

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
“FEDERICO II”**



**SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE*

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

**ELABORATO DI TESI**

**I modelli matematici per la simulazione della  
formazione dei sottoprodotti della clorazione  
(DBPs – Disinfection By-Products)**

Relatore  
Prof. Ing. Massimiliano FABBRICINO

Candidata  
Chiara STAMMELLUTI  
matr. M67/61

Correlatrice  
Dott.ssa Grazia FATTORUSO

## **Abstract**

Il presente lavoro di tesi è scaturito dalle problematiche di qualità delle acque potabili negli acquedotti.

Svolto in collaborazione con iSense&Modeling Group dell'ENEA Centro Ricerche di Portici, ha avuto come obiettivo lo studio dei modelli matematici applicati a casi reali relativamente alla formazione dei sottoprodotti della clorazione che si generano negli acquedotti.

Poiché la disponibilità di acqua destinata all'uso umano va sempre più scemando - per cui bisogna approvvigionarsi, oltre che da sorgenti, falde acquifere e pozzi, anche da fonti più superficiali quali fiumi, laghi, invasi dove è meno pura e più inquinata - la comunità scientifica sta concentrando gli sforzi sulla potabilizzazione.

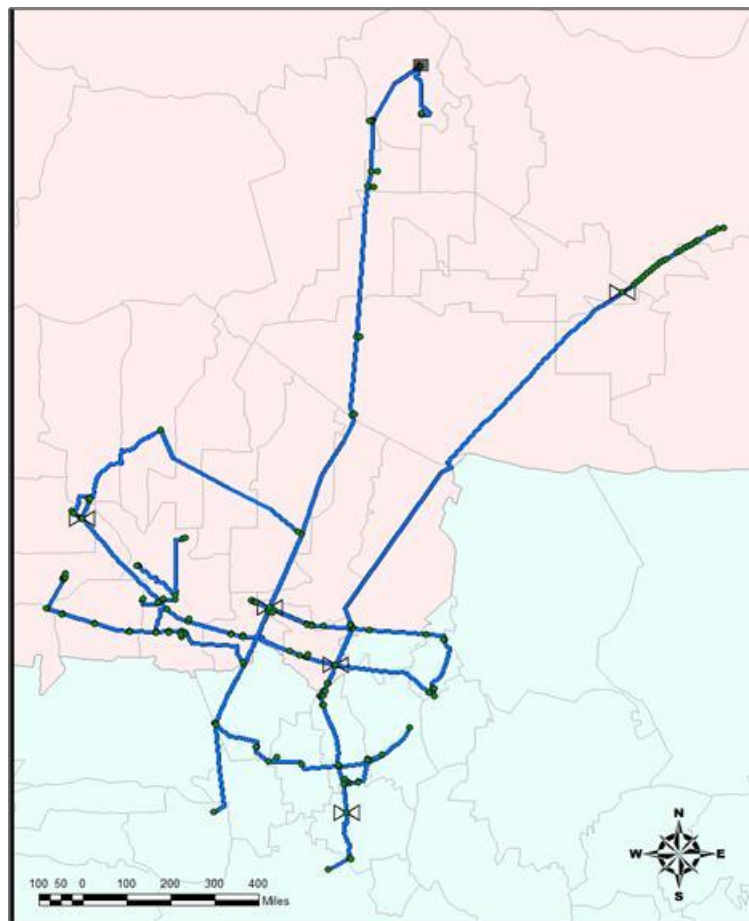
L'acqua, per essere considerata potabile, deve garantire l'assenza di effetti negativi sulla salute umana, come prevedono la direttiva europea n. 98/83/CE e il D. Lgs. n.31/2001, con cui è stata imposta la disinfezione e sono stati stabiliti i valori limite di diversi parametri.

I processi di potabilizzazione ottenuti mediante disinfezione possono essere effettuati sia a mezzo di agenti chimici (principalmente composti del cloro) sia utilizzando metodi fisici sia impiegando entrambi.

Utilizzando soprattutto il cloro, la sostanza organica di origine naturale NOM (Natural Organic Matter) presente nelle acque potabili crea i sottoprodotti DBPs (Disinfection by Products) potenzialmente dannosi per la salute umana. Di conseguenza è necessario individuare modelli atti a predire la formazione dei DBPs, per individuare le concentrazioni raggiunte nei diversi punti di erogazione della risorsa idrica.

Oltre al monitoraggio con sonde collocate lungo la rete che fornisce in continuo i parametri indicativi della qualità delle acque, si applicano i modelli predittivi dei fenomeni di decadimento del cloro e di crescita dei sottoprodotti. A tal fine sono stati analizzati e utilizzati i modelli matematici presenti in letteratura per la simulazione delle cinetiche di formazione dei sottoprodotti della clorazione. I modelli sono suddivisi in empirici e cinetici. Finora sono stati messi a punto in laboratorio, ma attualmente la comunità scientifica sta cercando di calibrarli su acquedotti reali.

In particolare, in questo studio sono stati esaminati i modelli matematici applicati sugli acquedotti Santa Sofia (Campania) (Figura 1) e Aurunci – Valcanneto (basso Lazio) (Figura 2).



**Figura 1 – Acquedotto Santa Sofia**

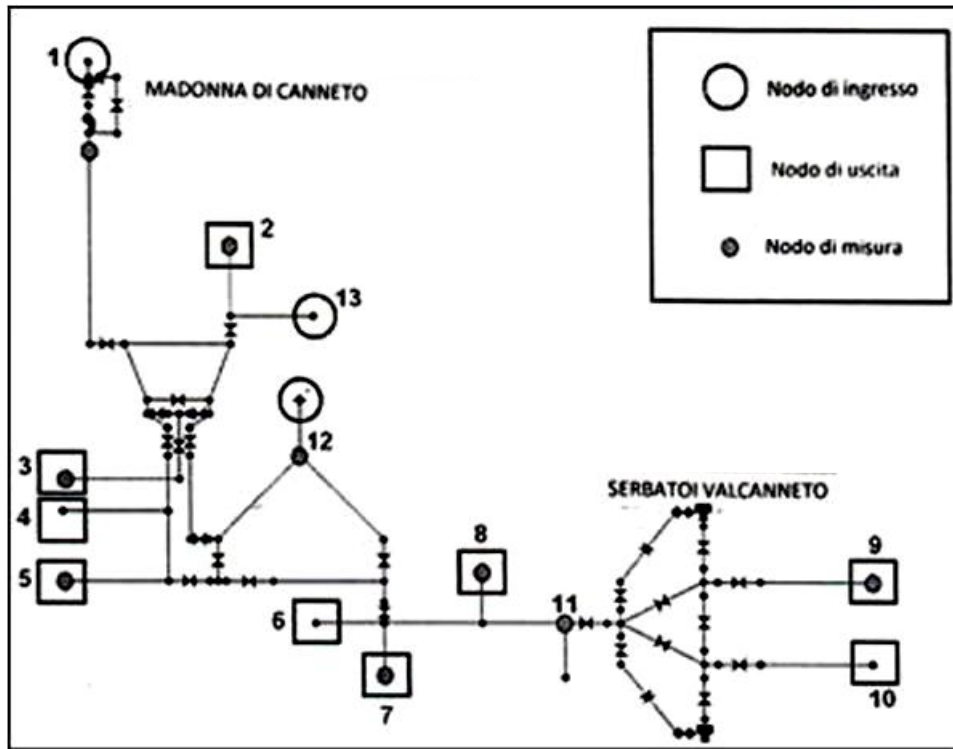


Figura 2 – Acquedotto Aurunci - Valcanneto

Sul primo sono stati utilizzati due modelli cinetici (*Lin - Yeh, 2005* e *Della Greca – Fabbricino, 2008*), mentre per il secondo sono stati impiegati diciotto modelli empirici (progetto *Di Cristo et al., 2013*) e uno cinetico (*Lin - Yeh, 2005*).

Entrambi i tipi di modelli sono stati sottoposti ad una fase di calibrazione, che consiste nel renderli il più possibile conformi alla situazione reale, attraverso il confronto tra i dati calcolati dai modelli stessi e i dati ottenuti da sperimentazioni in laboratorio o da misurazioni sul campo in punti significativi della rete reale, minimizzandone la differenza attraverso l'applicazione del *metodo dei minimi quadrati*.

Applicando questi modelli matematici gli autori hanno ottenuto una stima continua e quasi in tempo reale dei sottoprodotti, usufruendo di *software open source* (EPANET, EPANET-MSX e QGIS con plugin GHydraulics) e commerciali (InfoWorks e InfoWater), con il vantaggio di predire la concentrazione di trialometani lungo la rete

idrica reale confrontandola con i valori derivanti dalle campagne in sito e dalle di laboratorio.

I lavori analizzati evidenziano, per quanto riguarda l'acquedotto Santa Sofia, che risultati leggermente migliori sono ottenibili dal modello *Della Greca - Fabbricino*.

Tra i modelli utilizzati per l'acquedotto Asta degli Aurunci, invece, nessuno ha conseguito in assoluto esito migliore rispetto agli altri, ma ciascuno ha ottenuto risultati più favorevoli in qualche parametro.

L'ultima fase necessaria affinché i modelli siano considerati efficaci e attendibili è la validazione che consiste nel documentare in modo inequivocabile le prestazioni del modello, con particolare riguardo alla riproducibilità dei risultati, confrontando i risultati anche con quelli di modelli già validati e più sofisticati: in particolare è necessario dimostrare l'equivalenza del metodo in esame con un metodo standard. La documentazione che dimostra l'appropriata validazione del metodo impiegato deve essere resa disponibile.

La sequenza ottimale degli esperimenti indispensabili per la validazione, non esistendo linee guida ufficiali, scaturisce dal metodo stesso.

Per avere dati attendibili, sono da valutare il campo di misura (validità), l'esattezza, la ripetibilità, la precisione intermedia, la riproducibilità, l'incertezza di misura.

Relativamente ai lavori analizzati, per i buoni risultati ottenuti dai modelli utilizzati nel caso studio relativo alla rete idrica Santa Sofia, al fine di ottenere un modello sempre valido in condizioni idrauliche eterogenee, è stato proposto di ricalibrarli in altri periodi dell'anno, in funzione delle diverse condizioni climatiche e della differente richiesta di portata da parte dei 25 comuni campani serviti. La nuova campagna di campionamento si è svolta nel periodo giugno – luglio (Figure 3 e 4), mentre la prima aveva avuto luogo a novembre - dicembre.

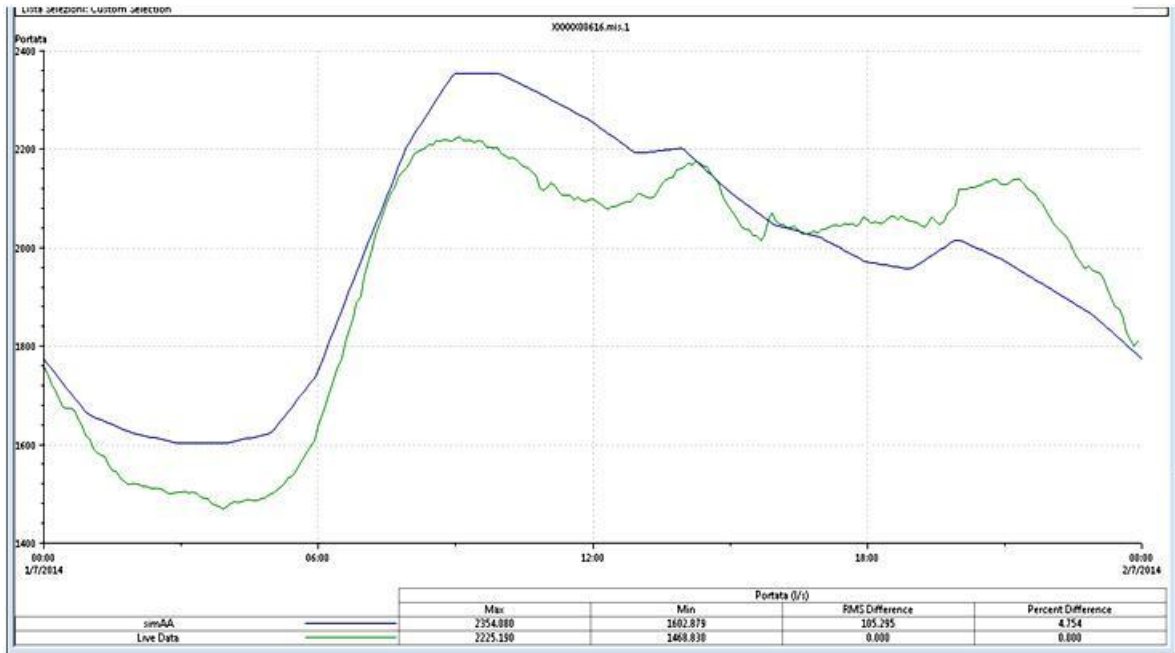


Figura 3 - Grafico di portata giugno-luglio prima della calibrazione

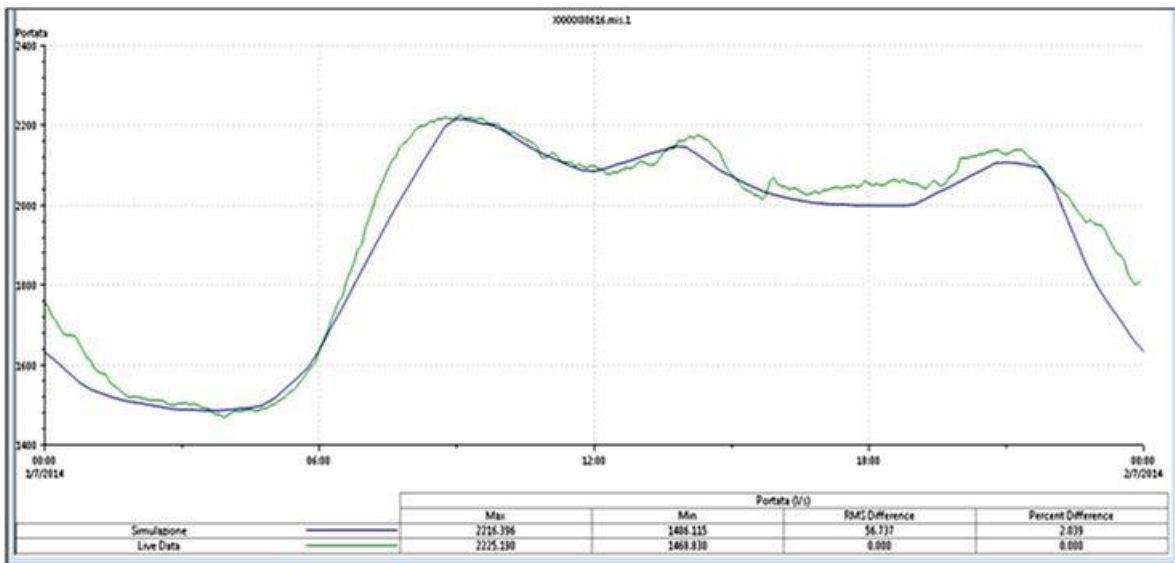


Figura 4 - Grafico di portata giugno-luglio dopo la calibrazione

In conclusione, si può senz'altro affermare che la validazione di un modello deve essere compiuta in modo che si adatti a ogni singolo caso perché nella realtà si verificano situazioni simili ma mai perfettamente uguali.