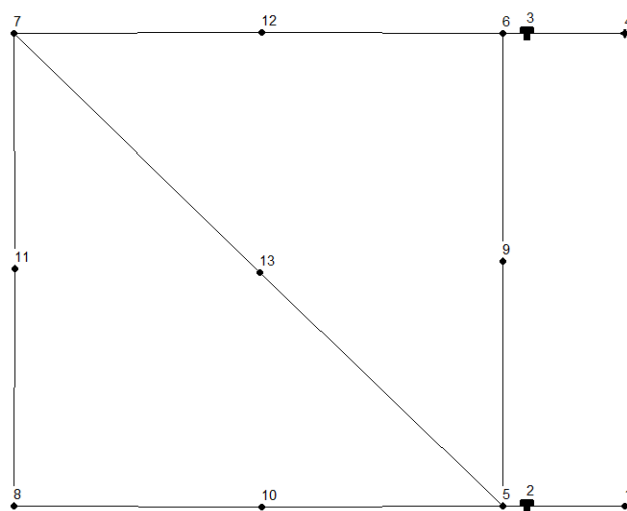


Figura 5.57 - Schema della rete 1

Si è effettuata una prima simulazione costruendo il grafico dell'andamento della concentrazione nelle erogazioni 7 e 8, riferite al secondo giorno di simulazione. Una volta acquisiti i risultati, si è modificato il diametro del serbatoio 3, ovvero quello contaminato, che nella rete 1 originale è pari a 10 metri. Lo si è dapprima ridotto, portandolo a 8, 6 e 4 metri, poi aumentato, ponendolo uguale a 12, 14 e 20 metri; per ogni diametro si è calcolato il corrispondente volume e lo si è rapportato al volume uscente nell'arco di una giornata dal serbatoio stesso, che non cambia al variare del diametro del serbatoio. Il calcolo di quest'ultimo volume, necessario per adimensionalizzare i valori di capacità del serbatoio, è riportato in Tabella 5.4.

Per ogni differente volume assegnato al serbatoio 3, si è realizzata una simulazione in Epanet mettendo in grafico le concentrazioni di inquinante alle erogazioni durante il secondo giorno di simulazione. Di seguito si riporta, in forma grafica, il confronto tra gli andamenti corrispondenti ai vari diametri assegnati al serbatoio, in funzione del rapporto tra il volume del serbatoio stesso e il volume da esso uscente nell'arco della giornata.

Si fa notare che si è lasciato costante, pari a 10 m, il diametro del serbatoio 2, non soggetto a contaminazione.

Tabella 5.4 - Volume uscente in una giornata dal serbatoio 3 per la rete 1

Ore	Q _{out} (link 4) (l/s)	Volume (l)	
1	1.62	5832	
2	1.61	5796	
3	1.59	5724	
4	1.58	5688	
5	1.56	5616	
6	3.18	11448	
7	3.58	12888	
8	2.6	9360	
9	2.23	8028	
10	3.58	12888	
11	4.79	17244	
12	4.6	16560	
13	4.01	14436	
14	3.42	12312	
15	2.1	7560	
16	2.09	7524	
17	3.22	11592	
18	4.42	15912	
19	4.83	17388	
20	4.04	14544	
21	3.06	11016	
22	1.8	6480	
23	1.65	5940	
24	1.64	5904	
		247680	l
		247.68	mc

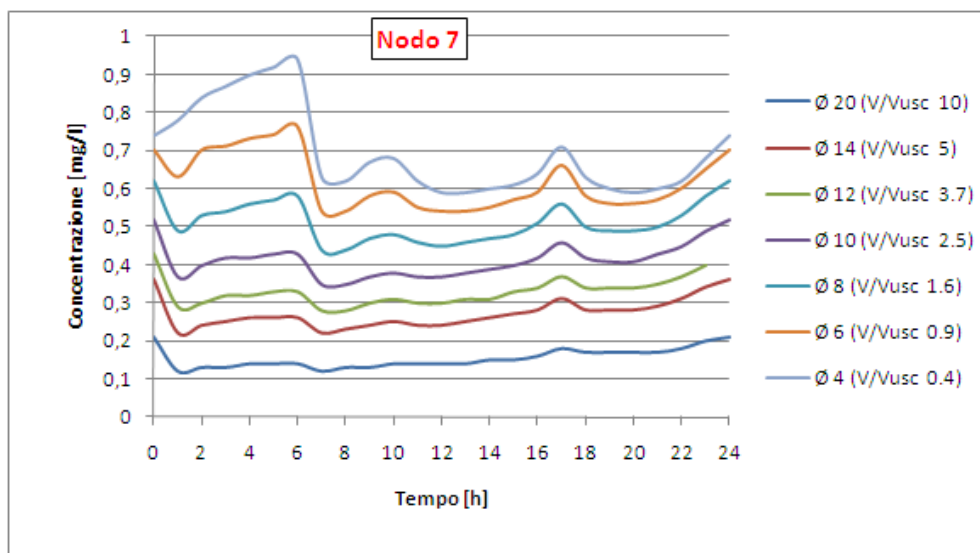


Figura 5.58 - Confronto tra gli andamenti della concentrazione nel nodo 7 al variare del volume del serbatoio 3 (2° giorno di simulazione)

Com'era prevedibile, all'aumentare del volume del serbatoio diminuisce la concentrazione media al nodo durante il secondo giorno; fatto spiegabile con la maggiore diluizione della portata contaminata che viene immessa in rete. Il tempo necessario affinché la rete raggiunga una situazione di regime, in termini di concentrazione di inquinanti, è conseguentemente maggiore più il serbatoio è grande. Inoltre, all'aumentare del volume del serbatoio diminuiscono le oscillazioni dei valori di concentrazione nell'arco della giornata al nodo. Quindi, la concentrazione nel nodo tende ovviamente ad aumentare al passare del tempo, ma lo fa in modo più lento, con valori medi più bassi, e più graduale, con meno oscillazioni, quanto più il serbatoio è grande. Prendendo in considerazione il nodo 8, si perviene a risultati analoghi:

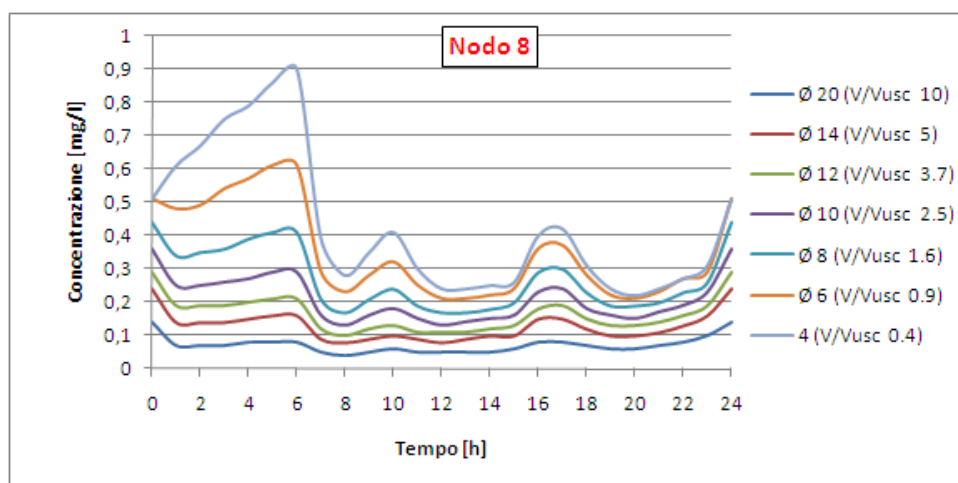


Figura 5.59 - Confronto tra gli andamenti della concentrazione nel nodo 8 al variare del volume del serbatoio 3 (2° giorno di simulazione)

Si è poi applicato lo stesso ragionamento a periodi di tempo più lunghi, di 72, 130, 250 e 720 ore, cioè un mese, per avere una conferma di quanto appena visto, ossia dello smorzamento delle variazioni di concentrazione operato dal serbatoio, effetto che cresce all'aumentare delle dimensioni del serbatoio stesso.

Per ogni periodo di tempo e per vari diametri del serbatoio 3, si è realizzata una simulazione in Epanet, senza modificare le altre caratteristiche della rete. Si è posto il diametro uguale a 4, 10, 16, 50 e 100 metri; gli ultimi due diametri sono poco realistici, ma risulta molto utile considerarli per valutare l'effetto di diluizione del serbatoio.

Si sono ottenuti i seguenti andamenti per la concentrazione nel **nodo 7** (da Figura 5.60 a Figura 5.63), mente per il **nodo 8** (da Figura 5.64 a Figura 5.67).

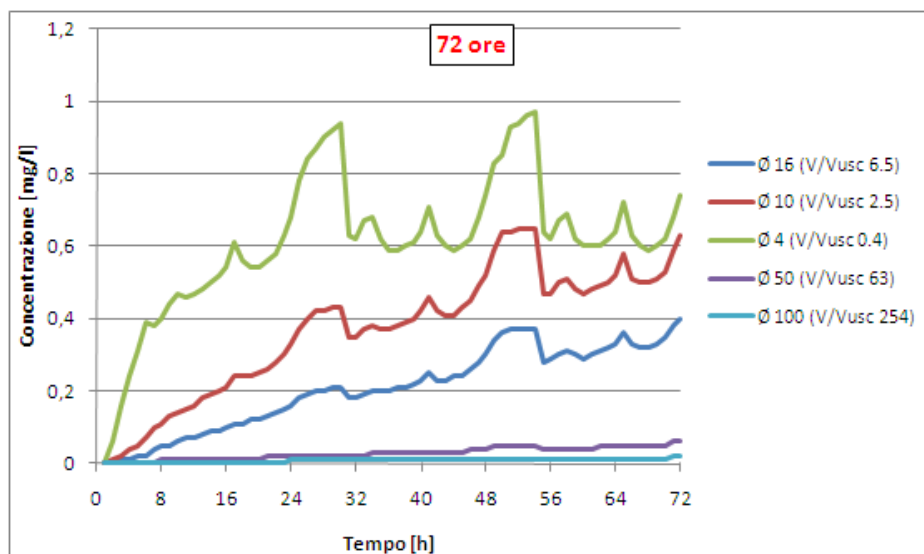


Figura 5.60 - Concentrazione nel nodo 7 su 72 ore al variare del diametro del serbatoio 3

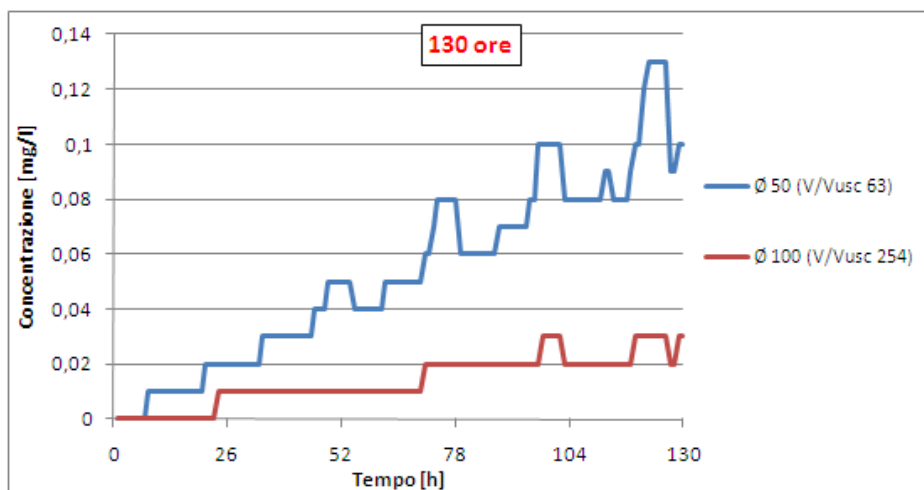


Figura 5.61 - Concentrazione nel nodo 7 su 130 ore al variare del diametro del serbatoio 3

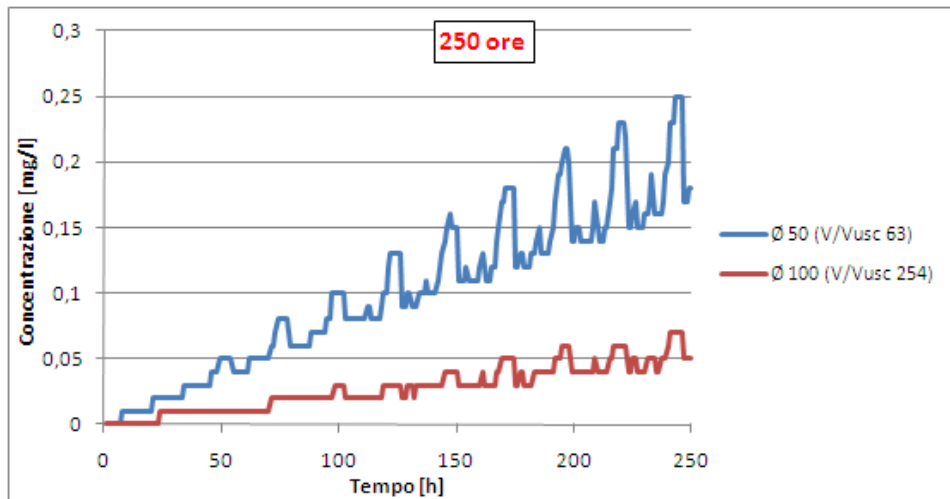


Figura 5.62 - Concentrazione nel nodo 7 su 250 ore al variare del diametro del serbatoio 3

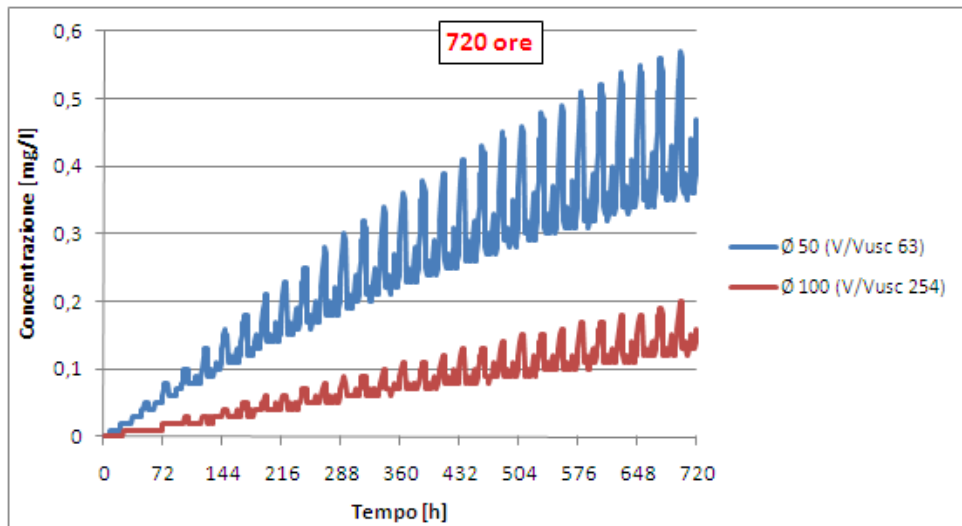


Figura 5.63 - Concentrazione nel nodo 7 su 720 ore al variare del diametro del serbatoio 3

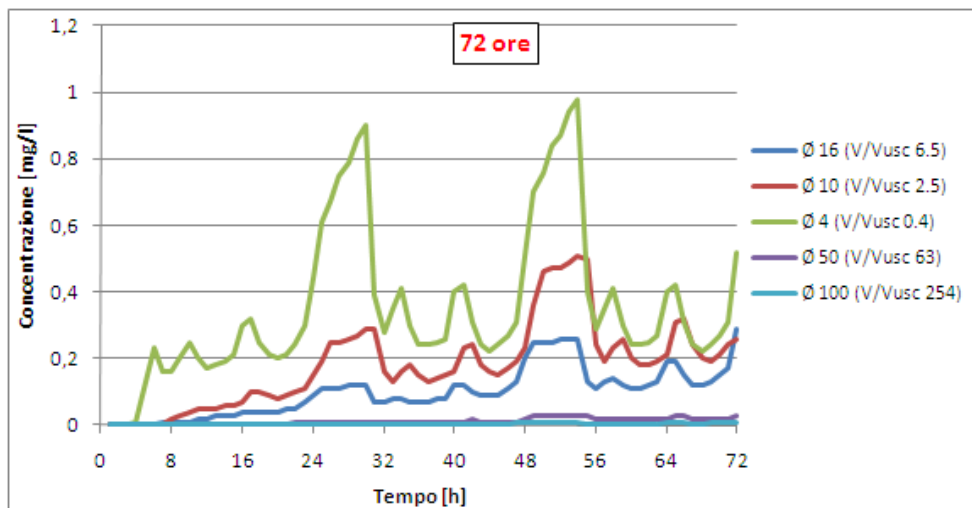


Figura 5.64 - Concentrazione nel nodo 8 su 72 ore al variare del diametro del serbatoio 3

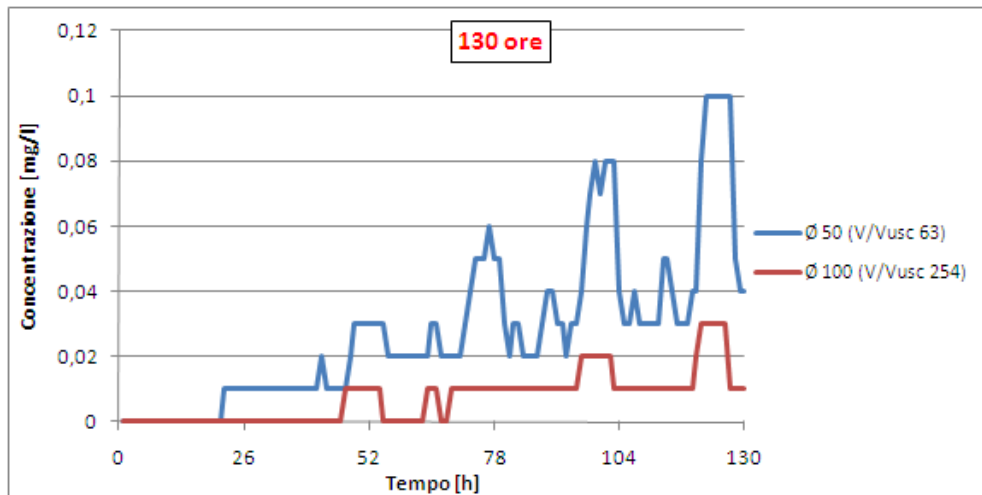


Figura 5.65 - Concentrazione nel nodo 8 su 130 ore al variare del diametro del serbatoio 3

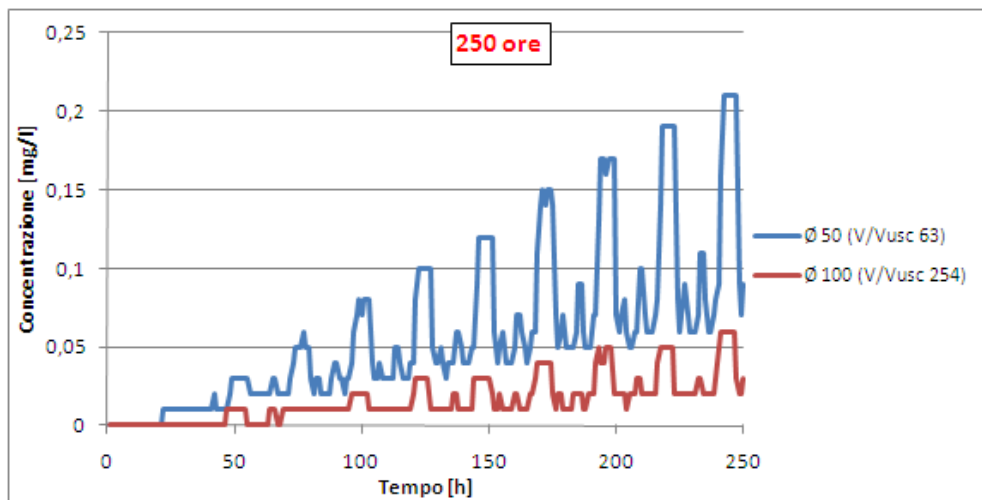


Figura 5.66 - Concentrazione nel nodo 8 su 250 ore al variare del diametro del serbatoio 3

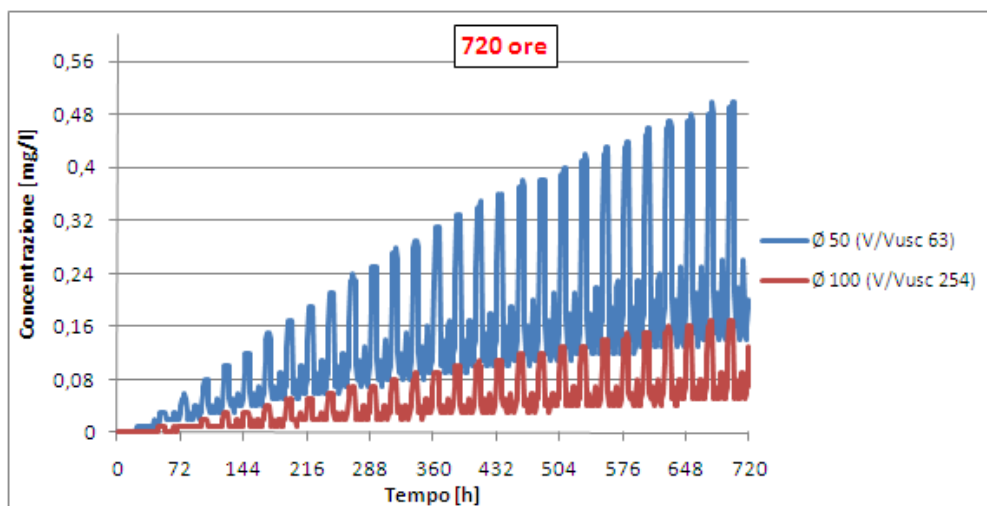


Figura 5.67 - Concentrazione nel nodo 8 su 720 ore al variare del diametro del serbatoio 3

Per i periodi di tempo più lunghi si sono considerati solo i diametri di 50 e 100 m, dal momento che in questo tipo di analisi la rete non deve essere a regime, e per diametri inferiori la situazione di regime si raggiunge molto rapidamente. Anche queste ultime simulazioni confermano l'attenuazione delle oscillazioni di concentrazione nei nodi, all'aumentare del volume disponibile nel serbatoio per la diluizione delle portate. Particolarmente significativi sono i grafici relativi alle simulazioni mensili (720 ore), dove è evidentissimo l'andamento più "costante" dei valori di concentrazione nel caso di serbatoio con diametro 100 metri rispetto al caso con serbatoio avente diametro 50 metri.

Possiamo quindi affermare che l'aumento delle dimensioni dei serbatoi comporta una concentrazione ai nodi meno variabile nell'arco della giornata e in aumento più graduale con il passare dei giorni.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

6.1 Principali risultati conseguiti

Obiettivo principale del presente lavoro di tesi è la valutazione di quali zone di una rete di acquedotto siano più vulnerabili da parte di eventi di inquinamento delle fonti di approvvigionamento, caratterizzando l'estensione spaziale e della rapidità di diffusione di alcune tipologie di contaminazione, anche ipotizzando anche un loro possibile aggravamento rispetto allo scenario iniziale.

A tal fine le analisi condotte hanno comportato lo studio quali-quantitativo di reti di acquedotto attraverso la modellazione con uno dei più utilizzati software di simulazione (Epanet 2.0) applicato a casi reali, in particolare alle due reti di Colline Comasche e di Mondello. Per ciascuna rete vengono ora riportati i principali risultati ottenuti.

Per la rete di Colline Comasche, disponendo delle serie storiche di misurazioni relative a vari inquinanti nei principali pozzi, si sono individuate le tre situazioni più critiche mai verificatesi in passato e per ognuna di esse si è analizzata la propagazione degli inquinanti in rete. Per ogni caso si sono studiati anche scenari peggiori, corrispondenti a concentrazioni di inquinanti doppie o triple rispetto ai picchi massimi registrati, traendo le seguenti conclusioni:

- L'inquinamento da solventi dei pozzi di via Patrioti e Baragiola è attualmente il problema più grave: infatti in tutte le misurazioni dal 2005 si sono registrati valori superiori al limite di legge di 10 µg/l. Inoltre la contaminazione che ne deriva è in grado di compromettere seriamente la qualità dell'acqua in tutta la zona di Bulgarograsso, Guanzate e Lurate Caccivio, fino all'erogazione E1. Tuttavia, a parte una contaminazione più rapida dell'erogazione San Giuseppe e un maggiore inquinamento del nodo E1, non vi sono amplificazioni sostanziali nella propagazione dell'inquinamento nel caso di concentrazioni maggiori a quelle storiche: infatti oltre il nodo E1 le erogazioni sono alimentate unicamente da altre centrali, e dunque sono al riparo da questo tipo di contaminazione. In sostanza, può essere una situazione di inquinamento grave per una vasta zona della rete, ma un aumento delle concentrazioni di solventi in ingresso non provocherebbe una maggiore estensione della contaminazione, che continuerebbe ad interessare le medesime zone.
- Per quanto riguarda i pozzi Fontanino, il problema di contaminazione da ammoniaca

sembra essere stato limitato al solo anno 2007, ma una sua ripetizione è potenzialmente molto grave: infatti considerando le concentrazioni massime registrate, l'inquinamento interessa, oltre alle zone circostanti, anche l'area di Bulgarograsso, apportando concentrazioni oltre il limite di legge fino alla stessa centrale di Bulgarograsso e spingendosi oltre, seppur con livelli ancora accettabili grazie all'effetto di diluizione nel serbatoio. Ma le simulazioni con inquinamento raddoppiato e triplicato mostrano come in caso di concentrazioni di partenza più elevate anche la zona oltre la centrale di Bulgarograsso potrebbe interessata da livelli di inquinamento oltre i limiti di legge. Trattasi dunque di una contaminazione potenzialmente molto estesa, perciò è necessario monitorare costantemente la qualità nei pozzi Fontanino, per individuare rapidamente un eventuale inquinamento.

- Nel caso di inquinamento da nitrati nel pozzo Navedano 1, avvenuta storicamente nel 2003, si tratta di una contaminazione relativamente poco estesa, e la miscelazione con la portata pulita del pozzo Navedano 2, che avviene all'interno della centrale Navedano, garantisce il rispetto dei limiti di legge ai nodi con riferimento a quell'episodio. Tuttavia le simulazioni hanno dimostrato come se lo stesso inquinamento dovesse ripresentarsi con entità maggiore, tale miscelazione non sarebbe sufficiente e si supererebbero i limiti normativi, per quanto solo nella zona circostante la centrale di Navedano.

L'approccio alla rete di Mondello è stato differente, vista l'assenza di misurazioni storiche riguardanti la qualità dell'acqua in ingresso in rete. Essendo impossibile analizzare scenari storici di inquinamento in assenza di dati, ci si è posti l'obiettivo di valutare le aree di influenza dei serbatoi Petrazzi Basso e Gallo per un ipotetico caso di inquinamento. Si possono fare le seguenti considerazioni:

- Nel caso di inquinamento del serbatoio Gallo tutta la rete ne sarebbe interessata, seppure in misura minore nei nodi più lontani dal serbatoio stesso.
- Invece se ad essere contaminato fosse il serbatoio Petrazzi Basso, quasi metà della rete sarebbe sostanzialmente immune da inquinamento, trovandosi sotto la totale influenza del serbatoio Gallo.
- Dalle simulazioni realizzate appare evidente la maggiore influenza del serbatoio Gallo sulla rete, rispetto al serbatoio Petrazzi Basso. Da ciò si può concludere che è fondamentale monitorare costantemente la qualità delle acque affluenti a entrambi i serbatoi, ma con particolare attenzione al flusso che raggiunge il serbatoio Gallo.

Nella seconda parte del lavoro si è sviluppato un modello alternativo di stima delle concentrazioni ai nodi di una generica rete acquedottistica.

A partire dal semplice concetto di media pesata, per cui se due flussi contaminati convergono in un nodo, la concentrazione risultante in quel nodo dipenderà dalle concentrazioni dei flussi in arrivo e dalle proporzioni tra le rispettive portate, si sono introdotte opportune modifiche e integrazioni per tenere conto sia dei tempi di traslazione delle portate all'interno dei vari tratti di rete, sia dell'effetto di diluizione operato dai serbatoi nelle prime ore successive all'ingresso di contaminazione in rete, che provoca un rallentamento significativo, per quanto temporaneo, nella diffusione dell'inquinamento. In particolare, per tenere in considerazione quest'ultimo effetto, si è ipotizzato che i serbatoi di una rete di acquedotto siano assimilabili a bioreattori CSTR in cui si ponga nulla la costante di reazione. Tale supposizione è stata verificata calcolando la curva di saturazione del serbatoio Petrazzi Basso e quella della centrale Fontanino tramite l'equazione dei reattori CSTR opportunamente modificata, e confrontando gli andamenti ottenuti con le curve costruite a partire dalle concentrazioni calcolate da Epanet in automatico. Il modello di stima è stato quindi testato applicandolo a due casi di inquinamento della rete di Colline Comasche, quello dei pozzi Fontanino e quello del pozzo Navedano 1, nonché a due semplici reti a maglie chiuse implementate appositamente in Epanet. Le concentrazioni risultanti sono state confrontate con quelle che il software calcola in automatico durante ogni simulazione.

I risultati sono nel complesso molto positivi, e dimostrano la validità del modello sviluppato per la stima delle concentrazioni ai nodi di reti acquedottistiche, tanto a maglie aperte quanto a maglie chiuse. L'affidabilità dei risultati diminuisce lievemente al crescere della distanza dai punti di immissione, ma gli errori sono risultati sempre di entità trascurabile.

Si è anche messo in luce il ruolo dei serbatoi nel rallentamento della propagazione degli inquinanti: si è visto infatti come aumentando le dimensioni dei serbatoi le concentrazioni nei nodi della rete aumentino in modo molto più graduale e regolare, con riferimento ovviamente al transitorio iniziale, dal momento che quando la rete raggiunge una situazione di regime l'effetto di diluizione nei serbatoi può considerarsi nullo.

6.2 Sviluppi futuri

Innanzitutto, è senz'altro auspicabile effettuare ulteriori verifiche del modello messo a punto, sulla base di dati sperimentali.

Tali verifiche andrebbero condotte sia sulle stesse reti considerate in questo lavoro, studiando altri casi di potenziale inquinamento, sia eventualmente su altre reti di acquedotto realmente esistenti.

Un importante sviluppo del modello di stima potrebbe essere quello di considerare anche inquinanti di tipo non conservativo. Infatti in questo lavoro si sono assunti nulli i fenomeni di degradazione del contaminante lungo i vari tratti della rete, ponendo i coefficienti "bulk" e "wall" di Epanet pari a zero. Tuttavia vi sono numerosi inquinanti che subiscono importanti reazioni chimiche e fenomeni di degradazione durante il percorso, per i quali tale semplificazione potrebbe pregiudicare l'affidabilità dei risultati.

Da qui la necessità di tenere conto di tali fenomeni, innanzitutto realizzando simulazioni in Epanet con i coefficienti sopra citati diversi da zero, quindi implementando il modello di stima considerando anche questi fattori.

Una particolare applicazione potrebbe essere costituita dallo studio della propagazione in rete del cloro di disinfezione, che subisce una degradazione progressiva al passare del tempo. Lo studio delle modalità e delle tempistiche di tale diffusione, insieme all'analisi delle possibili interferenze con eventuali colonie batteriche presenti in rete, richiederebbe logicamente opportune modifiche del modello di stima, ma rappresenta senza dubbio una prospettiva molto interessante.

Un'ulteriore nota a margine riguarda i serbatoi in pressione, non tanto in relazione al modello qui proposto, che è in grado di tenere conto della loro influenza senza particolari difficoltà, quanto a proposito della loro implementazione in Epanet. Tale software, infatti, non è in grado di rappresentare adeguatamente il funzionamento di questo tipo di serbatoi; ciò rende impossibile utilizzare Epanet per controllare i risultati del modello qui proposto in presenza di serbatoi in pressione. Entrando nel merito della questione, bisognerebbe trovare un modo, in Epanet, per separare la funzione idraulica del serbatoio in pressione da quella di diluizione e miscelazione degli inquinanti; a questo scopo potrebbe essere opportuno scindere in due parti il sistema di pompaggio dai pozzi al serbatoio: un primo sistema di pompe con l'unico scopo di introdurre acqua nel serbatoio, che a questo punto sarebbe a pelo libero e dotato dell'effettivo

volume disponibile per la diluizione degli inquinanti, e un secondo pompaggio dal serbatoio verso la rete per fornire alla portata in uscita il carico necessario al funzionamento idraulico della rete stessa.

Si fa notare che comunque la presenza del serbatoio in pressione di Bulgarograsso, con le relative difficoltà associate alla sua rappresentazione in Epanet, non inficia la validità delle analisi di diffusione degli inquinanti nella rete di Colline Comasche (paragrafo 4.1): le corrispondenti simulazioni riguardano infatti la rete a regime, quando l'effetto di diluizione dei contaminanti nei serbatoi è ormai nullo.

7. BIBLIOGRAFIA

- BECCIU G., PAOLETTI A. (2005) Esercitazioni di costruzioni idrauliche, Cedam
- BECCIU G., PAOLETTI A. (2010) Fondamenti di Costruzioni Idrauliche, Utet
- BIANCHI A. (2009) Dispense del corso di impianti speciali idraulici
- BIANCHI A., SANFILIPPO U. (2001) Pompe e impianti di sollevamento, Hoepli, Milano
- BONOMO L. (2008) Trattamenti delle acque reflue, McGraw Hill, Milano
- BONOMO L. (2008) Dispense del corso di trattamento delle acque di rifiuto, Cazzamali, Milano
- D. Lgs 31/2001 (2001), Decreto Legislativo 2 febbraio 2001, n. 31 – Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo Umano
- Sogesid, Documento Base dell'accordo Quadro Risorse Idriche – Sogesid S.p.A, (2000)
- EPANET 2.0 – Users manual, EPA
- LA MANNA G., SALINETTI G. (2008) Tutela e uso delle risorse idriche nel bacino del Livescia
- VISMARA R., (2009) Dispense del corso di Ingegneria Sanitaria Ambientale 1