



FASE

**III ANALISI DELL'IMPATTO ESERCITATO DALL'ATTIVITÀ
ANTROPICA: MECCANISMI DI DIFFUSIONE E VALUTAZIONE
DEI CARICHI INQUINANTI**

ATTIVITÀ

**III.o MODELLAZIONE MATEMATICA DELL'APPORTO E DELLA
DIFFUSIONE DI INQUINANTI NELL'AMBITO DEL SISTEMA
FLUVIALE DI PIANURA**

ELABORATO

III.o/1 Rapporto tecnico

CODICE DOCUMENTO

1 5 7 0 - 0 3 - 5 0 1 0 2 . D O C

02	LUG. 04	M. CARGNELUTTI	M.BUFFO	A.PORCELLANA	
01	MAR. 04	M. CARGNELUTTI	M.BUFFO	A.PORCELLANA	
00	LUG. 03	M. CARGNELUTTI	M.BUFFO	A.PORCELLANA	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE

RIPRODUZIONE O CONSEGNA A TERZI SOLO DIETRO SPECIFICA AUTORIZZAZIONE

Associazione temporanea di imprese

INDICE

1. PREMESSA	1
2. MESSA A PUNTO DEI MODELLI	3
2.1 Modelli idrodinamici	3
2.2 Modello di qualità dell'acqua	5
2.3 Dati qualitativi in <i>input</i>	6
2.4 Applicazione del modello di qualità al caso in studio	7
3. TARATURA DEL MODELLO	11
4. CARATTERIZZAZIONE DELLO STATO QUALITATIVO DELL'ASTA DEL FIUME PO QUANDO SOLLECITATO DA DIVERSI SCENARI DI INTERVENTO	22
5. ANALISI DEI RISULTATI	26
5.1 Considerazioni sugli interventi a scala temporale annuale	28
6. CONSIDERAZIONI SULLE SIMULAZIONI MODELLISTICHE CONDOTTE	40
6.1 Analisi degli interventi già realizzati sull'impianto di depurazione SMAT a Castiglione T.se	41
6.1.1 Breve descrizione dell'impianto e del suo funzionamento	41
6.1.2 Il tratto di Po su cui scarica l'impianto SMAT	41
6.2 L'obiettivo del PsE a Isola S. Antonio	46
6.3 L'area obiettivo "Po tratto metropolitano"	49
APPENDICE 1 - Descrizione del codice di calcolo MIKE 11 - moduli HD, AD e WQ	
APPENDICE 2 - Misure di qualità lungo l'asta del Fiume Po (periodo 1/1/2000-31/12/2002)	
APPENDICE 3 - Attivazione del modello quali-quantitativo all'asta del Tanaro nel tratto S.Martino Alfieri - Montecastello (fase 1)	
APPENDICE 3/1- Schema del tratto simulato e principali risultati delle verifiche di taratura	
APPENDICE 3/2 - Misure di qualità lungo l'asta del Fiume Tanaro	

1. PREMESSA

Nella presente relazione si riassumono alcuni degli elementi conoscitivi raccolti, analizzati ed utilizzati nell'ambito della terza fase del progetto "INDAGINI E STUDI FINALIZZATI ALLA PREDISPOSIZIONE DEL PIANO DI TUTELA DELLE ACQUE DI CUI AL DECRETO LEGISLATIVO 152/1999", denominata **"Analisi dell'impatto esercitato dall'attività antropica: meccanismi di diffusione e valutazione dei carichi inquinanti"**.

Nell'ambito della terza fase del progetto, che riguarda gli aspetti relativi alla qualità delle acque dei corpi idrici regionali, la sottoattività "Modellazione matematica dell'apporto e della diffusione di inquinanti nell'ambito del sistema fluviale di pianura" (attività III.o), è specificamente orientata a mettere a punto una procedura (numerica) in grado di seguire la dinamica degli inquinanti nel sistema fluviale, nelle condizioni attuali e in relazione a scenari derivanti dalle modificazioni indotte sul sistema da opportune opzioni di intervento.

La presente analisi si basa infatti sul quadro conoscitivo costruito attraverso le precedenti attività di studio, che hanno permesso di definire il quadro qualitativo e quantitativo dei corpi idrici regionali, individuando le diverse fonti di inquinamento al fine di rappresentare correttamente l'attuale configurazione del sistema di apporti idrologici, prelievi e scarichi.

La procedura in grado di seguire la formazione ed il trasporto degli inquinanti si basa su alcuni modelli numerici, integrati nel sistema modellistico messo a punto nelle precedenti fasi del progetto. Infatti, i modelli matematici utilizzati per la rappresentazione dei fenomeni di qualità dell'acqua sono strettamente connessi con i modelli rappresentativi della componente quantitativa idrologico-idraulica-idrogeologica.

Il modello di qualità delle acque è stato applicato solo alle aste fluviali con criticità rilevanti, individuate sia sulla base dei dati di monitoraggio, sia dall'analisi di tutte le informazioni sugli impatti antropici; le aste considerate sono state scelte però perché di interesse generale e strategico, ovvero non si è fatto riferimento a problematiche a scala locale; sulle aste prescelte, infatti, è risultato più evidente il riscontro degli impatti delle azioni mirate al risanamento e al recupero di qualità ambientale proposte a scala regionale.

I tronchi fluviali interessati dalla messa a punto del modello di qualità sono inoltre stati selezionati, considerando la consistenza delle informazioni di base disponibili, cioè la geometria delle sezioni fluviali, la pendenza delle aste, la localizzazione sia delle opere in alveo sia delle opere, quali scarichi e derivazioni, che possono influire sulla dinamica delle portate defluenti.

Solo sui principali corsi d'acqua piemontesi è possibile ottenere una discreta definizione delle caratteristiche idrauliche dei tronchi fluviali in esame, poiché questi sono dotati di rilievi topografici recenti e di misure idrauliche effettuate in tutti gli stati idrologici significativi.¹

Fra i tratti fluviali di pianura classificati e interessati da fenomeni inquinanti significativi per le finalità del progetto, individuati in base alle precedenti fasi di studio e caratterizzati da problematiche note e più facilmente correlabili allo stato di compromissione rilevato, e quindi di particolare interesse per la modellazione di qualità, è stato scelto principalmente il Po, dall'area metropolitana torinese fino ad Isola Sant'Antonio, perché è un tratto di alveo esteso e quindi dominante nei processi fisico – chimici delle qualità delle acque dell'area oggetto di studio.

Lo studio è stato compiuto in due fasi distinte:

- **fase 1: taratura dei parametri adottati nelle simulazioni numeriche**

La taratura si basa sulla capacità del modello matematico di riprodurre i dati di qualità disponibili nelle diverse stazioni di misura, i quali sono stati rilevati con una frequenza di campionamento sia mensile per le analisi chimiche e microbiologiche (programma di monitoraggio ARPA Piemonte), sia in continuo per le analisi chimiche e fisiche nella sola stazione di misura del Po a Torino (Murazzi).

I parametri di calibrazione desunti dalle condizioni idrauliche e di qualità attuali sono stati trasferiti nelle applicazioni di carattere modellistico numerico sviluppate nella seconda parte dello studio riguardante la valutazione dei diversi scenari di intervento. Il processo di taratura si è basato sulla riproduzione tramite il modello matematico di alcuni dei parametri di riferimento che caratterizzano la dinamica del fenomeno lungo l'asta fluviale.

- **fase 2: studio di confronto di diverse linee di intervento**

Sulla base della taratura del modello matematico e sulla verifica dell'adeguatezza del modello stesso nel simulare i valori misurati nelle diverse stazioni di riferimento sono stati definiti tre scenari utili per una migliore comprensione dello stato di qualità e delle pressioni gravanti globalmente sull'asta fluviale del fiume Po. Il tratto in studio si estende fino alla sezione di Isola S. Antonio, posta in chiusura della porzione piemontese del bacino del Po e rappresentativa degli apporti puntiformi provenienti dall'area metropolitana torinese, e diffusi, dall'area cuneese.

Le indicazioni ricavate dalle diverse simulazioni condotte allo scopo di valutare le linee di intervento hanno costituito un utile substrato per la corretta definizione degli obiettivi di qualità; inoltre hanno fornito uno strumento di calcolo utile per l'ottimizzazione e la individuazione della priorità degli eventuali interventi.

¹ Per altro, l'attività di gestione idraulica che viene svolta su tutti i siti strumentati della rete di monitoraggio idrometrico della Regione Piemonte permette di conoscere con un buon dettaglio lo stato di alcuni tratti fluviali importanti e di poter monitorare anche visivamente la variabilità delle caratteristiche idrodinamiche in alcuni tratti meno stabili.

Come noto dalla letteratura, i modelli matematici di qualità in grado di riprodurre l'idrodinamica fluviale e la dinamica dei processi chimico-biologici lungo un'asta fluviale hanno delle limitazioni concettuali data la complessità dei fenomeni analizzati. Infatti, i modelli matematici sulla base di una corretta taratura ci permettono di confrontare diversi scenari simulati e di individuare qualitativamente lo scenario che rispecchia maggiormente sia gli obiettivi di qualità, sia la priorità degli interventi.

Occorre comunque sottolineare che dal punto di vista quantitativo i risultati misurati in termini di concentrazione nel tempo, sono sicuramente il migliore punto di riferimento, che si può trovare allo stato attuale, ma è importante chiarire, che tali risultati non possono essere considerati completamente esaurienti data la complessità del fenomeno, le limitazioni dei modelli matematici e la mancanza di lunghe serie di dati di qualità provenienti dalle campagne di campionamento.

A scopo di verifica di fattibilità è stato anche attivato lo stesso modello quali-quantitativo su un tratto del Tanaro compreso tra S.Martino Alfieri e Montecastello, limitatamente alle operazioni di fase 1 sopra richiamate, di cui si richiameranno nel seguito alcuni risultati. L'appendice 3 riporta alcuni elementi significativi dell'attività svolta sul Tanaro, che conferma la fattibilità dell'applicazione modellistica anche su questo tratto di corso d'acqua che possiede, come il Po, la specifica connotazione di asta fluviale di pianura.

2. MESSA A PUNTO DEI MODELLI

Come sopra menzionato, è stato messo a punto un modello idrodinamico e di qualità dell'acqua, basato sul codice di calcolo MIKE 11 del DHI Water & Environment , moduli HD (idrodinamico), AD (advezione-dispersione), WQ (water quality) in assetto monodimensionale e in condizioni di moto vario (vedi descrizione generale dei codici numerici in appendice 1).

Vengono descritte di seguito le caratteristiche del modello idrodinamico e di quello della qualità delle acque utilizzato nel presente studio.

2.1 Modelli idrodinamici

Il modello idrodinamico che ha consentito la successiva applicazione dei moduli di qualità è stato "ritagliato" dal modello idrodinamico complessivo del sistema integrato di simulazione delle acque superficiali e sotterranee costituito dai blocchi di MIKE SHE, MIKE 11 e DAISY che copre la totalità delle aree della regione Piemonte.

La struttura del modello idrodinamico si basa sostanzialmente su quanto sviluppato per il sistema regionale di previsione delle portate.

Per le geometrie descrittive della morfologia fluviale si è fatto quindi riferimento a quanto reso disponibile dal sistema di previsione delle piene. Tutte le sezioni trasversali ricadenti nel tratto in esame sono state inserite nel modello idrodinamico d'asta.

I parametri idraulici caratteristici delle aste fluviali modellate sono conformi al sistema di previsione regionale delle piene, così come le geometrie delle strutture interferenti con il deflusso della corrente.

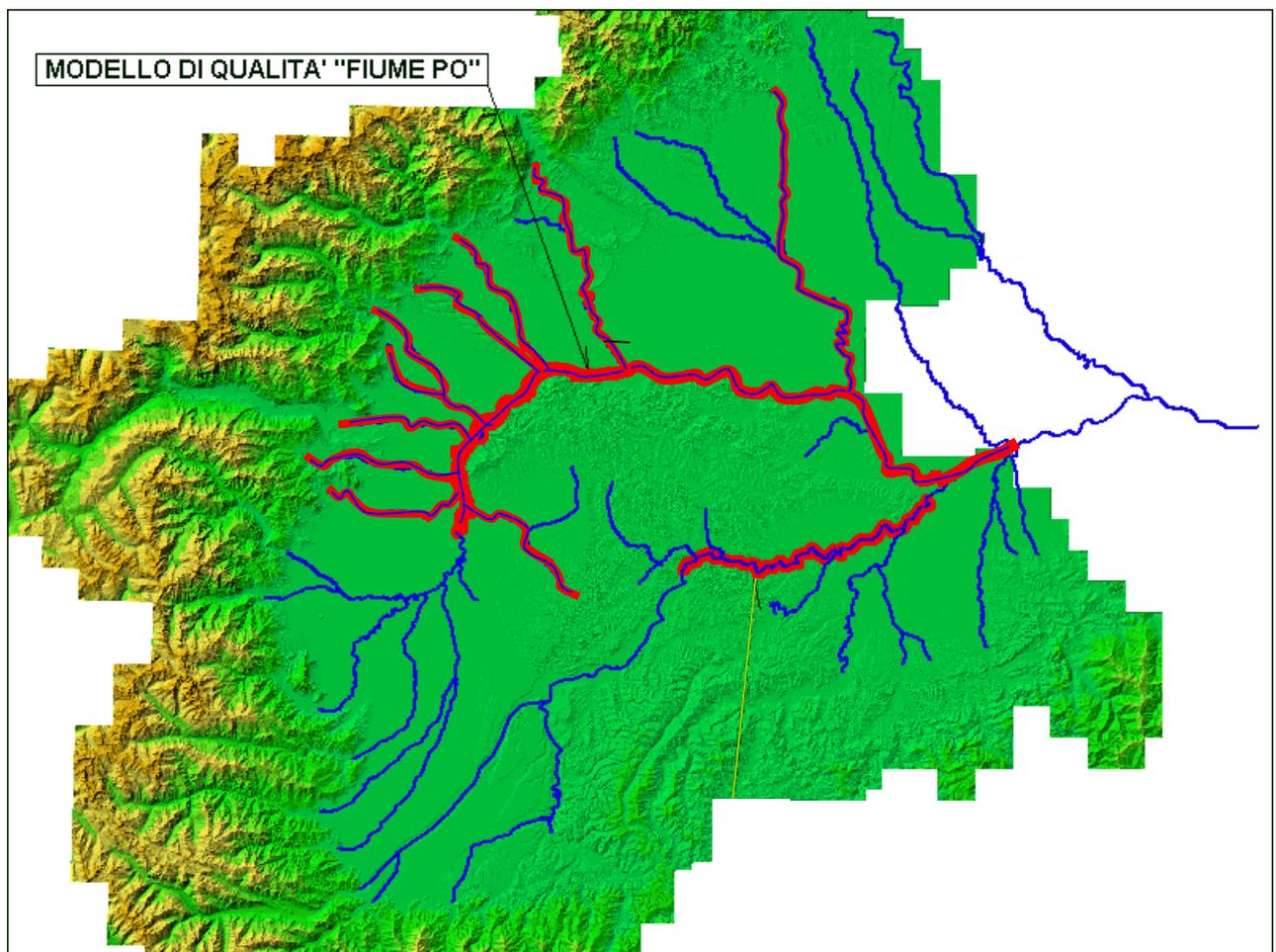


Figura 1 - Schematizzazione delle aste del Po e del Tanaro utilizzate nella simulazione numerica, con i principali affluenti.

Il modello idrodinamico costruito per la prima fase dello studio utilizza come condizioni al contorno di monte:

- gli idrogrammi di portata calcolati dal modello integrato per il triennio di riferimento 2/9/1999-30/8/2002 in corrispondenza dell'inizio di ciascun tratto e delle principali confluenze degli affluenti;

- gli idrogrammi di portata in ingresso dai bacini residui, determinati per lo stesso periodo di tempo dal modello idrologico NAM del DHI *Water & Environment*, modello concettuale a parametri concentrati;
- ulteriori apporti di portata in alveo derivanti dai modelli DAISY e MIKE SHE.

Come condizione al contorno di valle è stata imposta una scala delle portate in condizioni di moto uniforme. Tale condizione è da ritenersi compatibile con la dinamica del fenomeno, dati i tempi di propagazione delle perturbazioni lungo l'asta in studio.

Al fine di rappresentare le derivazioni dal reticolo superficiale, sono state inserite infine le serie temporali di portata derivata desunte dal modello di bilancio MIKE BASIN. Le derivazioni sono quindi state trattate come afflussi di portata negativi.

Il modello idrodinamico così costruito è in grado di simulare la dinamica d'asta ed il comportamento delle acque superficiali, con una risoluzione temporale molto dettagliata, in quanto il passo di calcolo, vincolato da problemi di stabilità numerica del sistema, deve essere mantenuto nell'ordine dei 10-20 minuti.

Nella figura 1 viene rappresentato il tratto dell'asta del Po simulata, che si estende da una sezione posta nei dintorni di Carignano fino alla sezione di Isola S. Antonio, sezione di chiusura dell'intera porzione piemontese del bacino del Po. L'area del bacino idrografico del fiume Po studiata considera i numerosi affluenti di sinistra caratterizzati da un regime prevalentemente alpino e di portate maggiori rispetto agli affluenti di destra caratterizzati normalmente da un'elevata quantità di detriti. Nella simulazione di qualità è stata considerata la sola asta del fiume Po, mentre gli affluenti sono stati considerati nella simulazione numerica come immissioni localizzate di portata e di carichi di natura organica e inorganica.

2.2 Modello di qualità dell'acqua

Il modello "qualitativo" ha consentito sia la simulazione dello stato attuale sull'asta di interesse, sia la simulazione degli scenari previsti dalle azioni pianificate.

In generale, lo schema-base di simulazione e analisi dei risultati nello "scenario dinamico" è così articolato:

- simulazione continua dei deflussi giornalieri nel tratto fluviale di interesse con *input/output* di portata dal modello idrologico (aste e contributi di bacino residuo distribuiti o attraverso gli affluenti naturali) e dal sistema di scarichi/derivazioni in base ai dati conoscitivi acquisiti ed elaborati nelle precedenti fasi di attività;
- attribuzione dei carichi in *input* alla testata dell'asta, sugli scarichi puntuali e distribuiti, sulle derivazioni in base ai dati acquisiti ed elaborati nell'ambito delle specifiche attività o a successivi scenari programmati riferiti a specifici obiettivi di risanamento;

- simulazione con il modello di qualità dell'evoluzione dei carichi/concentrazioni lungo l'asta;
- individuazione di sottotratti omogenei caratterizzati da una sezione rappresentativa;
- definizione delle curve di durata delle concentrazioni nel periodo simulato.

2.3 Dati qualitativi in *input*

L'ARPA, Agenzia Regionale per la Protezione ambientale, nell'ambito delle sue attività istituzionali e con particolare riferimento alle attività per la predisposizione del PTA, cura le indagini in campo sui siti di campionamento e le successive elaborazioni dei dati, finalizzandole alla valutazione dello stato di qualità ambientale dei corpi idrici naturali (corsi d'acqua e laghi) e dei più significativi corpi idrici artificiali.

Sono pertanto disponibili, sistematizzati dal gennaio 2000, i dati di concentrazione dei principali parametri qualitativi rilevati su circa 200 punti della rete di campionamento manuale, gestita attraverso indagini su base mensile o trimestrale, che integra la rete fissa costituita da oltre 20 stazioni di misura della qualità dell'acqua sulle principali aste fluviali.

Tutti i dati disponibili nell'ambito del tratto del corso d'acqua modellato sono stati inseriti nel formato richiesto per l'utilizzo nel modello di qualità.

I dati di monitoraggio qualitativo disponibili riguardano sostanzialmente valori di concentrazione misurati in diversi punti lungo l'asta fluviale, i quali risultano discontinui nello spazio e nel tempo, non permettendo di seguire l'evoluzione temporale dei processi qualitativi, né tanto meno di analizzare lo stato qualitativo osservato in riferimento alla particolare condizione idrologica esistente al momento della misura. Ciò nonostante, i dati costituiscono una buona base informativa per la caratterizzazione dello stato qualitativo delle acque e per la taratura del modello numerico. I dati hanno una valenza media mensile, pertanto nel modello di qualità possono essere valutati solo gli effetti di natura "cronica" legati alla presenza degli inquinanti, ma non gli effetti puntuali o "acuti" legati ad alti valori di concentrazione delle sostanze inquinanti scaricati a seguito dei fenomeni di piovosità intensa.

Nel processo di taratura sono stati utilizzati anche i dati misurati in continuo, per la finestra temporale 2000-2002, dalle stazioni automatiche della rete regionale di monitoraggio dislocate sull'asta del Po.

Tali dati relativi alle stazioni di misura di Carignano e Torino (Murazzi) sono stati utilizzati in parte come condizione al contorno di monte nella stazione di Carignano e in parte come parametri di riferimento per la taratura del modello matematico nella stazione automatica di monitoraggio di Torino (Murazzi).

Nel primo caso sono stati adottati i dati di temperatura e di ossigeno disciolto alla sezione di Carignano a monte del tratto in studio; mentre i dati a Torino – Murazzi (ossigeno disciolto,

temperatura) sono stati confrontati con i risultati generati in continuo dal modello matematico nella medesima stazione di riferimento.

Tutti i dati disponibili per la taratura del modello nelle 10 stazioni presenti nel tratto in studio sono riportati nell'appendice 2.

Le misure delle campagne di campionamento a scala mensile riportate nell'appendice 2 vengono illustrate per la finestra temporale compresa tra il 27 gennaio 2000 e il 16 dicembre 2002 (periodo di riferimento di trentasei mesi). Le misure di alcuni dei parametri di base obbligatori secondo i protocolli ARPA (BOD₅, COD, N e P) sono rappresentate in forma adimensionale rispetto alla massima concentrazione (mg/l) registrata, per ciascun parametro di riferimento, nei due anni di campionamento. La variazione temporale è stata adimensionalizzata rispetto alla finestra temporale di durata trentasei mesi.

2.4 Applicazione del modello di qualità al caso in studio

Per quanto attiene a questa specifica applicazione (modelli di qualità del tratto di pianura del Po) si è optato per un modello di qualità di "livello 3" (vedi appendice 1), comprensivo degli effetti del fosforo disciolto e particolato sulla sostanza organica.

Questa scelta è derivata dalla necessità di rappresentare gli effetti dei nutrienti (N e P) nel ciclo dell'ossigeno senza rendere troppo onerosi i calcoli e complicare le operazioni di identificazione parametrica.

Inoltre, la scelta del modello di qualità che considera l'interazione tra il BOD₅ e il fosforo disciolto e particolato e l'azoto totale espresso in forma di nitrati NO₃, nitriti NO₂ e ammoniaca in forma dissociata NH₄ e indissociata NH₃ è stata effettuata data la non disponibilità delle informazioni fisico-chimiche relative al materiale solido in sospensione e al materiale solido depositato sul fondo. Tale informazione avrebbe permesso l'implementazione di un modello di qualità sicuramente più completo in grado di simulare in modo maggiormente dettagliato la realtà fisica del fenomeno.

Occorre sottolineare che, nel caso particolare del fosforo particolato e disciolto, diventa fondamentale la conoscenza dei fenomeni dinamici dovuti all'interazione dei processi del ciclo del fosforo sia con il materiale in sospensione, sia con il materiale solido depositato sul fondo.

Il modello utilizzato prende in considerazione i processi di convezione e dispersione e i più importanti processi biologici, chimici e fisici, consentendo il calcolo delle variazioni nello spazio e nel tempo delle concentrazioni di ossigeno disciolto (DO), della domanda biochimica d'ossigeno (BOD₅), dell'ammoniaca (NH₄) e dei nitrati (NO₃), del fosforo disciolto e particolato.

Il modello matematico richiede come condizione di input il fosforo in forma particolata e disciolta, mentre i dati forniti da ARPA si riferiscono al fosforo totale e agli ortofosfati.

Si è quindi dovuto procedere durante la fase di taratura alla scelta della porzione percentuale del fosforo totale da assegnare alla componente particolata e disciolta.

Sulla base di indicazioni di letteratura che nei sistemi acquatici, sia fluviali che lacustri, il rapporto tra disciolto e particolato varia infatti da 3:1 a 10:1 si è proceduto per tentativi alla definizione delle percentuali da adottare nel modello matematico, tenendo come punto di riferimento il valore della massa cumulata di fosforo totale alla sezione di Isola S. Antonio che risulta dall'integrazione della serie di dati temporali forniti da ARPA nella medesima sezione.

Per quanto riguarda i carichi sversati dal depuratore SMAT si è assunto per il fosforo particolato e disciolto lo stesso criterio sopra descritto, mentre per le forme azotate (azoto totale N) si assume la ripartizione (NO_3 70 %, NH_4 7 %, NH_3 10 % e N organico 13%) .

I processi di qualità vengono rappresentati con cinetiche lineari del primo ordine ($dC/dt \sim C$); la dipendenza dalla temperatura per mezzo di termini di Arrhenius ($\ln(dC/dt \sim T)$), con T temperatura dell'acqua del fiume); la decelerazione della reazione di degradazione per basse concentrazioni di alcuni parametri, con termini del tipo ($dC/dt \sim K/(K+C)$).

Il tipo di rappresentazione dei fenomeni biochimici e biologici è "macroscopico", nel senso che le equazioni di scambio di massa e di degradazione consentono di rappresentare le valutazioni complessive nella qualità dei diversi composti analizzati, mentre non vengono presi in considerazione i processi biochimici effettivi che si esplicano a "microscala".

Dal punto di vista idrodinamico, è apparso lecito "disaccoppiare" il modulo HD da quello AD e di qualità (WQ), in quanto trattasi di sostanze inquinanti per lo più disciolte in fase liquida e comunque in concentrazioni modeste, tali da non alterare apprezzabilmente le caratteristiche fisiche del fluido (densità, viscosità).

I parametri dell'equazione del modulo di qualità delle acque sono basati su valori standard di letteratura. Alcuni di tali parametri dipendono strettamente dalle condizioni locali temporali e una taratura per la determinazione dei valori locali è stata effettuata sulla base della valutazione sia del fosforo totale che dell'azoto nitrico NO_3 .

Occorre sottolineare che essendo i dati misurati da ARPA a cadenza temporale (mensile) per poter riprodurre in dettaglio in diverse sezioni le variazioni dei fenomeni di interesse si è ricorso a una taratura anche basata sul confronto del bilancio di massa nella sezione di chiusura a Isola Sant'Antonio.

I parametri per il Modulo di Convezione-Dispersione adottati sono:

- Dispersion Factor: 35
- Exponent: 1
- Min. Coeff.: 15
- Max. Coeff.: 50

Il dominio di calcolo è schematicamente rappresentato nella figura 2 (asta del Po). In essa sono anche indicati i punti corrispondenti alle condizioni al contorno per il modello idrodinamico (HD) e per il modello di trasporto e di qualità di livello 3 (AD-WQ) e le stazioni di misura. Inoltre vengono posizionate le stazioni di “analisi numeriche” definite in figura come “flag” per la validazione e confronto delle diverse ipotesi di intervento simulate nella seconda fase dello studio.

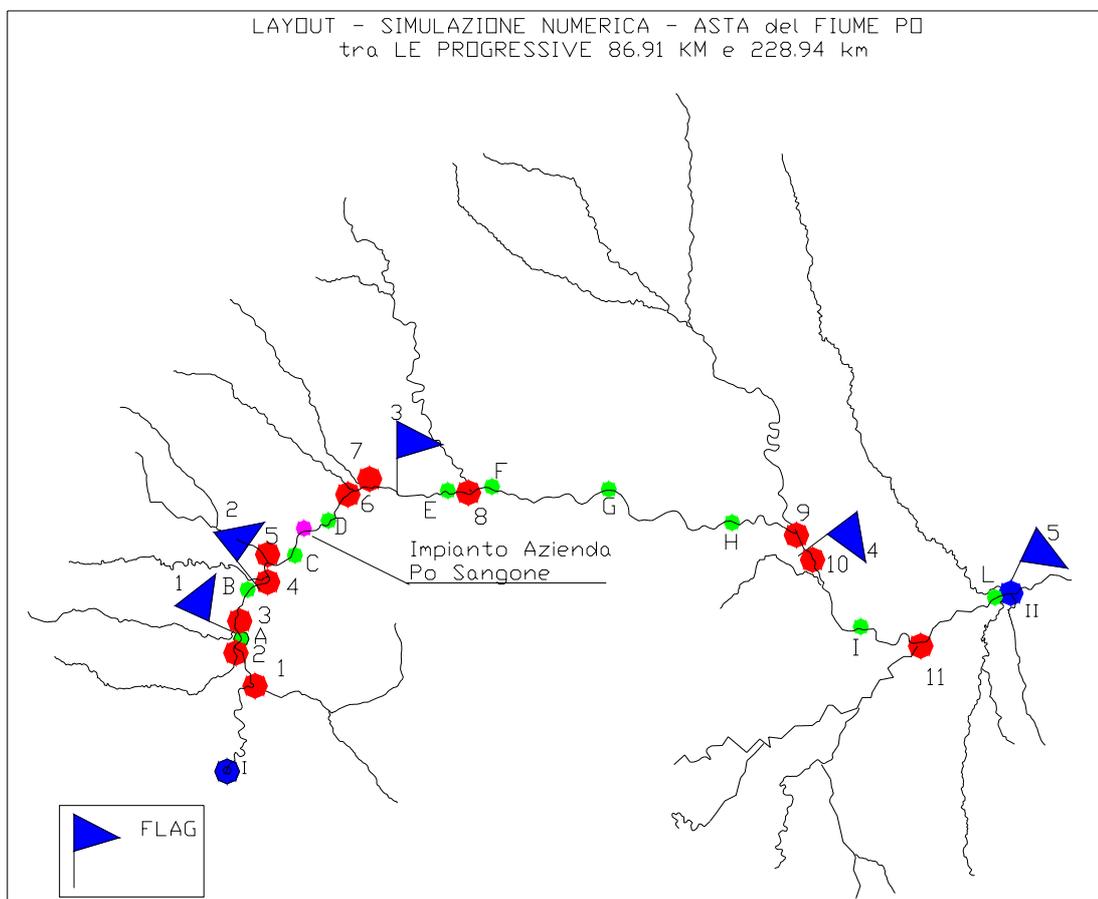


Figura 2 - Rappresentazione del layout adottato nelle simulazioni numeriche condotte.

IMMISSIONI:	STAZIONI DI MISURA:
1 <i>Banna</i> progressiva 93.52 Km	A <i>Moncalieri</i> progressiva 99.90 Km
2 <i>Chisola</i> 99.50 Km	B <i>Torino</i> 108.20 Km
3 <i>Sangone</i> 102.90 Km	C <i>S. Mauro</i> 116.70 Km
4 <i>Dora Riparia</i> 111.30 Km	D <i>Brandizzo</i> 129.20 Km
5 <i>Stura di Lanzo</i> 113.60 Km	E <i>Lauriano</i> 141.50 Km
6 <i>Malone</i> 129.90 Km	F <i>Verrua Savoia</i> 150.36 Km
7 <i>Orco</i> 131.20 Km	G <i>Trino</i> 167.73 Km
8 <i>Dora Baltea</i> 146.58 Km	H <i>Casale Monferrato</i> 184.20 Km
9 <i>Sesia</i> 195.42 Km	I <i>Valenza Po</i> 207.52 Km
10 <i>Rotaldo</i> 204.16 Km	L <i>Isola San Antonio</i> 228.94 Km
11 <i>Tanaro</i> 223.20 Km	
Depuratore: SMAT - Progressiva 121.66 Km	FLAG: <i>progressiva in cui è stata calcolata la serie temporale</i>
I Condizione al contorno monte: Q(t) progressiva 86.91 Km	FLAG 1: progressiva 100 Km;
II Condizione al contorno valle: z(t) progressiva 228.94 Km	FLAG 2: 109 Km;
	FLAG 3: 133 Km;
	FLAG 4: 197 Km;
	FLAG 5: 228 Km.

Nello specifico, le condizioni per il modello HD sono poste in termini di flussi entranti (Q assegnate) o di livelli (h assegnate), mentre per il modello AD-WQ consistono in concentrazioni delle specie considerate (T, BOD, DO, fosforo disciolto, fosforo particolato, NH₃, NH₄, NO₃, NO₂) e nelle portate che le veicolano in corrispondenza dei nodi di estremità (*upstream*, *downstream*) e dei nodi intermedi (*lateral inlet*).

Come precedentemente menzionato, le condizioni al contorno del modello idrodinamico (HD) sono state dedotte dai risultati del modello integrato di simulazione delle acque superficiali e sotterranee a scala regionale, messo a punto nell'ambito del presente studio, come rappresentato nella figura 3.

I dati disponibili fanno riferimento ad una finestra temporale che si estende dal 27.01.2000 al 10.10.2002, mentre lo studio è stato condotto utilizzando due differenti finestre temporali: una che si estende dal 25.07.2000 al 25.07.2001, l'altra dal 10.06.2001 al 10.06.2002. Questa scelta è stata condizionata dai tempi di calcolo imposti dalle condizioni di stabilità del modello di qualità e dalla fisica stessa del fenomeno, dal momento che si è ritenuto che queste finestre temporali descrivessero di fatto due differenti condizioni idrologiche del sistema fluviale (periodi di piena o "magre umide" e periodi critici di magra perdurante).

Le portate medie valutate per i due periodi nella sezione di chiusura di Isola S. Antonio sono

- portata media anno "umido" (25.07.2000 - 25.07.2001) : 477 m³/s;
- portata media anno "secco" (10.06.2001 al 10.06.2002): 262 m³/s.

In particolare la seconda finestra rappresenta la situazione di maggiore criticità dal punto di vista idrologico per i due anni disponibili; infatti la serie temporale compresa tra giugno 2001 e giugno

2002 è caratterizzata da portate di magra più estese. La portata media annua nella finestra temporale adottata è quindi pari a 262 m³/s alla sezione d'Isola S. Antonio come risulta dall'integrazione della serie temporale delle portate generate dal modello matematico.

Come sopra menzionato, per quanto attiene invece al modello di trasporto-dispersione (AD) e di qualità delle acque (WQ), sono stati impiegati dati misurati (concentrazioni) in corrispondenza delle confluenze principali, nonché gli scarichi degli impianti di depurazione principali presenti nel tratto dell'asta idrica studiata, ovvero in particolare l'Impianto Azienda Po Sangone localizzato a progressiva km 121.664.

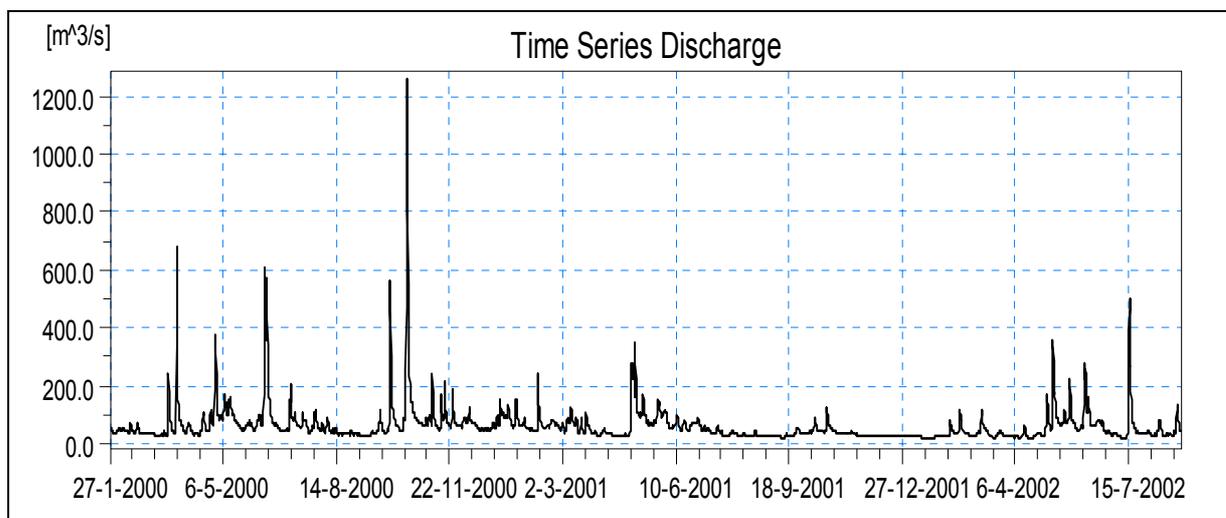


Figura 3 - Condizione al contorno idrodinamica di monte per l'asta del Po considerata nella condizione di stato di fatto.

In fase di calibrazione, è risultato evidente che variazioni dei valori dei parametri, entro un intervallo fisicamente ragionevole, danno un modesto contributo in termini di distribuzioni spazio-temporali delle concentrazioni per le specie indice considerate (T, BOD, DO, fosforo disciolto, fosforo particolato, NH₃, NH₄, NO₃, NO₂); ciò in ragione delle continue immissioni lungo l'asta principale in esame, che diventano dominanti nell'evoluzione dei processi fisico chimici.

3. TARATURA DEL MODELLO

In questa fase del progetto denominata *fase 1* sono state eseguite delle simulazioni numeriche allo scopo di tarare i parametri inerenti sia al modello di convezione – dispersione che al modello di qualità delle acque.

Per verificare la bontà della taratura del modello, le serie temporali generate dal modello matematico relative al fosforo totale (somma del fosforo particolato e disciolto) e all'azoto nitrico NO₃ sono state

confrontate con alcune delle misure di qualità disponibili in corrispondenza delle seguenti stazioni di misura (tra quelle riportate nelle appendici 2):

- Po a Moncalieri (prog. km. 99.885);
- Po a Torino (prog. km. 108.20);
- Po a Lauriano (prog. km 141.50)
- Po a Casale Monferrato (prog. km 184.20)
- Po a Isola Sant'Antonio (prog. km 228.94).

Come sopra menzionato il processo di taratura è stato effettuato sia sulla base del campionamento dei dati forniti da ARPA a scala mensile, sia sui dati in continuo forniti alla stazione automatica di Torino (Murazzi).

La procedura si è basata sulla variazione delle costanti di carattere empirico che rappresentano il ciclo dei nutrienti all'interno del modello; infatti i composti organici dell'azoto e del fosforo sono soggetti a reazioni di trasformazione, di natura prevalentemente biologica, che ne comportano il passaggio attraverso le diverse componenti del sistema fluviale fino ad arrivare alle forme inorganiche ossidate.

Inoltre, occorre sottolineare che l'interazione tra fosforo particolato, il materiale di fondo e i processi di sedimentazione nei periodi di magra non sono considerate direttamente nel modello di qualità adottato (livello 3); pertanto per ottenere una taratura più vicina alla realtà si è ritenuto preferibile attribuire un maggiore "peso" alla percentuale di fosforo disciolto che a quella particolata, la quale non interagisce con i processi biologici simulati, nello schema concettuale adottato nel modello matematico. Infatti, il rapporto tra fosforo disciolto e particolato che ha fornito i migliori risultati varia tra 5:1 e 8:1.

Il parametro di riferimento per la taratura è stato il fosforo totale calcolato come la somma del fosforo disciolto e del fosforo particolato. Inoltre è stato adottato, come ulteriore parametro l'azoto nitrico NO_3^- .

La sezione di riferimento per la validazione di tutti gli interventi di carattere parametrico all'interno del modello "concettuale" di qualità è stata la sezione ad Isola S. Antonio. Infatti sono state condotte diverse simulazioni numeriche relative allo stato di fatto finché il bilancio di massa dei due parametri di riferimento fornivano lo scarto minimo tra i dati misurati ARPA a scala mensile e quelli generati dal modello a scala oraria.

L'applicazione congiunta dei moduli HD-AD-WQ del pacchetto MIKE 11 ha permesso di ricostruire le serie temporali delle sostanze inquinanti di riferimento per il tratto in esame.

Pur nei limiti di un'indagine di massima, la corrispondenza del modello con i rilievi in alveo può dirsi relativamente buona per quasi tutte le stazioni adottate nel processo di taratura.

Bisogna comunque evidenziare come durante gli eventi di piena all'aumento della quota di fosforo proveniente dal dilavamento dei suoli va ad aggiungersi la quota dovuta alla risospensione dei sedimenti fluviali, particolarmente ricchi di fosforo, i quali si sono sedimentati nei lunghi periodi di tempo secco. In questo caso il modello non è in grado di riprodurre tale dinamica.

Ciò nonostante, l'escursione tra i valori di picco e flusso di base delle sostanze di riferimento (fosforo totale e azoto nitrico NO_3) appare congruente alle misure in quasi tutte le stazioni tranne nella stazione di Casale Monferrato dove vengono riprodotti l'andamento del fosforo correttamente solo nella stagione invernale, mentre per le stagioni umide i valori riprodotti dal modello matematico si discostano ampiamente da quelli misurati.

Tuttavia, per quasi tutte le stazioni di misura esaminate, l'accordo non si ha solo negli ordini di grandezza, si riscontra, infatti, che l'andamento medio delle concentrazioni rappresentate nelle figure 4, 5, 6, 7 e 8 è molto prossimo all'andamento misurato. Sul sincronismo tra i picchi di concentrazioni (simulati e osservati) è piuttosto difficile esprimere delle valutazioni conclusive data la cadenza temporale elevata delle misure.

Come sopra menzionato, il punto di riferimento per la taratura del modello corrisponde alla stazione di misura di Isola S. Antonio dove si è messo a confronto oltre l'andamento temporale dei parametri di riferimento (fosforo totale e azoto nitrico riportati nelle figure 9 e 10) il valore della massa cumulata nell'anno di riferimento.

Nel primo caso -andamento temporale- i risultati mostrano la congruenza dei valori di picco e flusso di base delle concentrazioni, mentre i valori medi calcolati come

$$\hat{C} = \frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_f} C(t) dt$$

dove:

C : concentrazione media riferita al periodo di riferimento;

T : $t_f - t_i$ è la durata del periodo di riferimento espressa in secondi (10/06/2001 – 10/06/2002);

dt : è la durata della concentrazione puntuale;

sono perfettamente congruenti con i valori integrati riportati da ARPA; infatti la concentrazione media ARPA è pari a 0.1543 mg/l, mentre il valore che risulta dalla simulazione numerica è 0.1526 mg/l.

Le curve cumulate di fosforo e azoto nitrico ad Isola S. Antonio messe a confronto con i dati ARPA mostrano una sovrastima da parte del modello pari al 18 % per il caso del fosforo totale e dell' 1 % per l'azoto nitrico. Tale differenza è da ritenersi perfettamente compatibile con le approssimazioni fisico – matematiche adottate nelle simulazioni numeriche (vedi figure 9 e 10).

Va anche nuovamente sottolineato che, in relazione alle velocità delle correnti fluviali ed alle distanze tipiche tra i diversi punti di immissione dei carichi inquinanti, i tempi caratteristici di evoluzione delle variabili indice di qualità sono di gran lunga inferiori rispetto agli intervalli di misura dei dati disponibili (15-30 giorni). Ciò preclude a priori la possibilità di una verifica e taratura dei parametri relativi alla dispersione meccanica nonché di quelli relativi ai processi biochimici in atto, che risultano determinanti nel distinguere il semplice trasporto advettivo da quello diffusivo di natura turbolenta e dagli effetti di scomparsa delle singole sostanze.

In proposito, sono stati confrontati i risultati del modello matematico con i dati acquisiti in continuo nella stazione di monitoraggio di Torino (Murazzi). Il confronto è stato eseguito sia per l'ossigeno disciolto che per la temperatura nell'anno di riferimento. Nelle figure 11 e 12 viene rappresentato l'andamento temporale delle due grandezze citate mostrando la bontà dei risultati numerici. La differenza dell'ossigeno disciolto nella prima fase della simulazione (all'incirca di 1.2 mg/l) è imputabile alle semplificazioni richieste dal modello stesso che comporta la sovrastima di alcuni parametri presenti nel bilancio dell'ossigeno disciolto i quali sono rilevanti in alcuni istanti lungo il transitorio; tuttavia tali discordanze possono ritenersi accettabili dato il campo di variazione in cui sono contenute.

Si può infine concludere che il processo di taratura in termini globali appare congruente con le misure. Infatti ad Isola S. Antonio i valori cumulati dei parametri di riferimento (fosforo totale e azoto nitrico) possono ritenersi accettabili; mentre i valori medi di concentrazione sono perfettamente identici.

Durante la fase di taratura sono state condotte alcune prime simulazioni allo scopo di valutare l'effetto sui carichi veicolati di due derivazioni presenti lungo l'asta in esame: il canale Cavour a Chivasso e il canale Lanza a Casale.

Le condizioni al contorno aggiuntive relative alle due derivazioni inducevano delle vistose instabilità numeriche sui tratti di valle, che rendevano i dati ad Isola S. Antonio poco significativi. Si è reso, pertanto, necessario non considerare, per ora, le due derivazioni nel modello di qualità, dal momento che, come ricordato in precedenza, la taratura è stata condotta sulla base del confronto degli integrali di massa dei dati ARPA e dei dati risultanti dalla simulazione numerica anche e specialmente nella sezione di Isola S. Antonio.

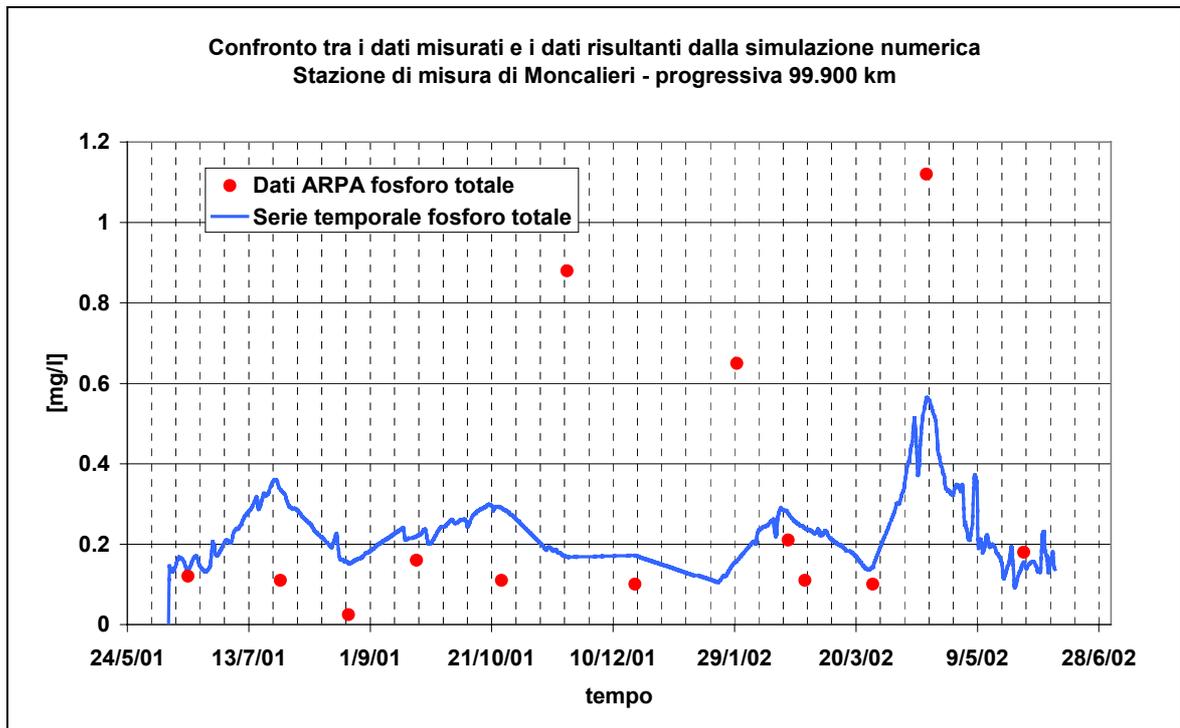


Figura 4a - Stazione di Moncalieri – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per il fosforo totale e disciolto.

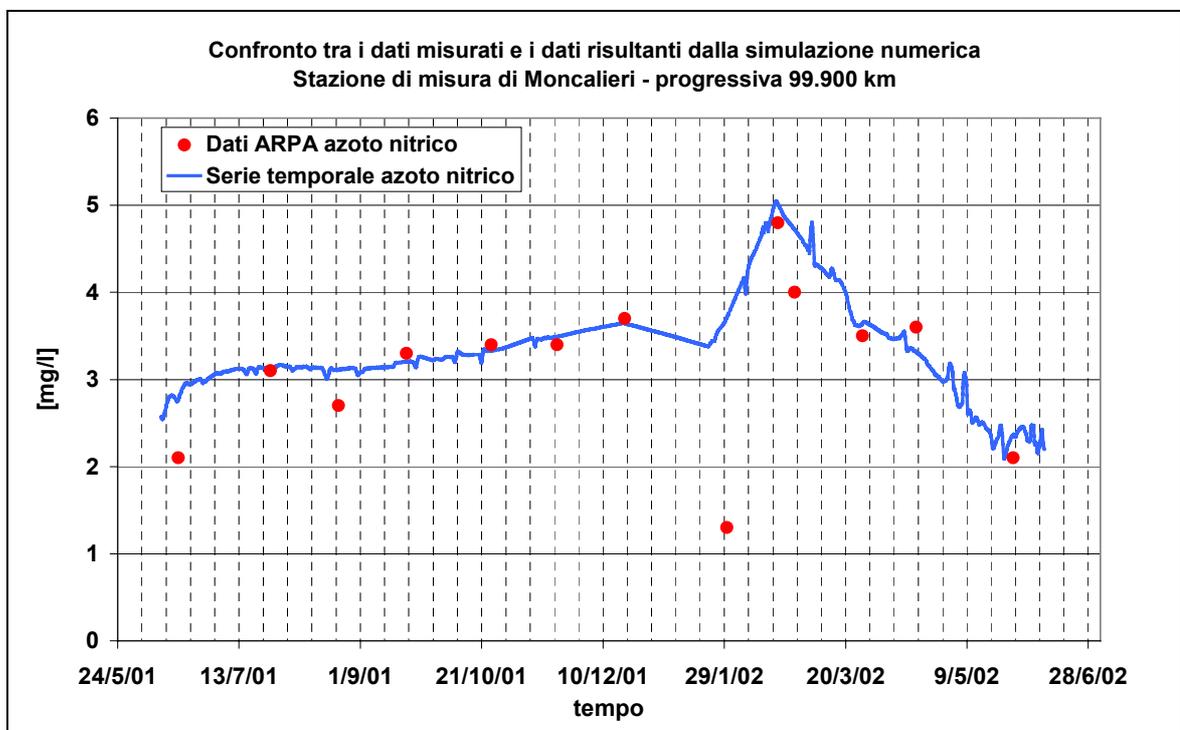


Figura 4b - Stazione di Moncalieri – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per l'azoto nitrico.

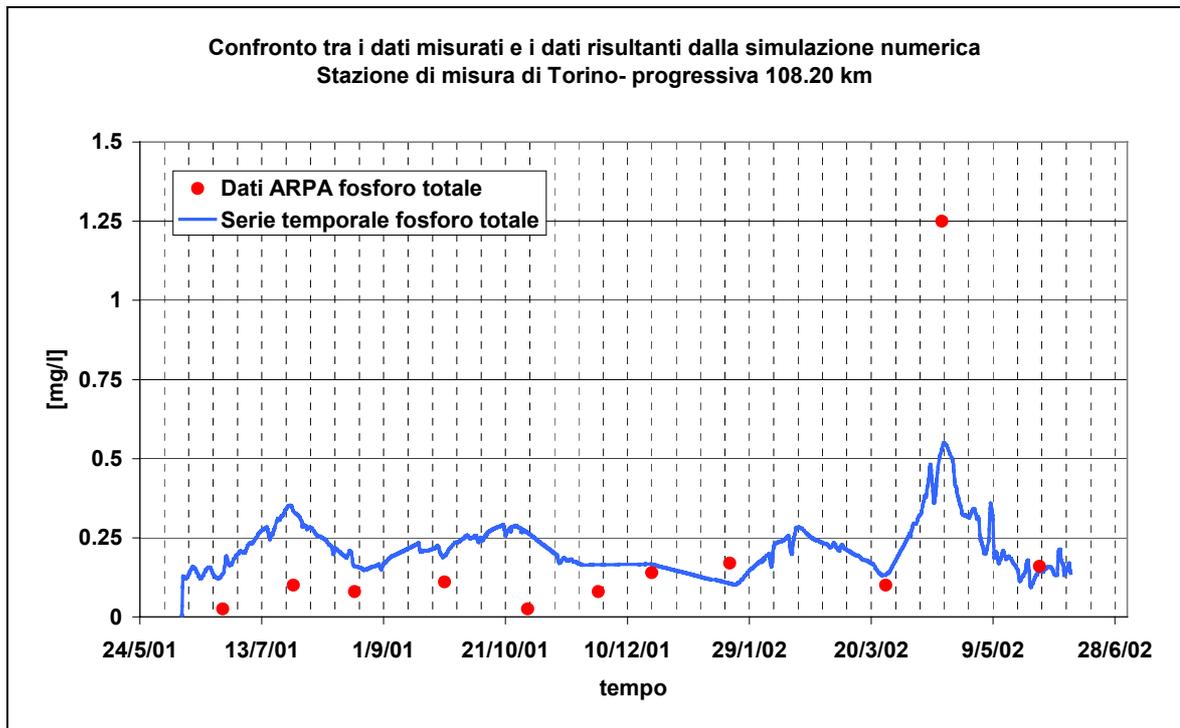


Figura 5a - Stazione di Torino – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per il fosforo totale

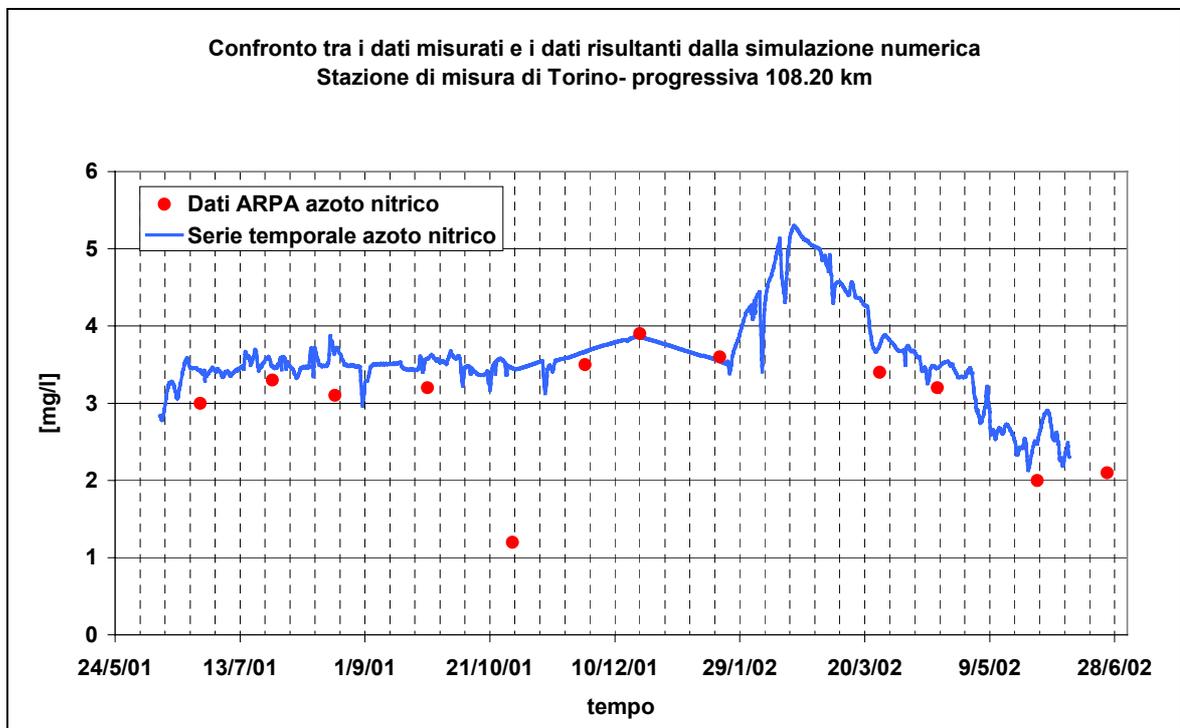


Figura 5b - Stazione di Torino – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per l'azoto nitrico

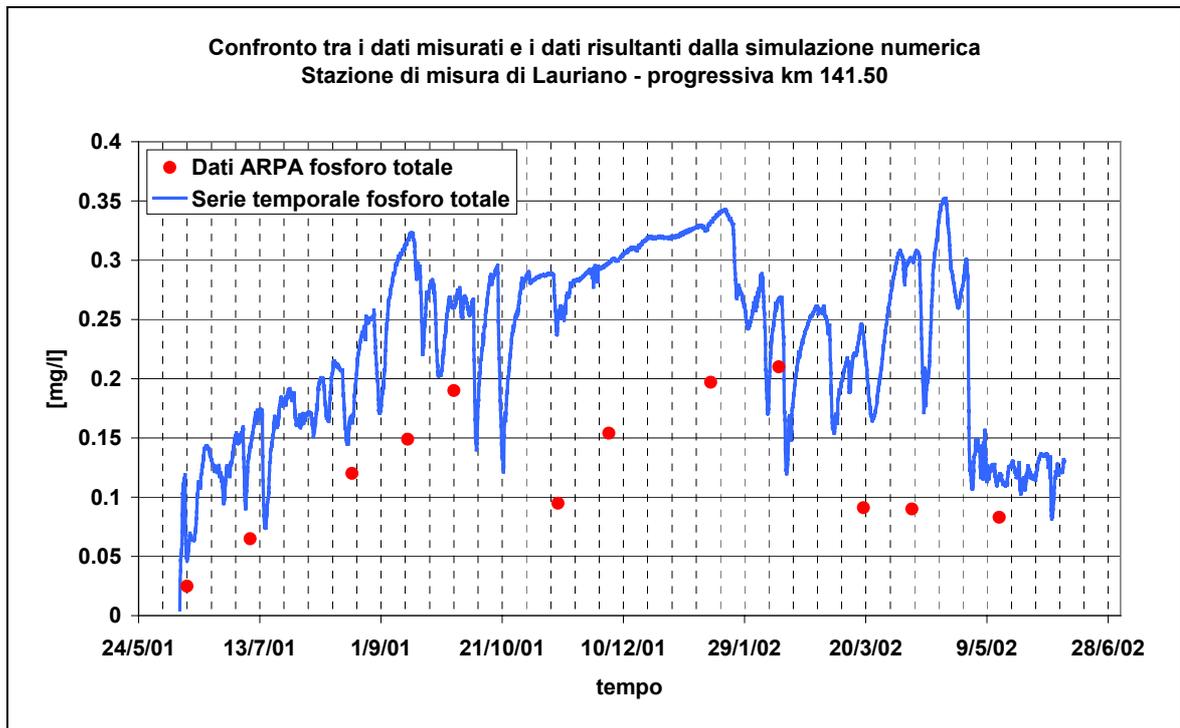


Figura 6a - Stazione di Lauriano – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per il fosforo totale

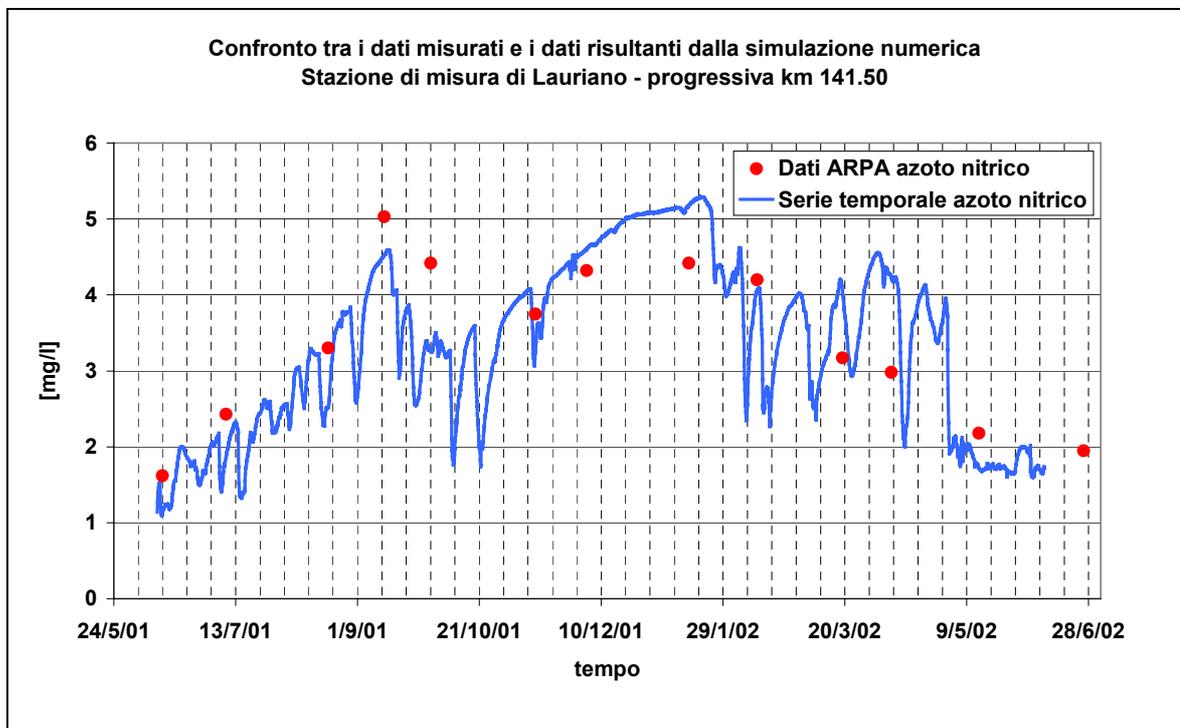


Figura 6b - Stazione di Lauriano – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per l'azoto nitrico

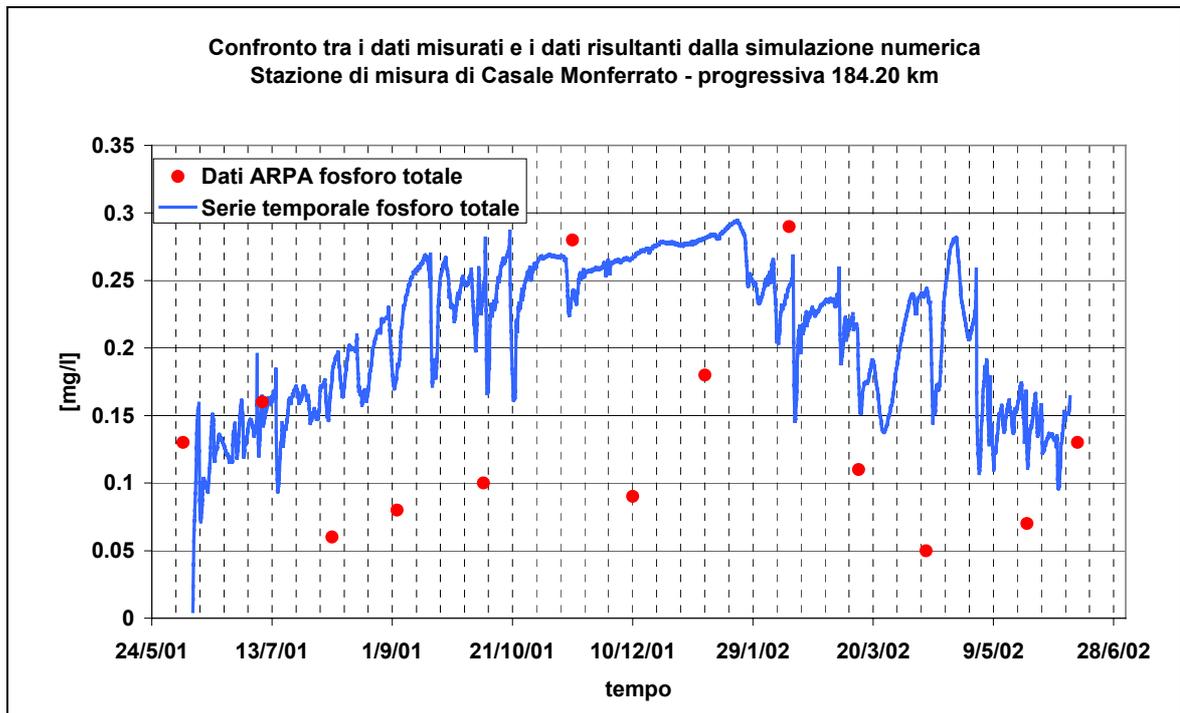


Figura 7a - Stazione di Casale Monferrato – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per il fosforo totale.

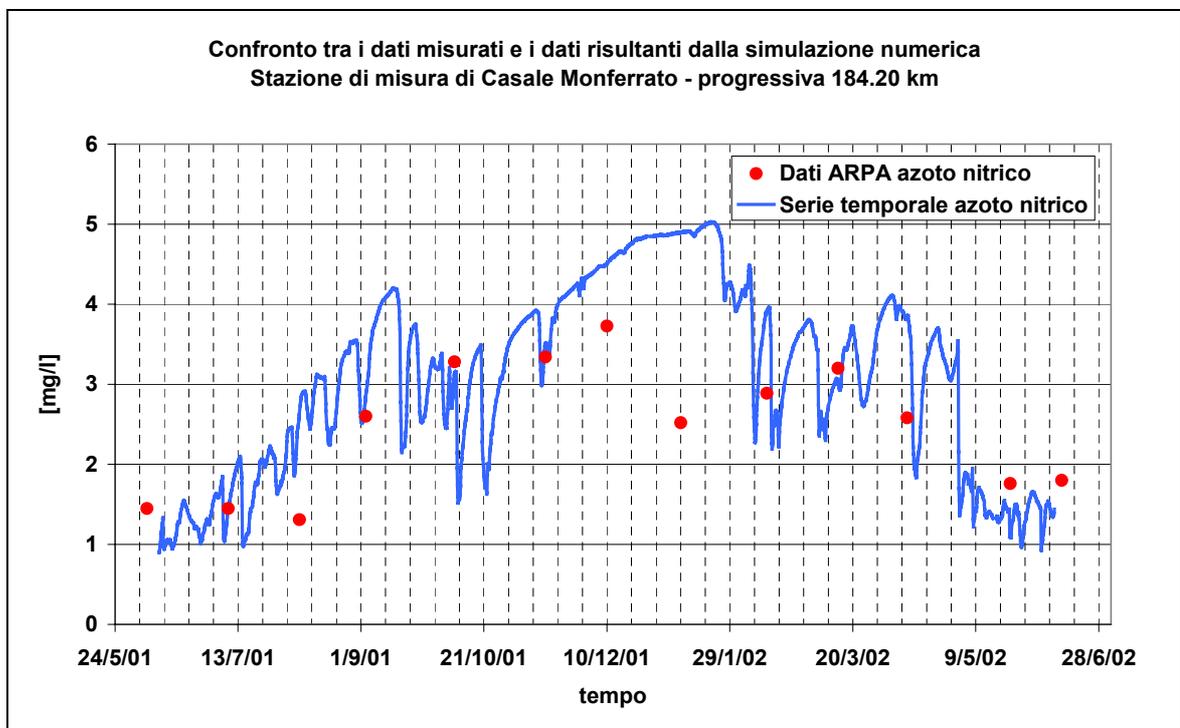


Figura 7b - Stazione di Casale Monferrato – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per l'azoto nitrico.

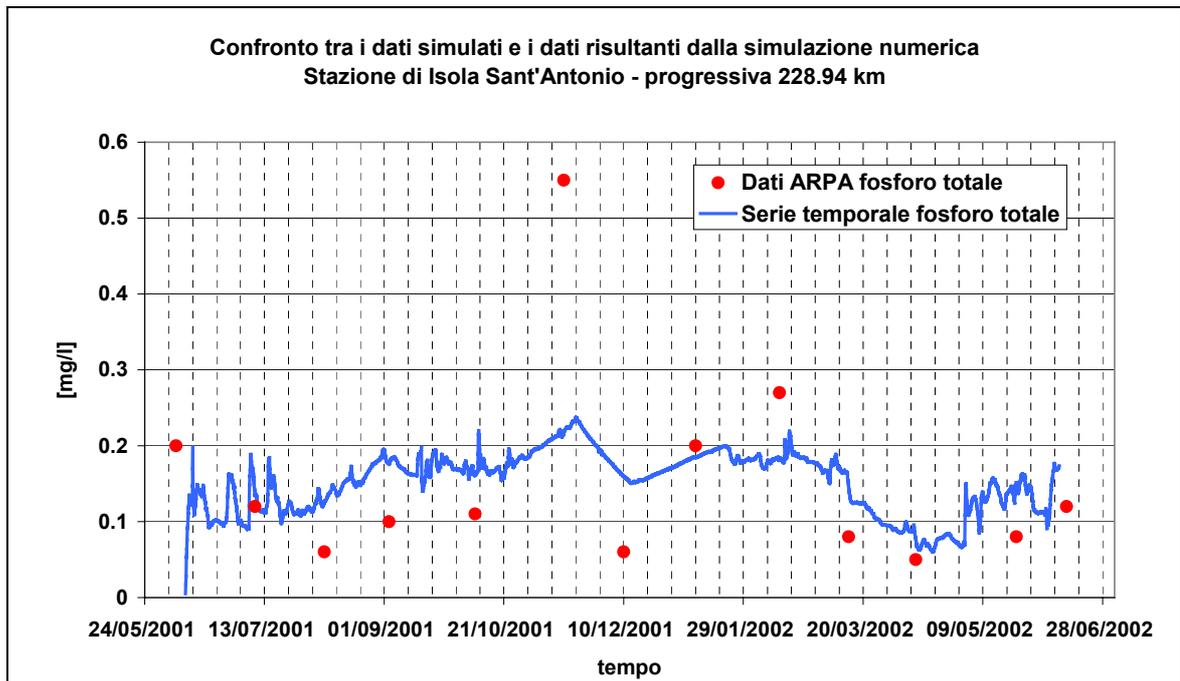


Figura 8a - Stazione di Isola Sant'Antonio – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per il fosforo totale.

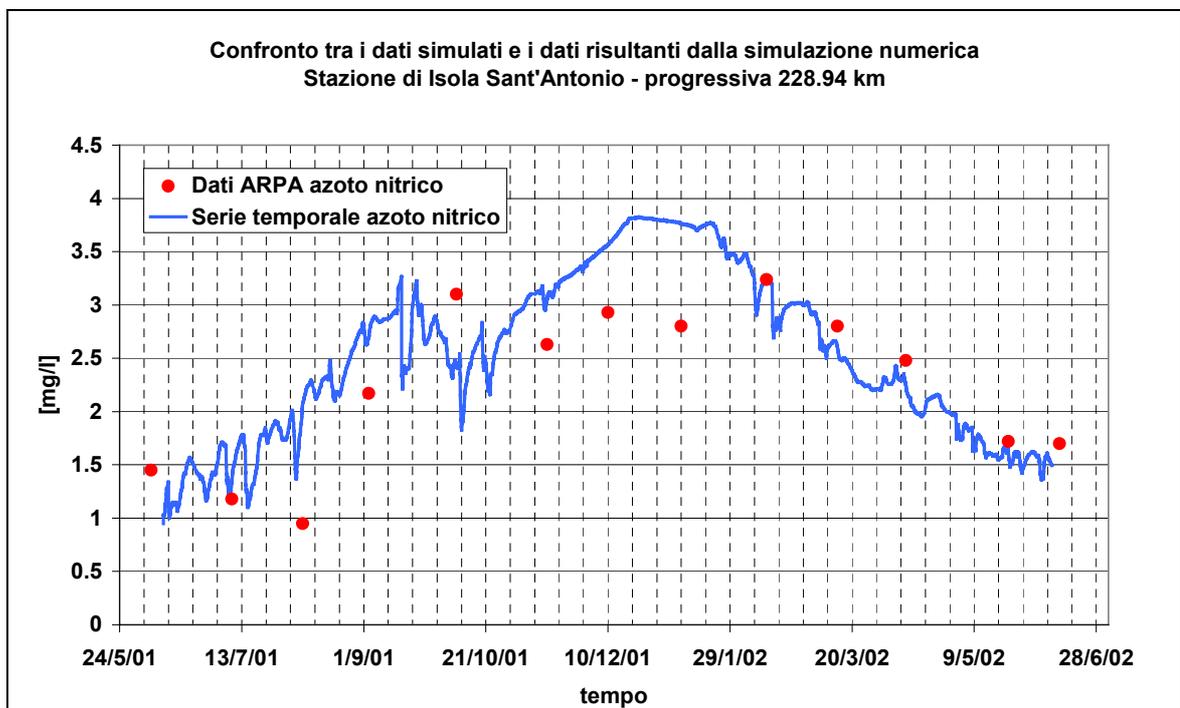


Figura 8b - Stazione di Isola Sant'Antonio – confronto tra il modello numerico e i dati misurati per l'azoto nitrico.

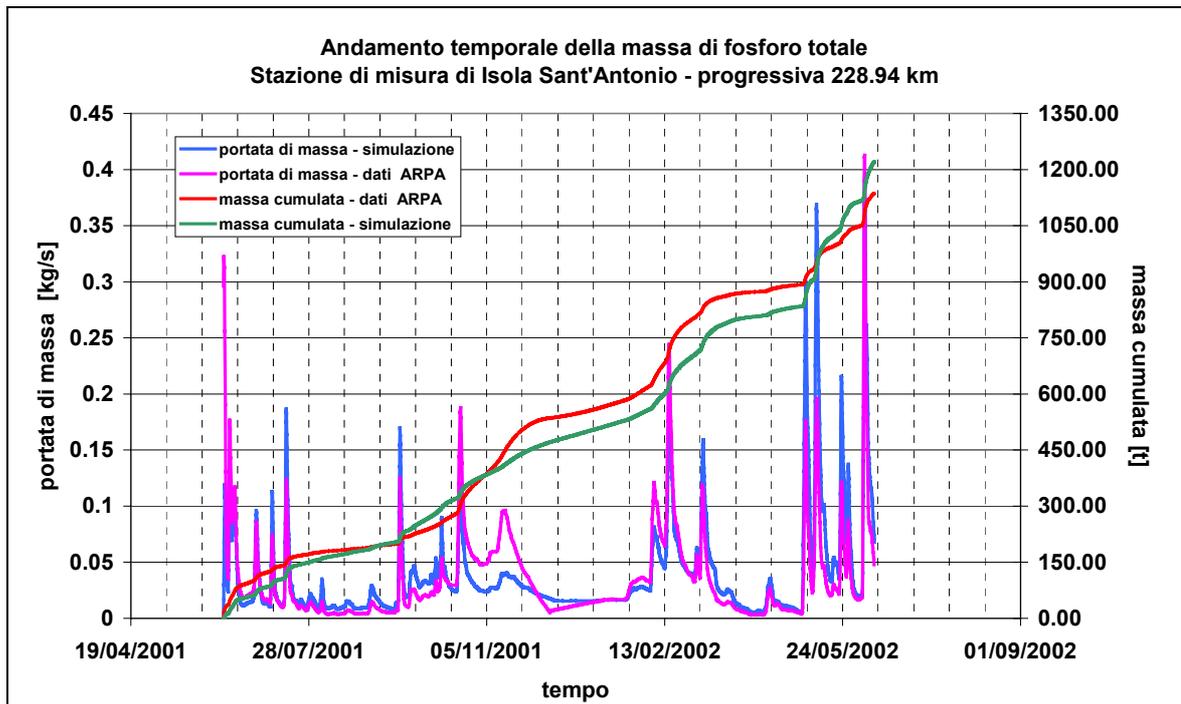


Figura 9 - Confronto andamento temporale portata di massa fosforo totale e curva cumulata.

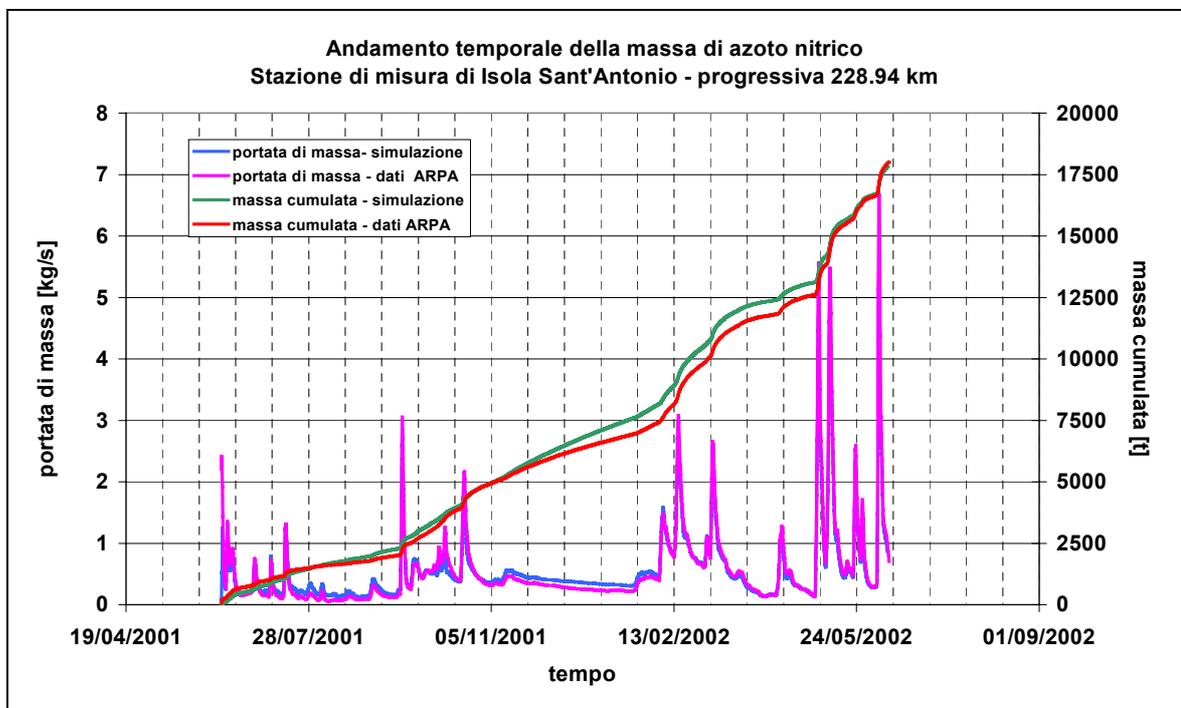


Figura 10 - Confronto andamento temporale portata di massa dell'azoto nitrico e curva cumulata

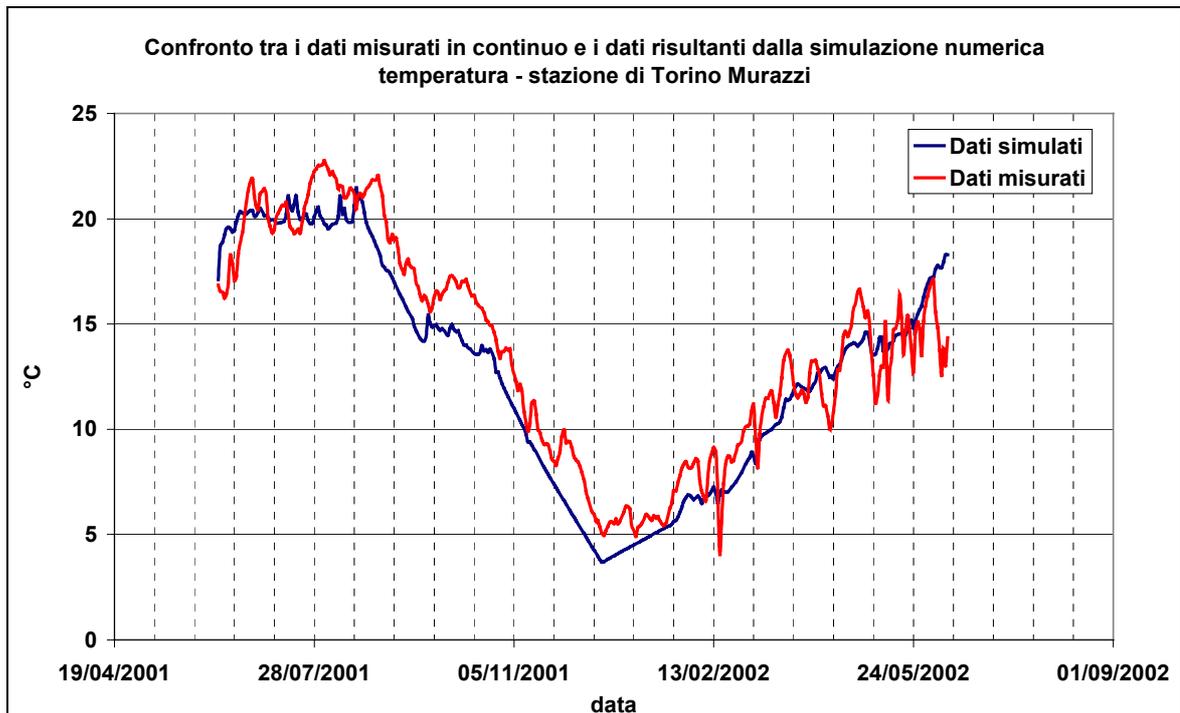


Figura 11 - Confronto dati rilevati in continuo e dati risultanti dalla simulazione numerica nella stazione di Torino Murazzi.

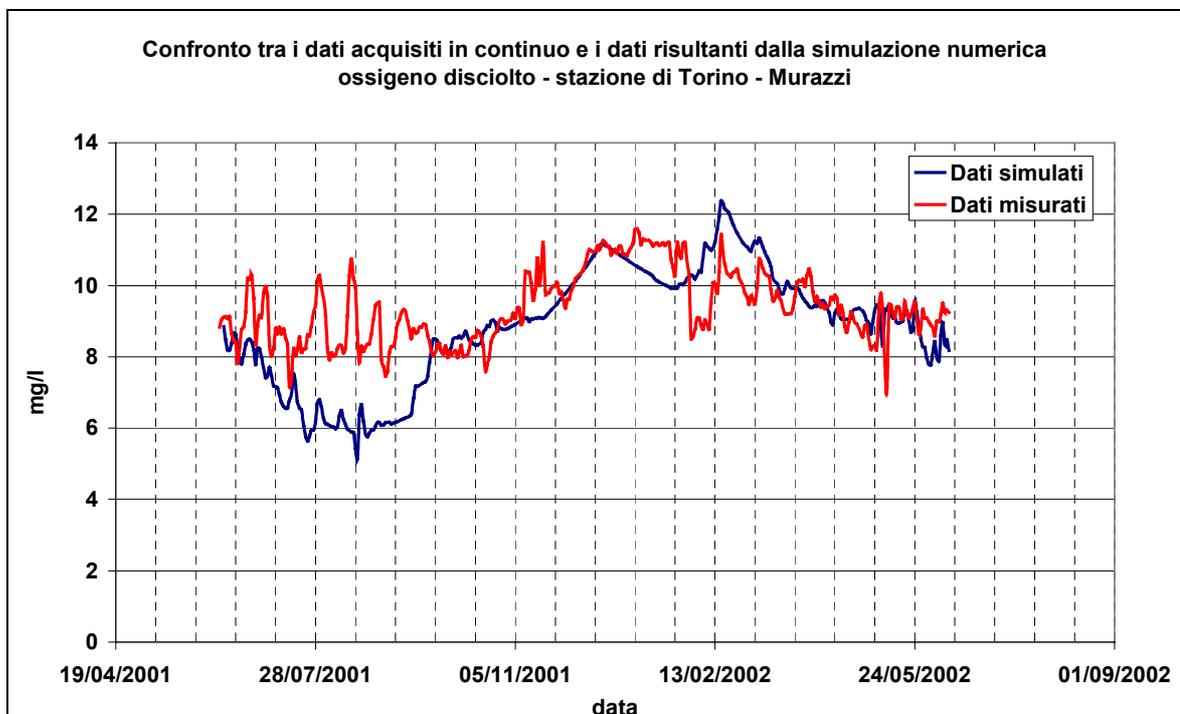


Figura 12 - Confronto dati rilevati in continuo e dati risultanti dalla simulazione numerica nella stazione di Torino Murazzi.

4. CARATTERIZZAZIONE DELLO STATO QUALITATIVO DELL'ASTA DEL FIUME PO QUANDO SOLLECITATO DA DIVERSI SCENARI DI INTERVENTO

Eseguita la fase 1 relativa alla taratura del modello matematico, sono stati individuati tre diversi scenari di intervento, che vengono confrontati con la situazione attuale definita come "stato di fatto" e richiamata all'interno dello studio come simulazione 1 (SIM 1).

Di seguito vengono descritti i tre scenari proposti. Bisogna sottolineare che la finestra temporale di simulazione fa riferimento al periodo compreso tra il 10/06/2001 e 10/06/2002.

Nel caso dello "stato di fatto", sono state adottate le stesse condizioni al contorno in termini di portata e concentrazioni utilizzate nella fase 1, definita come fase di taratura.

Scenario 1: simulazione 2 (SIM 2): immissioni di portate considerando la condizione del deflusso minimo vitale (DMV)

Come è noto, il Deflusso Minimo Vitale (DMV) risponde alla duplice finalità di salvaguardia e di riqualificazione delle condizioni di deflusso minimo superficiale nei corsi d'acqua, quale parte sinergica nell'ambito dei più complessivi obiettivi di riequilibrio del bilancio idrico e di specifica destinazione funzionale.

Il concetto di deflusso minimo è infatti da riferire all'accezione più vasta richiamata dal disciplinare tecnico, ovvero "regime idrologico di riferimento che consente di mantenere i processi naturali di autodepurazione e di supportare comunità animali e vegetali ampie e ben diversificate, in funzione degli obiettivi di qualità ambientale e funzionale definiti dal Piano di tutela delle acque".

Nell'ambito del Piano di Tutela, il vincolo al rilascio del DMV a valle dei prelievi è stato individuato come misura strategica per il riequilibrio del bilancio finalizzato al raggiungimento degli obiettivi qualitativi sulle aste fluviali (cfr. fase IV - Misura R.3.1.1 - Regolamentazione/corpi idrici superficiali).

La misura è concepita espressamente per gestire la presenza e la regolazione delle concessioni di derivazione dal punto di vista quantitativo e rapportandosi allo stato di magra ordinaria naturale dei corsi d'acqua quale condizione di riferimento.

Essa è conforme alle prescrizioni fornite dall'Autorità di Bacino del Po nel documento: "Criteri di regolazione delle portate in alveo" Allegato B alla Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 7 del 13 marzo 2002, e risulta integrata per gli aspetti di diretta competenza regionale.

E' comunque del tutto definita la richiesta dell'applicazione del valore di base entro il 2008; poi, entro il 2016 dovrà potersi garantire il valore completo degli eventuali fattori correttivi a valle di tutte le derivazioni da acque superficiali (naturali) esistenti.

L'ipotesi di applicazione del DMV di base (2008) alle concessioni di derivazione è stata imposta nel modello *Water Quality* e inserita nel modello idrodinamico per le simulazioni di carattere numerico che costituiscono il primo scenario di confronto per la costruzione degli eventuali scenari di intervento.

Per la costruzione del nuovo scenario che riguarda la garanzia del DMV di base in alveo sono state modificate anche le concentrazioni relative alle immissioni degli affluenti su sponda destra e sinistra dell'asta del Po in esame. In una prima fase sono state individuate le masse (kg) di tutte le specie considerate nella simulazione numerica (BOD, OD, fosforo disciolto, fosforo particolato, NH4 e N03) calcolate in funzione delle portate corrispondenti allo scenario definito come stato di fatto (SIM 1).

Individuati i valori puntuali della massa delle specie di interesse si è ricorso al calcolo delle nuove concentrazioni utilizzando le portate relative allo scenario del DMV di base in tutti i punti di immissione degli affluenti. In questa forma viene considerato l'effetto di diluizione indotto dalle nuove portate in particolare nei periodi di magra. In ogni modo occorre rilevare che il campo di variazione delle nuove concentrazioni è tra il 4 e il 12 % per tutte le specie considerate.

Scenario 2: simulazione 3 (SIM 3) - immissioni di portate considerando la condizione del deflusso minimo vitale (DMV) e abbattimento parziale di tutti i carichi sversati dall'impianto di depurazione SMAT e delle immissioni dei carichi provenienti dalla Dora Baltea

La costruzione del secondo scenario di intervento è stata effettuata considerando la distribuzione territoriale dei carichi gravanti sulle acque superficiali che risultano dalle valutazioni a scala di bacino dei carichi inquinanti del comparto civile e industriale (attività III.m Analisi del sistema degli scarichi).

Lo scenario si basa fondamentalmente sul potenziamento dell'impianto di depurazione SMAT e sull'incremento del numero di impianti e reti fognarie nel bacino della Dora Baltea che presenta una percentuale di abitanti trattati del 66 %, delle immissioni rilevanti di fosforo e nitrati.

Inoltre, l'immissione della Dora Baltea sull'asta del Po avviene alla progressiva 150 km che corrisponde all'incirca alla metà del tracciato. Questa scelta di intervento ha anche come scopo valutare l'efficacia di un intervento localizzato in un punto intermedio dell'asta e l'evoluzione dinamica degli abbattimenti prodotti dalle azioni ipoteticamente assunte.

Di seguito viene presentata una tabella riassuntiva delle principali immissioni di origine civile lungo l'asta del Po che ha consentito la definizione degli scenari di intervento che verranno validati tramite il modello matematico. I valori dei carichi di BOD₅, COD, N e P vengono espressi in t/anno e le percentuali di abitanti trattati per bacino di riferimento vengono desunti dallo studio dei bilanci di massa a scala di bacino (attività III.m).

Affluente	Carico civile direttamente sversato su corpo idrico			% di abitanti afferenti trattati
	BOD ₅ (t/anno)	N (t/anno)	P (t/anno)	
Banna	826	169	22	0.63
Chisola	775	159	21	0.76
Sangone	288	59	8	0.73
Dora Riparia	703	144	19	0.86
Stura di Lanzo	536	110	14	0.72
Malone	533	109	14	0.58
Orco	528	108	14	0.71
Dora Baltea	880	174	23	0.66
Sesia	1110	228	30	0.64
Tanaro	2220	456	60	0.68

Tabella 1 - Massa complessiva immessa nell'asta del Po per i principali bacini affluenti (carichi sversati direttamente su corpo idrico relativi al comparto civile)

Nel caso del depuratore SMAT i carichi effettivi sversati sono 1010 t/anno, 7474 t/anno e 4848 t/anno e 282 t/anno per il BOD₅, COD, N e P rispettivamente, e le concentrazioni di erogazione sono pari a 5600000 µg/m³ (5.6 mg/l), 36000000 µg/m³ (36 mg/l), 32000000 µg/m³ (32 mg/l) e 1440000 µg/m³ (1.44 mg/l) per il BOD₅, COD, N e P rispettivamente.

Come precedentemente menzionato, per la simulazione numerica dei carichi sversati dal depuratore SMAT si è assunto per il fosforo disciolto e particolato un rapporto da 6:1 mentre per le forme azotate (azoto totale N) si è assunta la ripartizione (NO₃ 70 %, NH₄ 7 %, NH₃ 10 % e N organico 13%).

Sulla base di quanto sopra, il secondo scenario di intervento prevede il potenziamento dell'impianto di depurazione SMAT adottando un abbattimento delle concentrazioni del 30% per N e il 25 % per P, mentre per il BOD₅ e il COD non è stato adottato nessun abbattimento.

Nel caso della Dora Baltea è stato assunto un abbattimento delle concentrazioni medie del 25% per tutte i carichi immessi.

Le portate di immissione sono quelle relative allo scenario 1 (SIM 2), in cui vengono considerate le portate minime vitali (DMV).

La definizione delle caratteristiche dello scenario è stata condotta sulla base di due criteri: il primo considera il potenziamento del depuratore SMAT, mentre il secondo prevede la diminuzione delle sorgenti di inquinamento di origine urbana esistenti allo stato attuale nel bacino della Dora Baltea; tale bacino presenta una percentuale di depurazione pari al 66% della popolazione totale insediata che corrisponde a circa 40000 abitanti non trattati. Le percentuali di abbattimento adottate per la definizione dello scenario sono concettualmente associate alla costruzione di reti fognarie e di nuovi impianti di depurazione delle acque del bacino della Dora Baltea; attualmente sono trattati 76021 abitanti equivalenti tramite i 92 impianti esistenti.

Scenario 3: simulazione 4 (SIM 4) - immissioni di portate considerando la condizione del deflusso minimo vitale (DMV) e l'abbattimento delle immissioni dei carichi provenienti da tutti i sottobacini affluenti.

Il terzo scenario considera il deflusso minimo vitale (DMV) e l'abbattimento della massa complessiva dei carichi (BOD₅, COD, N e P) per tutti i sottobacini affluenti: Banna, Chisola, Sangone, Dora Riparia, Stura di Lanzo, Malone, Orco, Dora Baltea, Sesia e Tanaro.

Le percentuali di abbattimento delle concentrazioni media sono del 35%, 35%, 20%, 15%, 25%, 35%, 20%, 10%, 30% e 30% relativi al periodo di riferimento della simulazione effettuata.

Questo tipo di intervento, che può essere perfettamente inquadrato nel contesto della diminuzione dei carichi provenienti dal comparto civile, industriale e agro-zootecnico che gravano sulle acque superficiali che affluiscono sull'asta del Po, risulta dall'analisi delle concentrazioni medie desunte dalla simulazione numerica dello "stato di fatto" e riportate per il parametro di riferimento (fosforo totale) nella figura 13.

Nel caso del sottobacino del Banna e del Chisola, le percentuali di abitanti non trattati sono il 37% e il 24% rispettivamente, e corrispondono all'incirca a 60000 abitanti. Perciò la costruzione di impianti di depurazione è perfettamente compatibile con la definizione di uno scenario di intervento.

D'altra parte, per quanto riguarda l'inquinamento d'origine industriale che interessa direttamente i corpi idrici, per esempio nel caso del sottobacino del Banna, i carichi complessivi generati sono 141 t/anno, 434 t/anno, 23.6 t/anno e 1.4 t/anno per il BOD₅, COD, N e P rispettivamente.

Nel caso del sottobacino del Chisola, i carichi complessivi generati sono 69 t/anno, 279 t/anno, 11.3 t/anno e 1.1 t/anno per il BOD₅, COD, N e P rispettivamente, mentre per il sottobacino della Dora Baltea, i carichi di origine industriale sono 39.2 t/anno, 220 t/anno, 5.5 t/anno e 0.2 t/anno per il BOD₅, COD, N e P rispettivamente (tali valori sono stati desunti dal bilancio di massa effettuato a scala di bacino nell'analisi del sistema degli scarichi – attività III M – PTA Piemonte).

Nel caso della Dora Riparia i valori dei carichi generati dai 35000 abitanti non trattati corrispondono a 766.5 t/anno e 1648.5 t/anno per il BOD e il COD rispettivamente e 157.5 t/anno per N e 21 t/anno per P.

Nel caso del Malone dove la percentuale di abitanti trattati è pari al 58 % è facile prevedere nella definizione dello scenario il completamento, l'ampliamento e la ristrutturazione della rete fognaria esistente con il conseguente potenziamento degli impianti di depurazione.

Analogamente per quanto riguarda il Tanaro la serie di interventi proposti, a cui si riferisce lo scenario in esame, sono relativi al potenziamento sia della rete fognaria esistente sia dei depuratori.

Le azioni di intervento relative al bacino della Dora Baltea, Orco e Sesia si basano sostanzialmente sul potenziamento del sistema depurativo che in media attualmente serve il 65 % della popolazione per i tre bacini in esame.

Le indicazioni delle azioni dello scenario 3 derivano dall'analisi dei carichi di origine civile che sversano direttamente su corpo idrico, della percentuale della popolazione servita, che corrisponde a circa l' 85 % della popolazione insediata. e dell'incremento del sistema depurativo che tratta il 76% dell'intero carico inquinante prodotto a scala regionale.

Infine, bisogna sottolineare che le azioni di intervento possono essere perfettamente abbinate ad interventi di carattere non strutturale, in particolare riguardo alla conduzione dei suoli e alle pratiche agronomiche, come da indicazioni di Piano.

5. ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi dei risultati e il confronto dei diversi scenari messi a punto e simulati sono stati condotti sulla base dell'individuazione dell'andamento temporale delle concentrazioni in diversi *flag*, considerati indicativi per la valutazione degli interventi definiti.

A riguardo della valutazione qualitativa degli interventi, occorre sottolineare che è stato scelto come parametro di riferimento il fosforo totale, dal momento che è sicuramente il parametro maggiormente indicativo che risulta dalle simulazioni numeriche.

Bisogna rilevare che il fosforo particolato fornito dalle simulazioni numeriche è legato all'interazione della massa fluida con il materiale solido in sospensione e depositato sul fondo. I dati reali prodotti dalle campagne di monitoraggio relativi al materiale solido lungo l'asta fluviale, non sono stati utilizzati nella fase di taratura data la poca consistenza degli stessi e quindi i risultati provenienti dalle simulazioni, per quanto riguarda il fosforo particolato hanno un fondamento teorico ma che sicuramente è di natura cautelativa. Tuttavia, la taratura effettuata in termini di fosforo totale è da ritenersi soddisfacente, giustificando così le scelte teoriche fatte in fase di calibrazione del modello.

Nel corso delle simulazioni vengono rappresentati i processi di nitrificazione, degradazione del BOD₅, fotosintesi e respirazione attraverso i quali vengono modificate le concentrazioni delle componenti considerate.

Il materiale organico, rappresentato in parte dal BOD₅ viene considerato in tre forme differenti: sospeso, disciolto e depositato nel sedimento. Per stati di bassa velocità, il BOD₅ sospeso viene sedimentato e poi risospeso al cambiare delle condizioni dinamiche della corrente. Nel caso del parametro di riferimento "fosforo totale" (fosforo particolato + fosforo disciolto) non vengono considerati gli effetti reali di deposito e "risospensione" del fosforo particolato, che sicuramente sono

indicativi nella dinamica del fenomeno ma richiedono dei dati di campionamento non disponibili nella fase di taratura.

Un parametro di enorme importanza nella valutazione del “peso” delle soluzioni è l’indicatore di riferimento che viene adottato per la quantificazione dei risultati. Nel presente studio, è stato assunto, come parametro di riferimento, il valore della concentrazione al 75° percentile del fosforo totale, che permette di identificare il valore della concentrazione dominante nella sezione di interesse.

Molto importante è anche la scala temporale assunta; è evidente che, se le valutazioni vengono effettuate su una scala temporale annuale, l’efficacia degli interventi può non essere del tutto percepita, dal momento che avviene un naturale appiattimento dei valori di concentrazione. Nel caso la scelta temporale sia stagionale, l’efficacia degli interventi può essere molto più rilevante.

L’analisi dei risultati è stata eseguita nel seguito utilizzando una finestra temporale annuale allo scopo di valutare le variazioni complessive dello stato qualitativo lungo l’asta del Po, quando l’alveo viene sollecitato dai diversi interventi individuati. La sezione di riferimento come ampiamente menzionato in precedenza è la sezione di Isola S. Antonio, sezione di chiusura dell’intero bacino piemontese del Po.

Riguardo ai risultati ottenuti dalle simulazioni, è da mettere in evidenza il fatto che il modello su base giornaliera fornisce risultati che sembrano generalmente cautelativi rispetto a quelli che possono derivare dall’analisi dei dati di concentrazioni misurati, attualmente disponibili solo su base mensile.

Infatti, le concentrazioni medie calcolate lungo l’asta del Po tramite l’integrale delle concentrazioni istantanee delle serie temporali generate dal modello di calcolo per lo stato di fatto:

$$\hat{C} = \frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_f} C(t) dt$$

dove:

C è la concentrazione media riferita al periodo di riferimento;

$T = t_f - t_i$ è la durata del periodo di riferimento espressa in secondi (10/06/2001 – 10/06/2002);

dt è la durata della concentrazione puntuale;

presentano valori medi, specialmente di concentrazione di fosforo, in quasi tutte le sezioni di controllo sull’asta, superiori al valore obiettivo di Piano.

Nelle condizioni di “stato di fatto” (SIM 1), è evidente come nella sezione di chiusura del bacino piemontese ad Isola S. Antonio il valore di concentrazione media di fosforo totale calcolato dal modello risulta pari a circa 0.15 mg/l, contro un valore medio calcolato algebricamente dai dati misurati sul periodo più recente (dati mensili) pari a 0.11 mg/l, da confrontarsi con un valore di concentrazione massima ammissibile pari a 0.10 mg/l².

² Il valore di concentrazione massima ammissibile di fosforo totale pari a 0.1 mg/l al 2016 nella sezione sul Po a Isola S. Antonio è uno degli obiettivi del “Piano Stralcio per il controllo dell’Eutrofizzazione (PsE)” dell’Autorità di Bacino del Po, in merito alla individuazione dell’intero bacino del Po come area drenante ad area sensibile (Mar Adriatico).

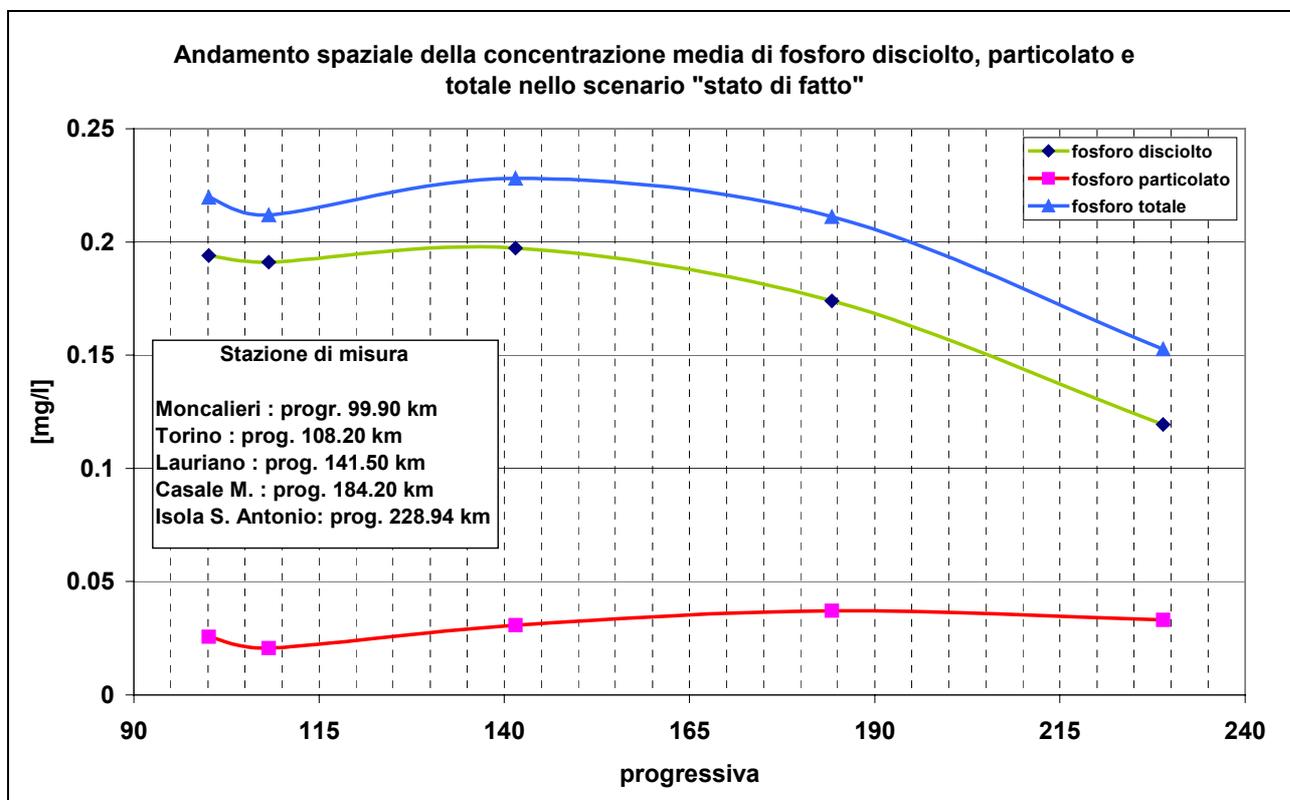


Figura 13 - Andamento spaziale della concentrazione media di fosforo disciolto, particolato e totale nello scenario stato di fatto (SIM 1)

Sulla base di tali considerazioni, dai risultati del modello nei diversi scenari è comunque possibile ritenere che rispetto allo stato attuale una riduzione dei carichi di nutrienti e di fosforo totale intorno al 30 %, per tutte le immissioni, può assicurare il raggiungimento dei limiti ammissibili proposti dal Piano, pari a 0.1 mg/l di fosforo totale ad Isola S. Antonio.

5.1 Considerazioni sugli interventi a scala temporale annuale

Utilizzando il modello numerico è stato possibile studiare l'effetto prodotto sullo stato qualitativo del fiume Po dalla realizzazione dei diversi interventi che possono ricondotti ad attività di tipo infrastrutturale e/o normative che caratterizzano gli scenari scelti e previamente descritti.

Sono state scelte sei sezioni di riferimento definite come *flag* (vedi figura 2) così come di seguito:

- *FLAG 1*: progressiva 100 km a valle della confluenza del sottobacino del Chisola;
- *FLAG 2*: progressiva 109 km a valle della confluenza del sottobacino del Sangone;
- *FLAG3*: progressiva 133 km a valle della confluenza del sottobacino dell'Orco e

dell'immissione del depuratore SMAT;

- **FLAG 4:** progressiva 197 km a valle della confluenza del sottobacino del Sesia;
- **FLAG 5:** progressiva 228 km a Isola Sant'Antonio nel tratto terminale dell'asta in studio;

L'analisi fa riferimento al seguente elenco di figure:

Lo scenario relativo allo “**stato di fatto**” viene indicato nelle figure come SIM 1.

Lo **scenario 1** relativo al DMV viene identificato come SIM 2.

Lo **scenario 2** relativo al DMV con interventi sul depuratore SMAT e sulla Dora Baltea viene identificato come SIM 3.

Lo **scenario 3** relativo al DMV con interventi sui sottobacini del Banna, Chisola, Sangone, Dora Riparia, Stura di Lanzo, Malone, Orco, Dora Baltea, Sesia e Tanaro viene identificato come SIM 4.

- **Figura 14:** andamento temporale dell'azoto nitrico (NO_3) e curva delle percentuali cumulate della concentrazione alla progressiva km 100 in corrispondenza del *flag 1*.
- **Figura 15:** andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate della concentrazione alla progressiva km 100 in corrispondenza del *flag 1*.
- **Figura 16:** andamento temporale dell'azoto nitrico (NO_3) e curva delle percentuali cumulate della concentrazione alla progressiva km 109 in corrispondenza del *flag 2*.
- **Figura 17:** andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate della concentrazione alla progressiva km 109 in corrispondenza del *flag 2*.
- **Figura 18:** andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate della concentrazione alla progressiva km 133 in corrispondenza del *flag 3*.
- **Figura 19:** andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate della concentrazione alla progressiva km 197 in corrispondenza del *flag 4*.
- **Figura 20:** andamento temporale dell' azoto nitrico (NO_3) e curva delle percentuali cumulate della concentrazione alla progressiva km 228 in corrispondenza del *flag 5*.
- **Figura 21:** andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate della concentrazione alla progressiva km 228 in corrispondenza del *flag 5*.

Osservando le suddette figure si può affermare quanto segue.

- Nello scenario di “stato di fatto”, confrontando tra loro le curve delle percentuali cumulate relative all'azoto nitrico e al fosforo totale nelle progressive 100 km (*flag 1*) e 228 km (*flag 5*), risulta evidente il naturale processo di abbattimento delle concentrazioni indotto dalle immissioni di masse liquide associate a tutti gli affluenti su sponda sinistra e destra dell'asta del Po in studio (concentrazione SIM 1 pari a 3.36 mg/l progressiva 100 km e 2.53 mg/l progressiva 228 km per l'azoto nitrico e 0.2196 mg/l e 0.1526 mg/l per il fosforo totale). Infatti, nel caso dell' azoto nitrico la concentrazione media viene abbattuta del 24 % solo per effetti naturali, mentre per il fosforo totale l'abbattimento medio è pari a circa il 30 %.

Come è ben noto dalla letteratura, l'individuazione dei fattori limitanti i fenomeni eutrofici rappresenta, quindi, un elemento fondamentale nelle elaborazioni delle strategie di risanamento. Il fosforo, che viene considerato come l'elemento chiave che limita e controlla la produttività delle

acque, può essere associato all'azoto attraverso il rapporto N/P allo scopo di individuare tra i due il fattore limitante.

Nel presente studio è stato adottato come fattore dominante il fosforo dato che gli obiettivi del Piano sono finalizzati al raggiungimento di una soglia ben definita pari a 0.1 mg/l di fosforo totale alla chiusura del bacino piemontese.

- Per quanto riguarda l'andamento delle concentrazioni di azoto nitrico alla progressiva km 100 (*flag 1*), l'efficacia degli interventi relativi alle simulazioni 1, 2 e 3 è irrilevante, mentre per la simulazione 4 corrispondente allo scenario 3 avviene un abbattimento della concentrazione media pari a circa il 10 %. Questo fatto è perfettamente in linea con la fisica del fenomeno, il che dimostra l'efficacia degli interventi relativo all'abbattimento della massa inquinante (vedi SIM 4) immessa lungo l'asta. Infatti nella simulazione 4 vengono introdotti degli abbattimenti sul bacino del Banna e del Chisola che inducono una diminuzione di massa inquinante alla progressiva 100 km.
- Nel caso dell'andamento delle concentrazioni di fosforo totale alla progressiva km 100 (*flag1*), si può osservare come l'efficacia degli interventi relativi agli scenari 1 e 2 (SIM 2 e SIM 3) siano irrilevanti, mentre l'intervento che caratterizza lo scenario 3 (SIM 4) provoca un abbattimento delle concentrazioni del fosforo totale, consentendo una riduzione della concentrazione media pari al 20 %. Nelle figure relative all'andamento delle serie temporali del fosforo totale, si può osservare come l'intervento associato allo scenario 3 (SIM 4) comporti un abbattimento di massa del 25 % all'incirca imputabile alle riduzioni delle concentrazioni nei sottobacini del Banna e del Chisola.
- Nel caso dell'andamento delle concentrazioni del fosforo alla progressiva km 109 (*flag 2*) a valle della confluenza del Sangone, si può osservare nella figura 17 come gli abbattimenti legati agli interventi relativi allo scenario 3 (SIM 4) abbiano portato ad una riduzione della concentrazione media del 20 %. Questo fatto mette in evidenza la necessità di un piano di interventi che interessi in forma complessiva tutti gli affluenti.
- Nella medesima progressiva (*flag 2*) la curva delle percentuali cumulate di concentrazione dell'azoto nitrico (NO_3) risente degli interventi effettuati a monte e l'abbattimento della concentrazione media è pari al 12 % .
- Nel caso della progressiva km 133 (*flag 3*) a valle della confluenza del sottobacino dell'Orco e del depuratore SMAT, gli interventi relativi allo scenario 2 (SIM 3) e allo scenario 3 (SIM 4) provocano degli abbattimenti delle concentrazioni medie di fosforo totale pari al 36 % e al 30 % rispettivamente rispetto alla SIM 1 (stato di fatto). Nella curva relativa alla percentuale cumulata delle concentrazioni si può osservare chiaramente l'abbattimento delle concentrazioni elevate di fosforo totale presenti nella condizione di stato di fatto.
- Nella progressiva km 197 a valle della confluenza del Sesia (*flag 4*), si osserva come gli interventi relativi allo scenario 2 (SIM 3) provocano un abbattimento della concentrazione media di fosforo totale pari al 18 %, mentre gli interventi caratterizzanti lo scenario 3 (SIM 4) inducono un riduzione della concentrazione media di fosforo pari al 30 %.
- Nella progressiva km 228 ad Isola Sant'Antonio (*flag 5*), si conferma quanto detto precedentemente, cioè l'importanza degli interventi in forma complessiva su tutti i bacini afferenti come risulta dalla simulazione SIM 4.

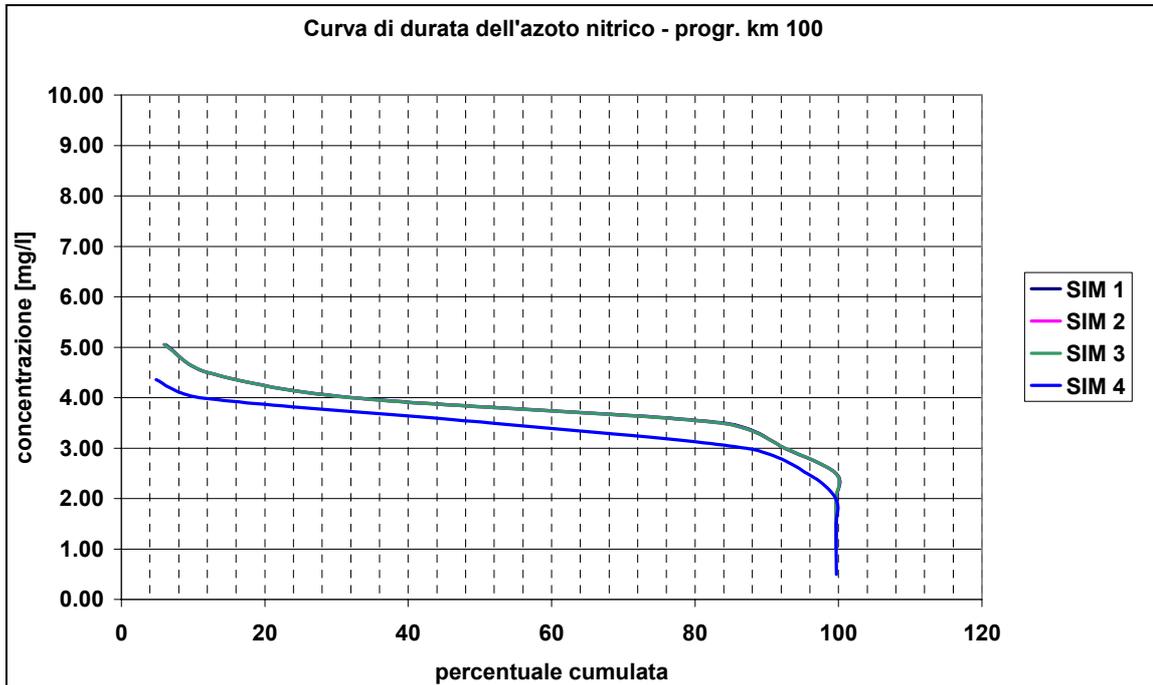
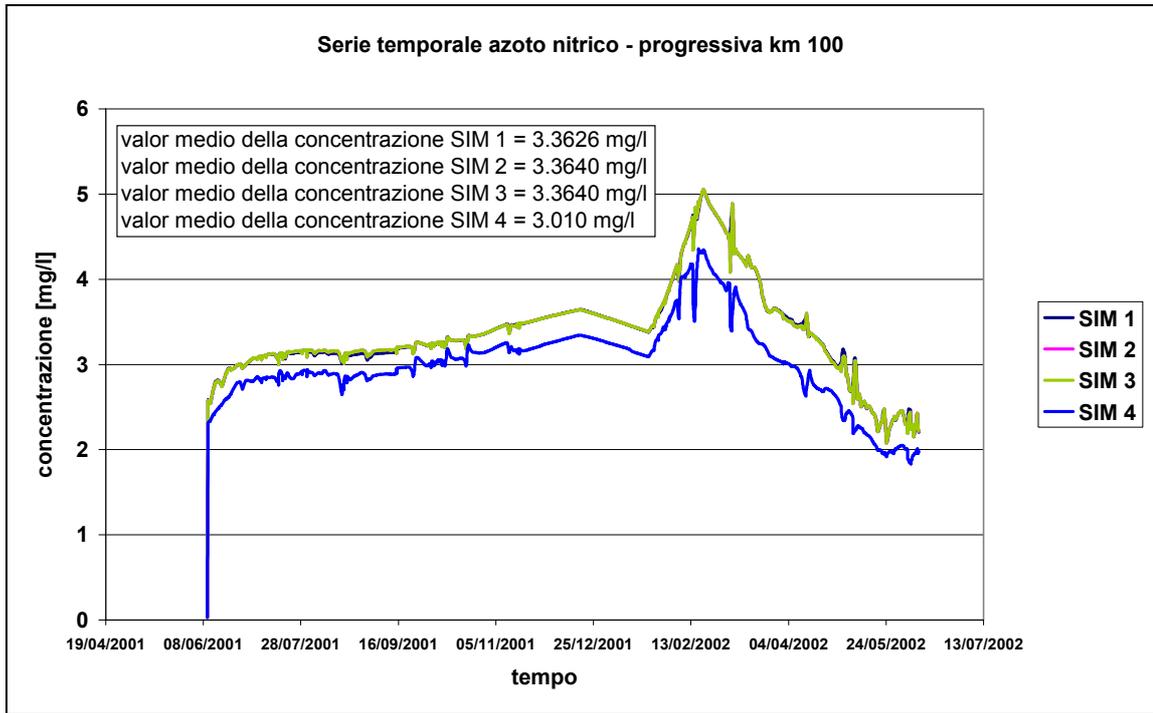


Figura 14 - Andamento temporale dell'azoto nitrico (NO_3) e curva delle percentuali cumulate di concentrazione alla progressiva km 100 in corrispondenza del *flag 1*.

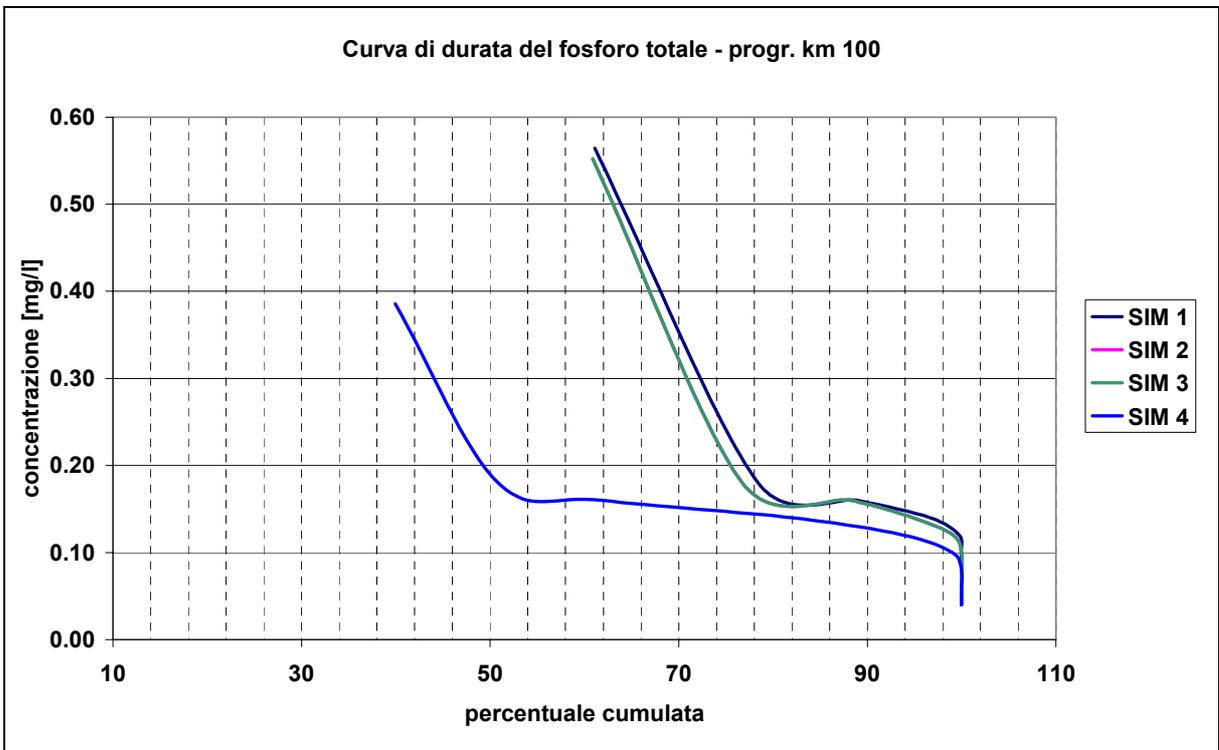
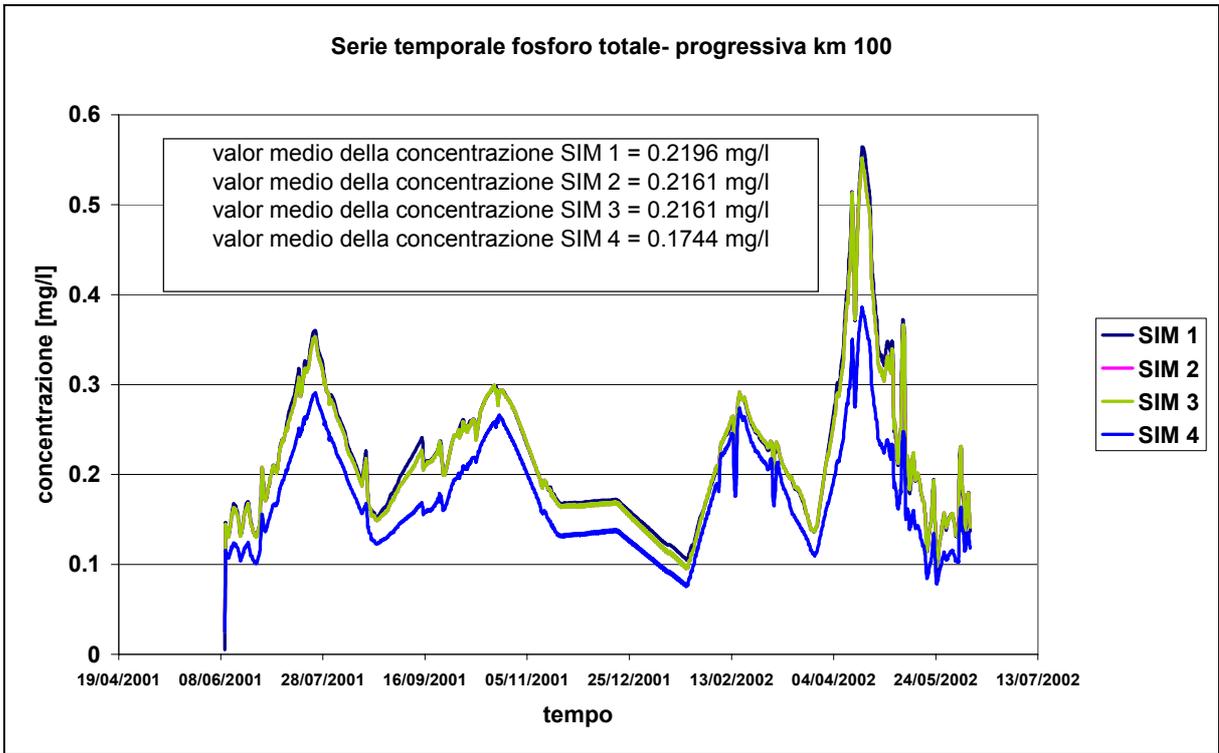


Figura 15 - Andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate di concentrazione alla progressiva km 100 in corrispondenza del *flag 1*.

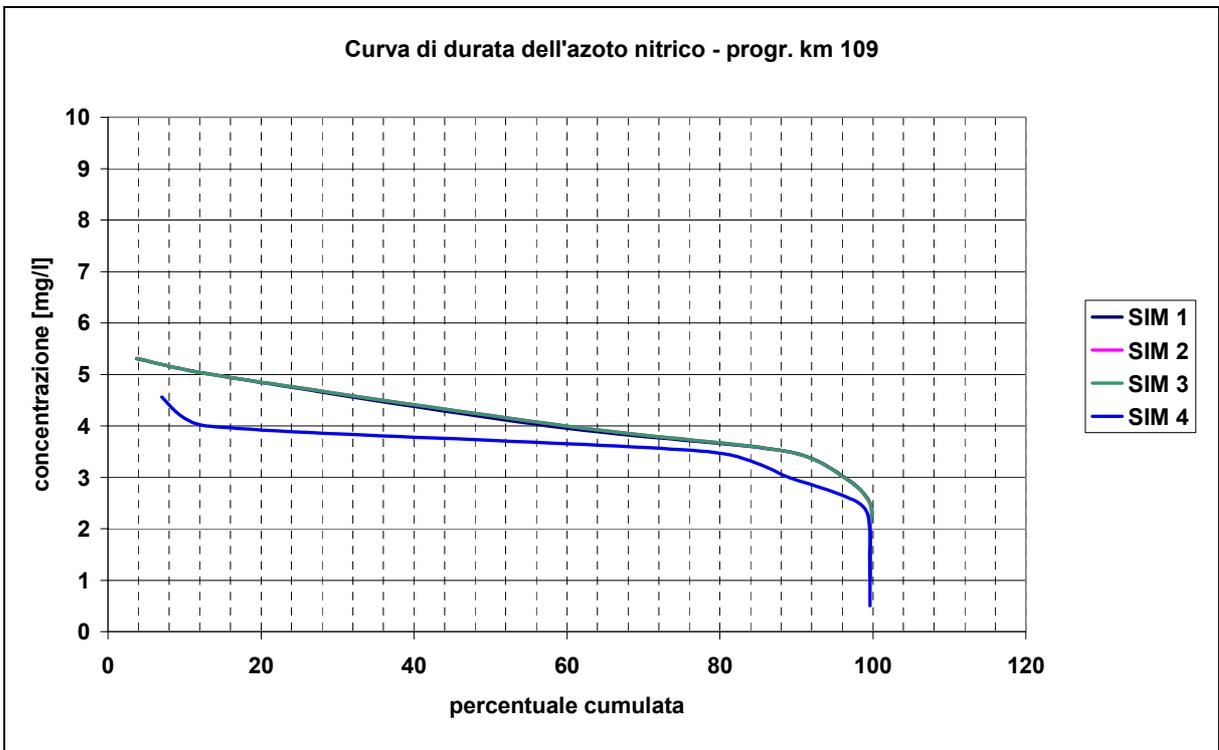
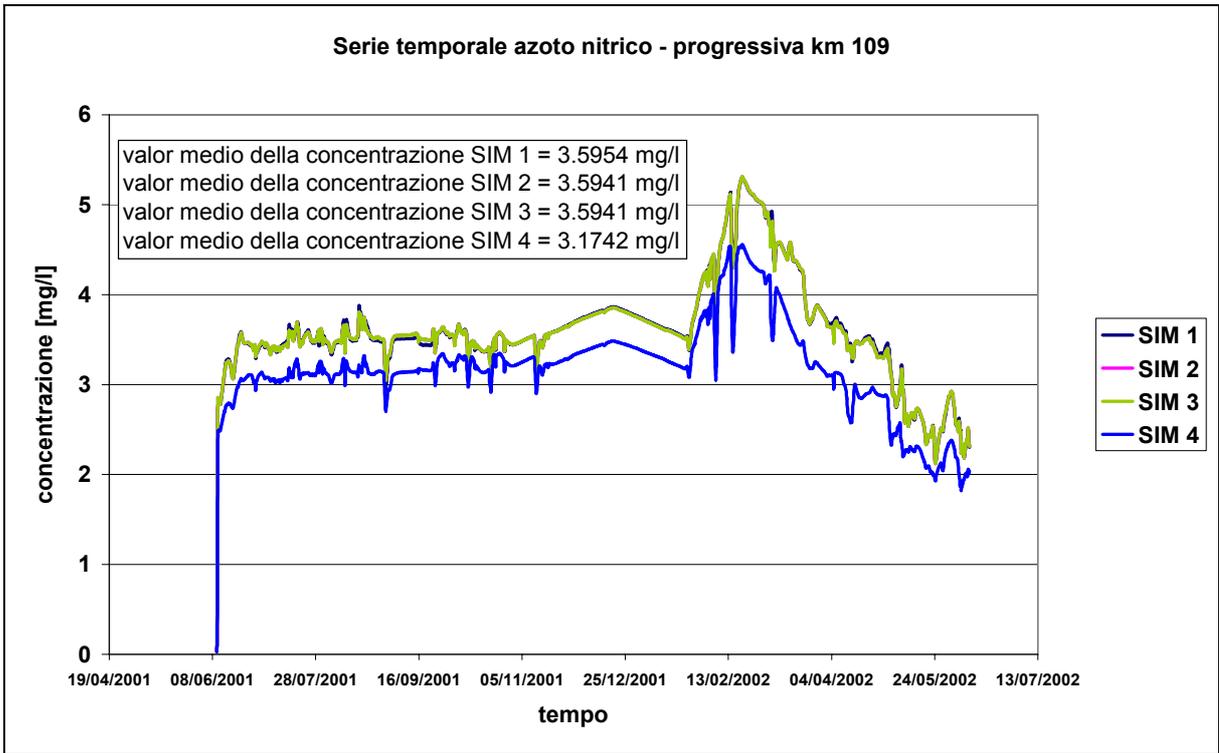


Figura 16 - Andamento temporale dell' azoto nitrico (NO_3) e curva delle percentuali cumulate di concentrazione alla progressiva km 109 in corrispondenza del *flag 2*

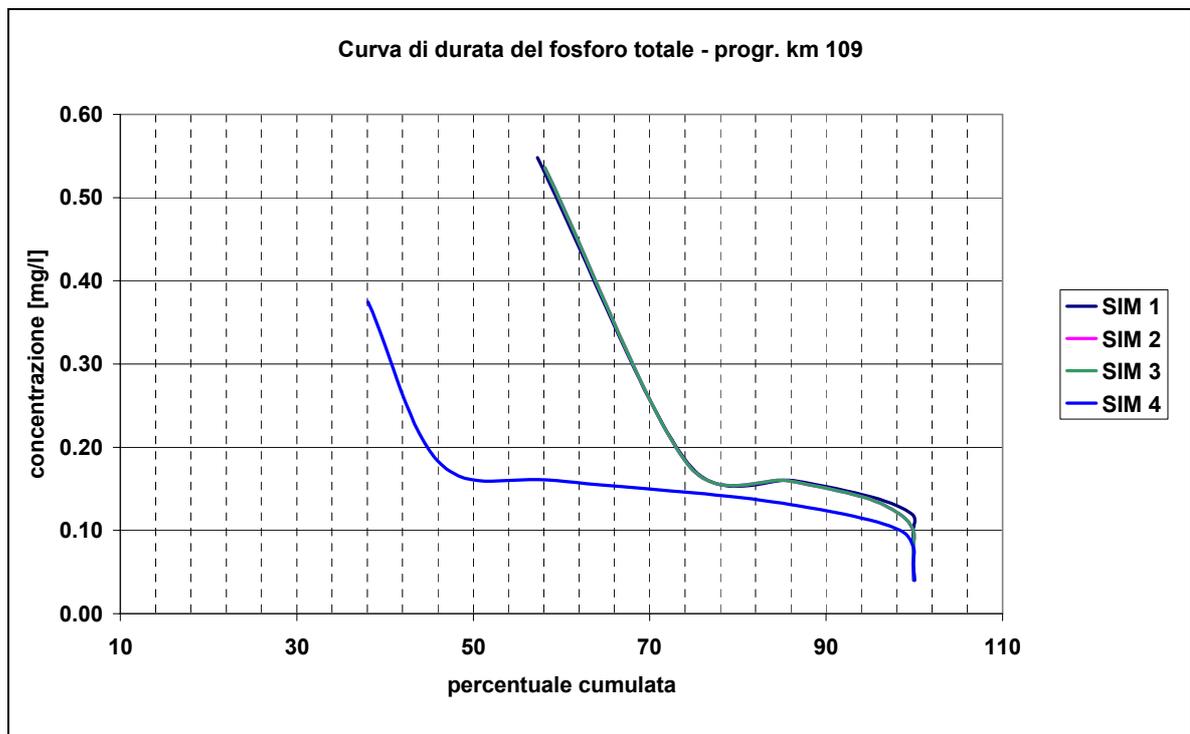
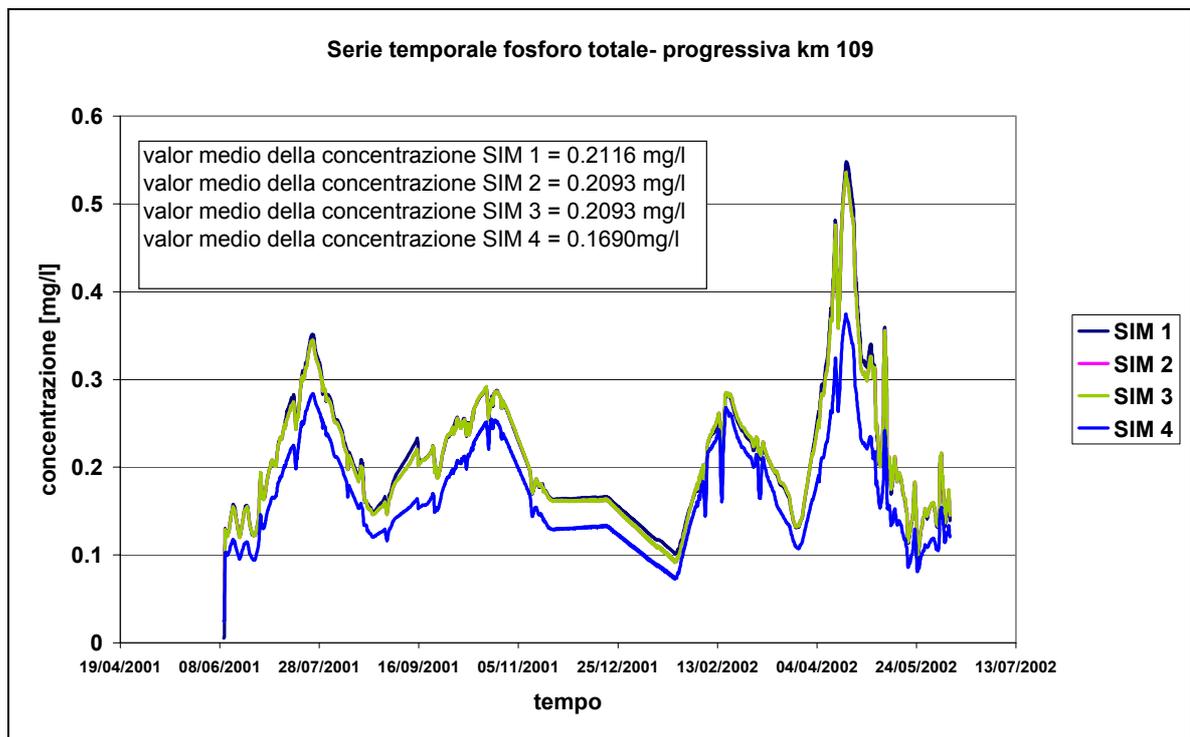


Figura 17 - Andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate di concentrazione alla progressiva km 109 in corrispondenza del *flag 2*.

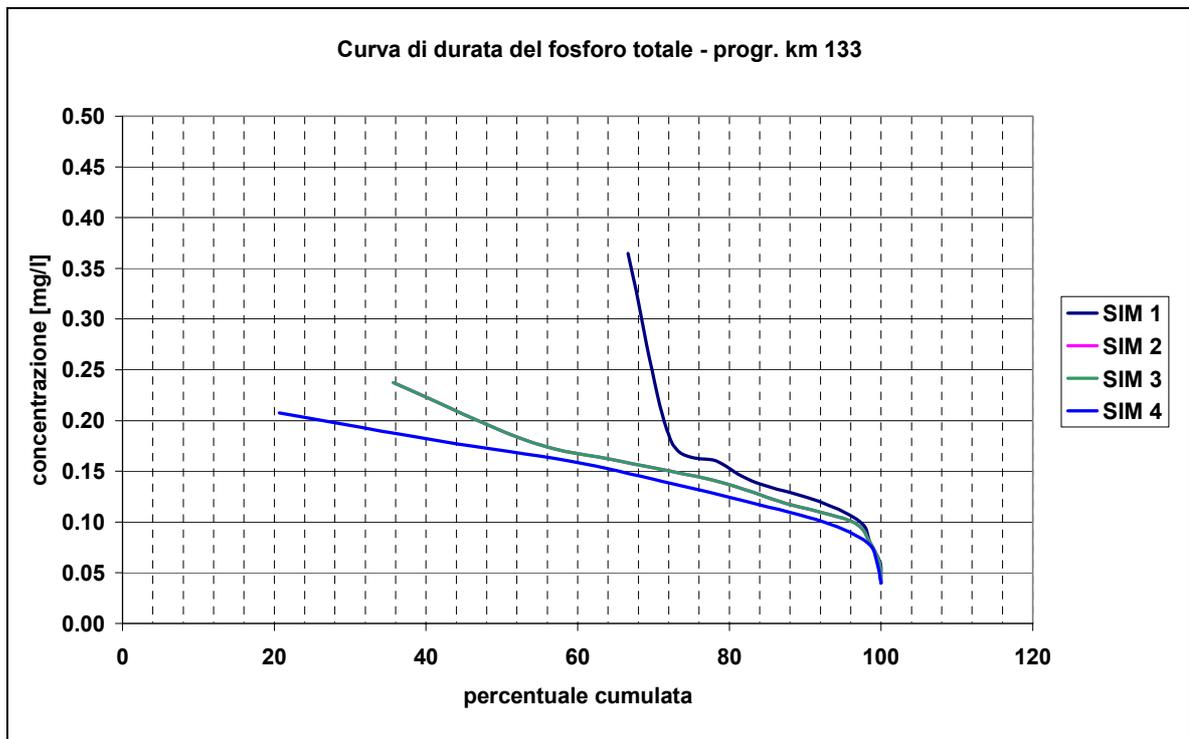
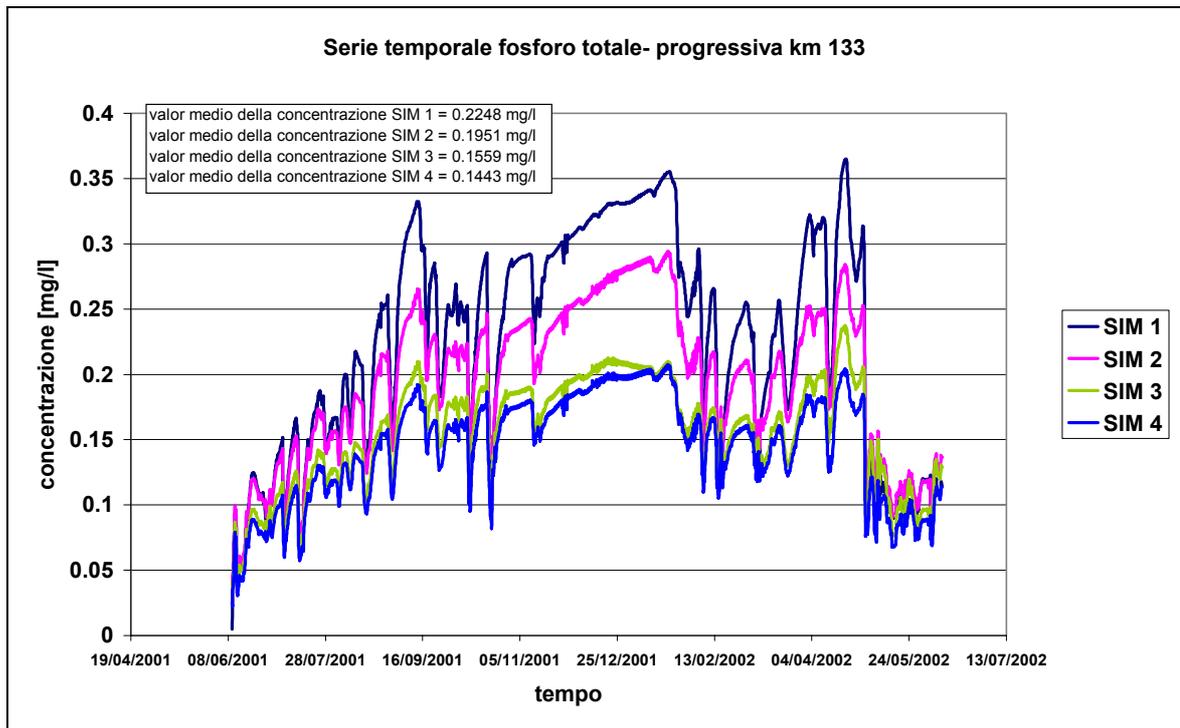


Figura 18 - Andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate di concentrazione alla progressiva km 133 in corrispondenza del *flag 3*.

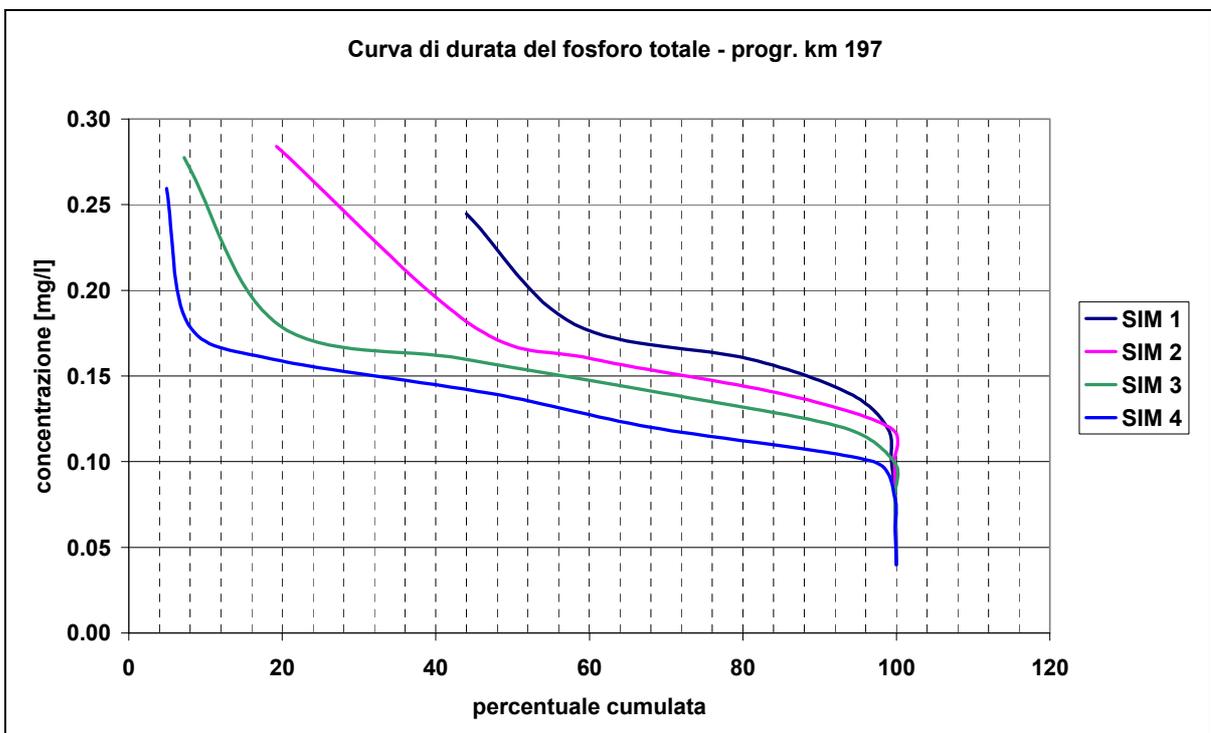
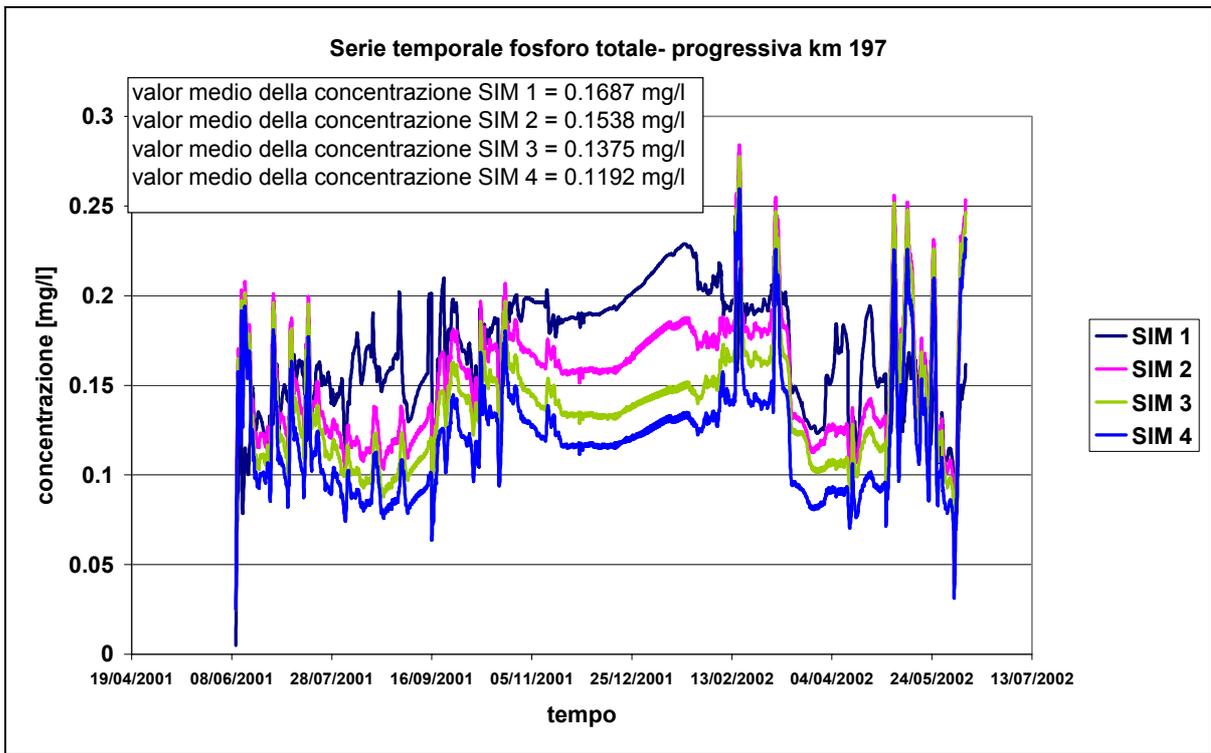


Figura 19 - Andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate di concentrazione alla progressiva km 197 in corrispondenza del *flag 4*.

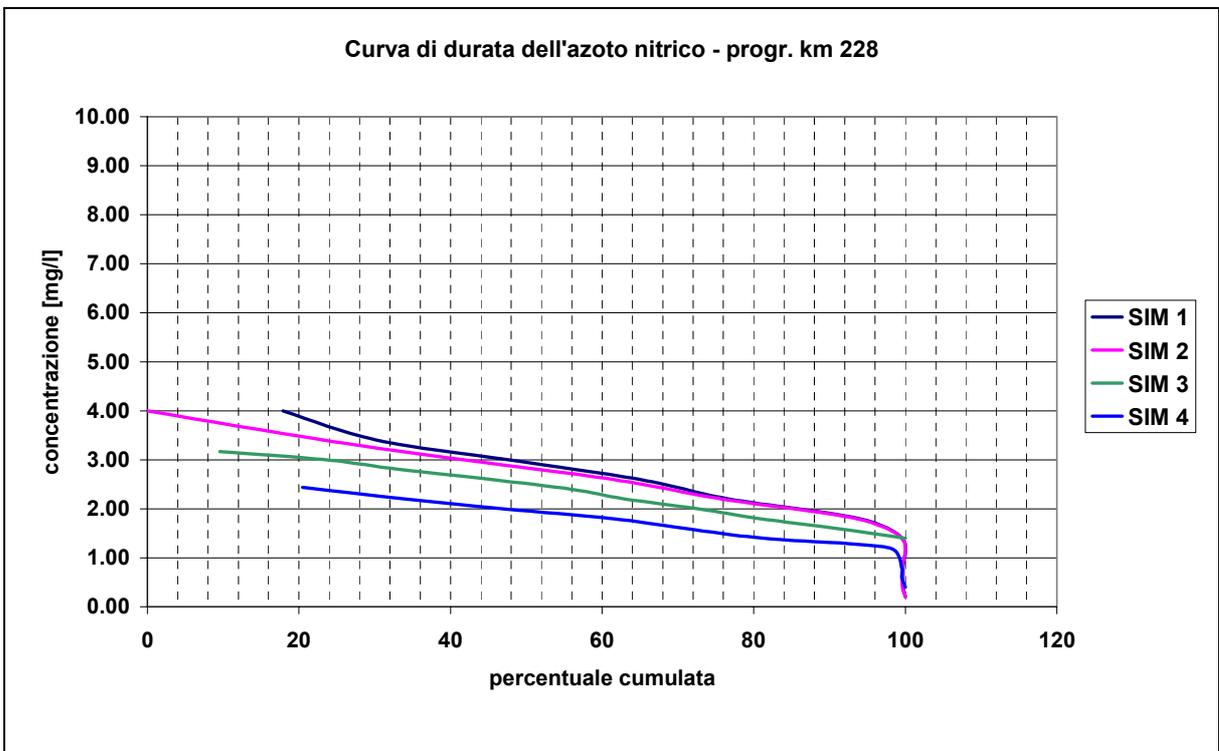
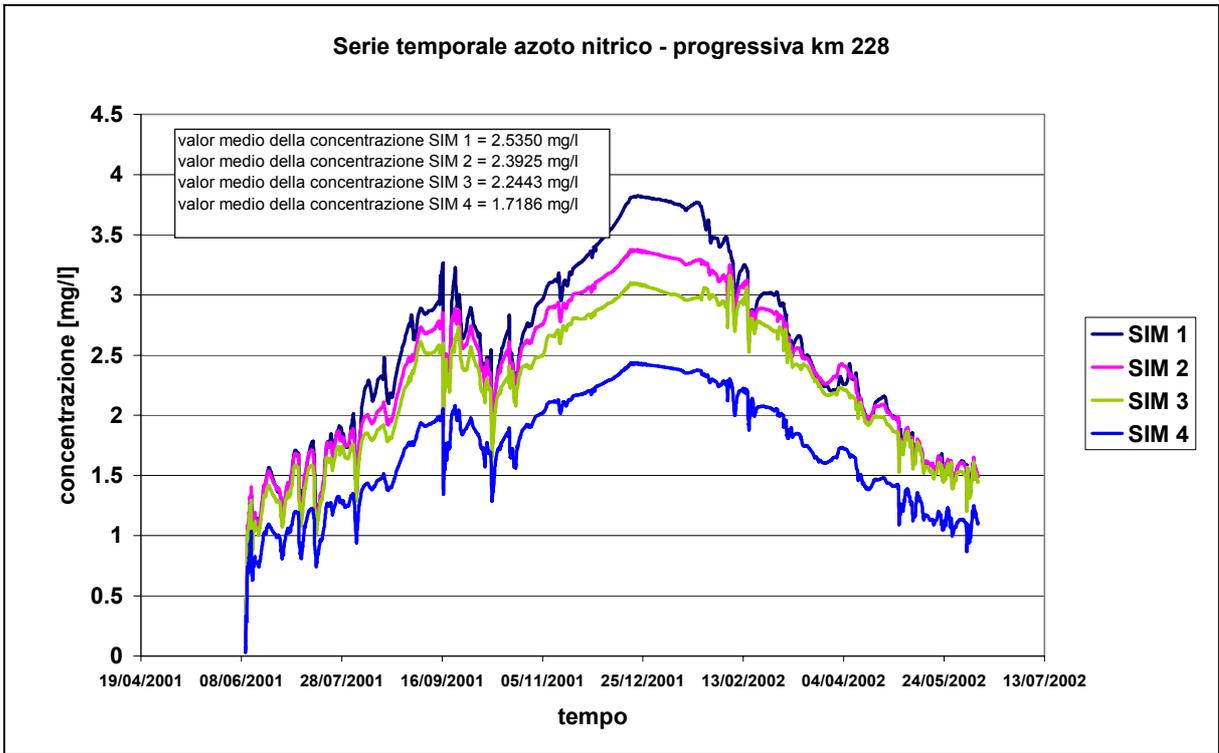


Figura 20 - Andamento temporale dell'azoto nitrico e curva delle percentuali cumulate di concentrazione alla progressiva km 228 in corrispondenza del *flag 5*.

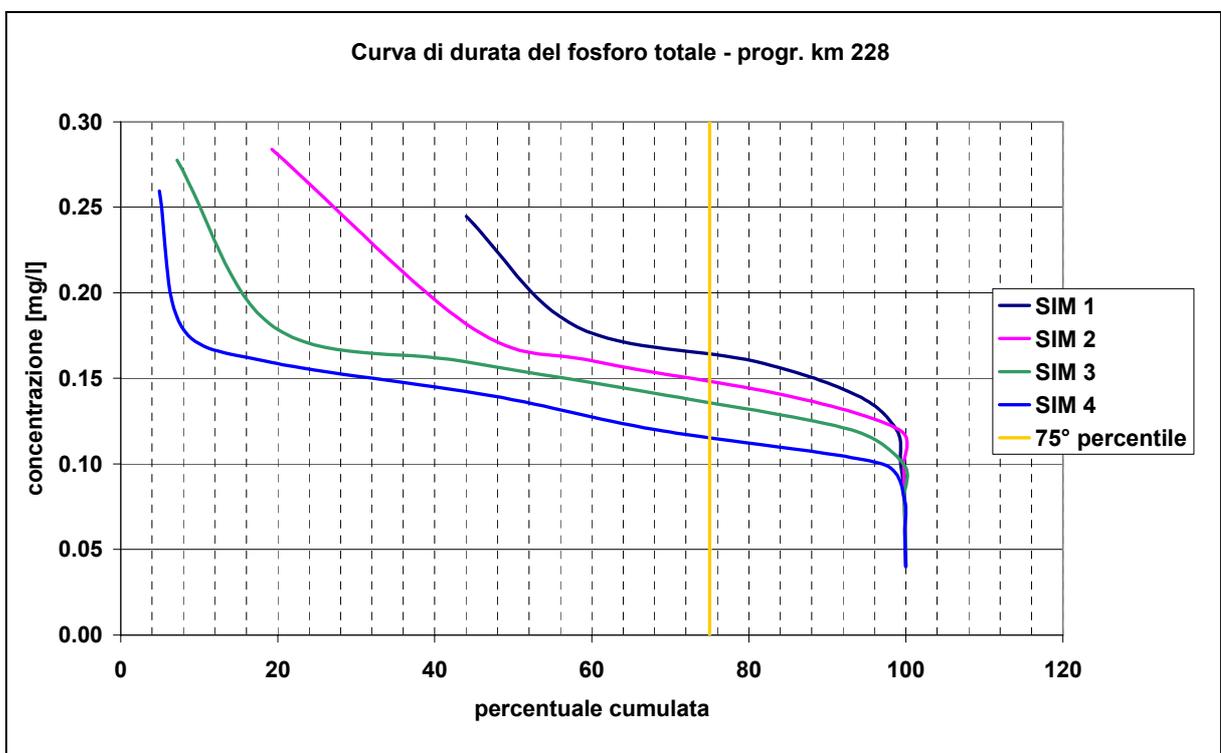
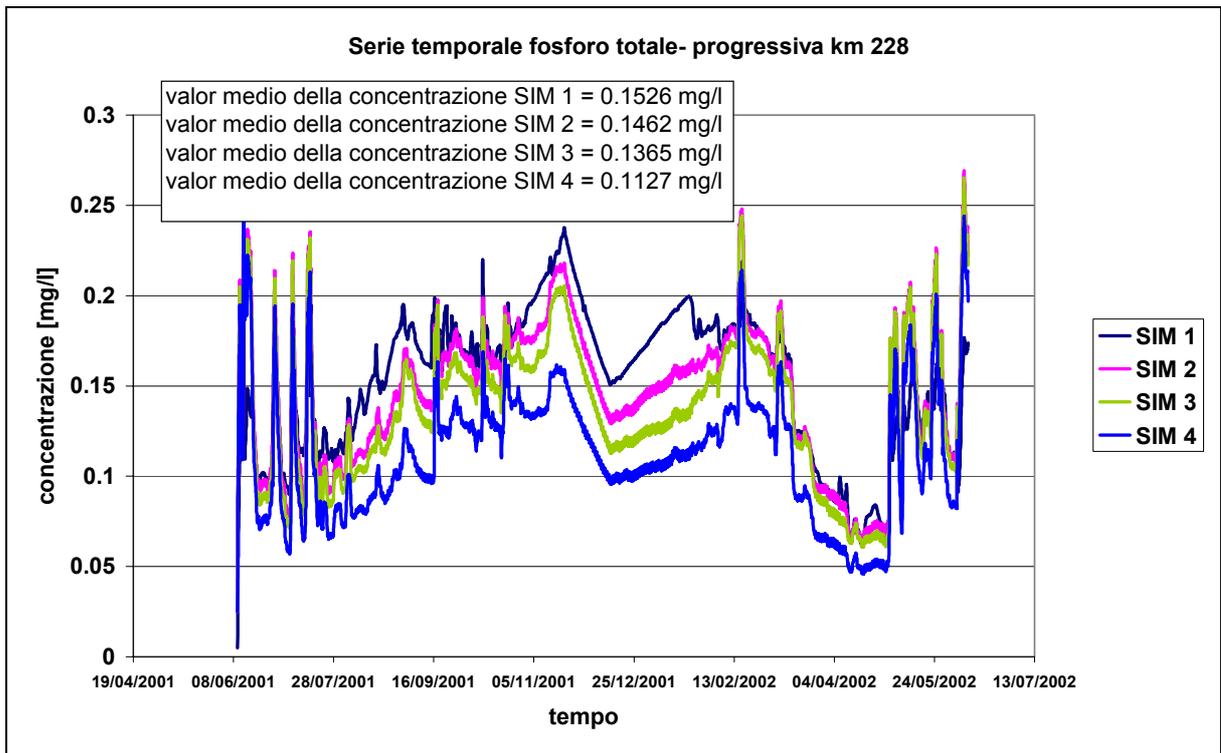


Figura 21 - Andamento temporale del fosforo totale e curva delle percentuali cumulate di concentrazione alla progressiva km 228 in corrispondenza del *flag* 5.

Si può concludere, da quanto sopra, che qualunque tipo di attività volta al miglioramento dello stato qualitativo dell'asta del Po richiede l'attuazione concomitante degli interventi su tutti gli affluenti. Ciò è legato alle continue variazioni dello stato qualitativo dell'asta provocato dalle immissioni dei carichi inquinanti provenienti dai sottobacini. L'abbattimento della concentrazione media ad Isola S. Antonio per il fosforo totale è di circa il 10 % per lo scenario 2 (SIM 3) e pari al 26 % nel caso dello scenario 3 (SIM 4). Tali abbattimenti di concentrazione risultano minori di quelle ottenute alla progressiva 197 km mostrando infatti, che il miglioramento qualitativo delle acque dell'asta del Po associato agli interventi ha una "durata spaziale" limitata al tratto d'asta compreso tra il punto dell'intervento e la confluenza del sottobacino successivo.

Per quanto riguarda il parametro di riferimento definito come il 75° percentile del fosforo totale a Isola S. Antonio, si può osservare nella curva delle percentuali cumulate della concentrazione, come il valore del 75 ° percentile associato allo scenario 3 (SIM 4) sia pari a circa 0.13 mg/l, valore superiore al valore atteso definito, per il 2016, pari a 0.10 mg/l; mentre il valore di concentrazione media calcolato come l'integrale delle concentrazioni istantanee attraverso tutto il transitorio è, per lo scenario 3, pari a 0.11 mg/l.

Il risultato delle simulazioni sintetizzato dall'indicatore sulla concentrazione di fosforo al 75° percentile deve essere interpretato opportunamente, ovvero in termini relativi fra le diverse simulazioni condotte, a causa degli elementi di attenzione precedentemente menzionati. Infatti, il modello numerico implementato risulta essere uno strumento che, attualmente, pur descrivendo correttamente le dinamiche quali-quantitative in alveo, a causa delle ipotesi assunte per la sua messa a punto (legate alla disponibilità di informazioni sugli apporti reali di carico inquinante sull'asta del Po), fornisce risultati cautelativi rispetto a quelli che il sistema reale permette di osservare dai dati di misura (sebbene si evidenzia il fatto che la base mensile dei dati di misura non permette di poter osservare la dinamica reale dei fenomeni, specialmente nelle condizioni più caratteristiche (morbide, piene e magre spinte)).

Nel seguito vengono pertanto fornite alcune considerazioni aggiuntive riguardo all'attività condotta, sia relativamente ad alcuni elementi conoscitivi integrativi di confronto sia rispetto alle finalità dell'applicazione modellistica condotta; attraverso tali commenti si intende evidenziare la valenza dell'utilizzo di un modello di simulazione di tipo deterministico (ovvero su piccola base di tempo) sia nelle condizioni attuali di messa a punto, ovvero nei termini di rappresentazione dello stato attuale e di scenario effettuati, sia, specialmente, nel suo potenziale sviluppo futuro, che permetterà di poter seguire, con miglioramenti successivi dello schema modellistico in funzione dei dati di input disponibili, l'evoluzione reale dello stato qualitativo del sistema Po in tutti i suoi aspetti fenomenologici.

6. CONSIDERAZIONI SULLE SIMULAZIONI MODELLISTICHE CONDOTTE

Nel contesto della terza fase del progetto, che riguarda gli aspetti relativi alla qualità delle acque dei corpi idrici regionali, la sottoattività *“Modellazione matematica dell’apporto e della diffusione di inquinanti nell’ambito del sistema fluviale di pianura” (attività III.0)*, ha avuto come scopo la messa a punto di una procedura di carattere numerico in grado di rappresentare la dinamica degli inquinanti nel sistema fluviale, nelle condizioni attuali e in relazione a scenari derivanti dalle modificazioni indotte sul sistema da opportune opzioni di intervento.

Attraverso il modello matematico applicato all’asta del fiume Po tra l’area metropolitana di Torino ed Isola Sant’Antonio è stato possibile studiare l’effetto prodotto sullo stato qualitativo del fiume da differenti azioni, attraverso *“scenari”*, riconducibili a interventi di carattere strutturale o di tipo normativo.

In un prima fase, l’applicazione congiunta dei moduli HD-AD-WQ del pacchetto MIKE 11 ha permesso di ricostruire le serie temporali delle sostanze inquinanti in diverse sezioni del tratto in esame, su un periodo recente. La taratura del modello ha portato a risultati dai quali si riscontra che lo scostamento tra il bilancio di massa simulato e misurato ad Isola S. Antonio sia per l’azoto nitrico sia per il fosforo totale è più che soddisfacente (differenze tra 1 % e 18 % rispettivamente).

Nella seconda fase sono stati individuati tre scenari di intervento riconducibili a interventi strutturali o di carattere normativo, i quali sono stati confrontati utilizzando il modello matematico previamente tarato. L’approccio modellistico ha mostrato come qualunque tipo di attività per il miglioramento dello stato qualitativo dell’asta del Po richieda l’attuazione concomitante degli interventi in tutti i sottobacini di interesse che confluiscono sull’asta del Po. Ciò è legato alle continue variazioni dello stato qualitativo del fiume provocate dalle immissioni dei carichi inquinanti provenienti dai sottobacini.

Nel seguito, alla luce dei risultati modellistici ottenuti, si riportano alcune considerazioni aggiuntive relativamente alle ipotesi di simulazione assunte ed, in particolar modo, alla finalizzazione di tali simulazioni di *“scenario”* rispetto degli obiettivi di Piano.

Pertanto, per quanto riguarda la finalizzazione delle simulazioni condotte, si richiamano nel seguito: la valutazione degli interventi recentemente realizzati sull’impianto di depurazione della SMAT, gli obiettivi del PTA legati alle prescrizioni dell’Autorità di Bacino del Po (concentrazione massima ammissibile di fosforo a Isola S. Antonio indicata nel PsE) e le problematiche emerse sull’area obiettivo *“Po tratto metropolitano”*.

6.1 Analisi degli interventi già realizzati sull'impianto di depurazione SMAT a Castiglione T.se

6.1.1 Breve descrizione dell'impianto e del suo funzionamento

L'impianto di depurazione a Castiglione Torinese serve circa 3 milioni di abitanti e rappresenta il punto principale di raccolta e trattamento dei reflui di gran parte dell'area metropolitana torinese.

L'impianto di raccolta centralizzato è stato realizzato e viene gestito dalla SMAT: è il più grande impianto di trattamento chimico-fisico-biologico presente in Italia e rappresenta un punto di riferimento tecnologico per gli elevati standards di qualità raggiunti. Alla complessità delle sezioni di trattamento primario-secondario e terziario si associano sistemi di recupero energetico che, mediante la cogenerazione di energia termica ed elettrica per oltre 20 milioni di Kwh/anno, consentono un notevole contenimento dei costi di gestione. L'impianto di depurazione si avvale di specifiche attrezzature per ridurre l'impatto ambientale.

La realizzazione del nuovo sistema di denitrificazione per l'abbattimento dell'azoto e della quarta linea di trattamento delle acque dell'impianto di depurazione è stata inaugurata il 15 maggio '02.

Il secondo semestre del 2002 è quindi da considerarsi un periodo di avviamento non significativo del modulo di denitrificazione, mentre nel 2003 risultano più evidenti gli effetti della nuova capacità di abbattimento dei carichi in entrata, stimata per l'intero anno 2003 intorno al 48%.

Attualmente è in funzione il primo dei 4 moduli in progetto; la previsione è di avere, nel 2007, ad intervento ultimato, un abbattimento atteso dei carichi di nutrienti in entrata superiore al 70%.

6.1.2 Il tratto di Po su cui scarica l'impianto SMAT

Il tratto fluviale di Po su cui insiste lo scarico del depuratore SMAT è sotteso dal canale idroelettrico della centrale di Cimena dell'Enel, che preleva un grosso quantitativo idrico a S. Mauro (110 m³/s) e lo restituisce poco a monte di Chiasso.

Pertanto, nel sito di monitoraggio regionale sul Po a Brandizzo, localizzato qualche chilometro a valle dello scarico del depuratore, le condizioni ambientali rilevate sono molto precarie (SACA scadente sul biennio 2001-2002, principalmente a causa del valore di IBE, ma con i parametri escherichia coli, ammoniaca e nitrati comunque critici), sia per la scarsità dei deflussi in alveo, sia per la presenza dello scarico stesso.

Se in passato le condizioni di carenza idrica sul tratto fluviale sotteso dall'impianto Enel erano sempre piuttosto estreme, è stato recentemente stipulato un accordo fra Enel e Regione Piemonte che ha portato dal 2003 all'assunzione del vincolo di rilascio di un DMV di base (calcolato in base alla normativa regionale vigente e pari a circa $10 \text{ m}^3/\text{s}$) nella sezione di presa dell'impianto, alla traversa di S. Mauro.

Questo vincolo di rilascio ha in effetti notevolmente migliorato le condizioni dei deflussi minimi sul tratto fluviale di valle, come si può osservare dai grafici seguenti che riportano l'andamento delle portate del Po nel 2003 nella nuova stazione idrometrica automatica regionale a Castiglione Torinese.

In effetti, nel 2003 per 274 giorni/anno la portata nella sezione di misura di Castiglione è risultata superiore a $10 \text{ m}^3/\text{s}$, e quindi anche a Brandizzo le condizioni di deflusso sono migliorate sensibilmente.

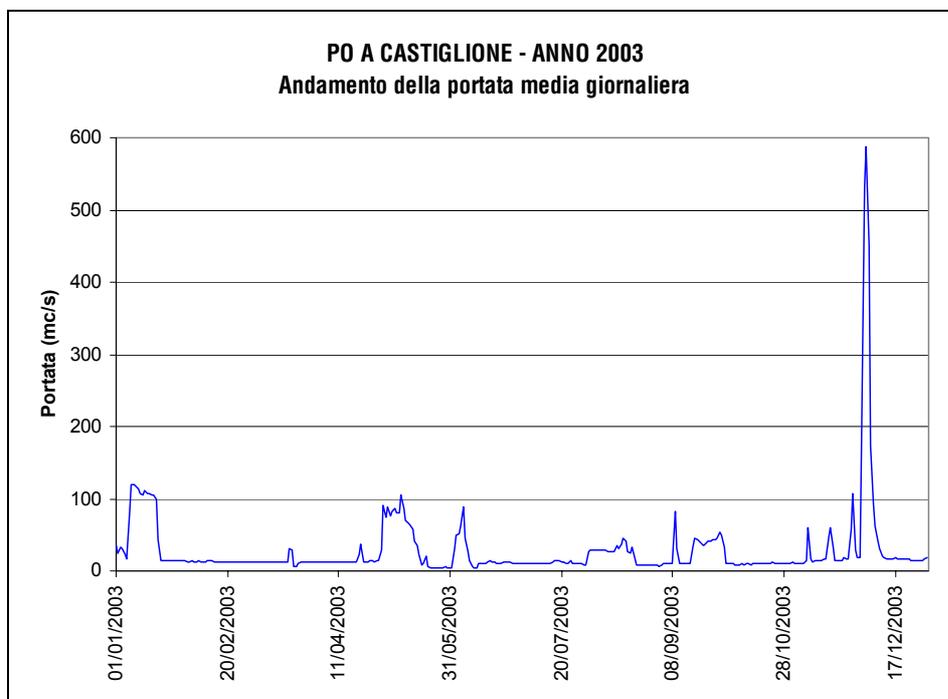


Figura 22 a) - Andamento dei deflussi registrati nella stazione idrometrica sul Po di Castiglione.

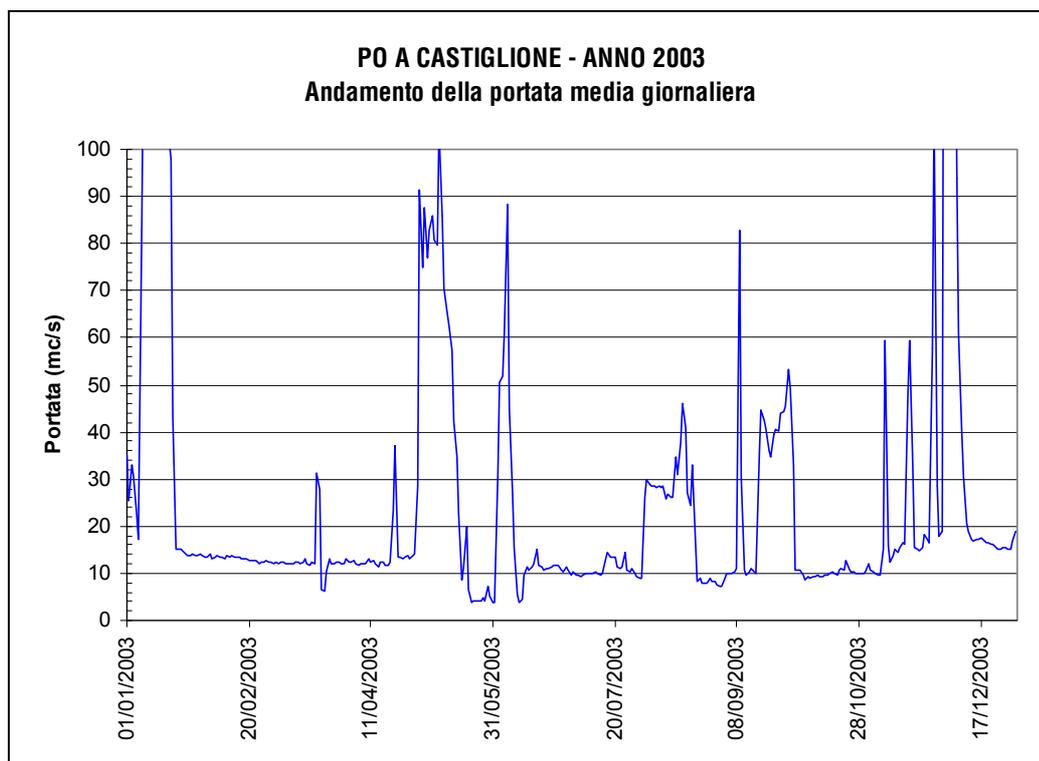


Figura 22 b) - Andamento dei deflussi registrati nella stazione idrometrica sul Po di Castiglione - zoom sulle portate ordinarie.

Nella figura seguente si riportano i valori di concentrazione dei nutrienti (fosforo totale e azoto totale) misurati a Brandizzo da ARPA, nell'ambito dell'attività di monitoraggio ordinaria su base mensile, nel periodo più recente.

I trend in diminuzione delle concentrazioni di fosforo e azoto totali misurate da ARPA a Brandizzo, riportati nel grafico, sono reali ma da considerarsi indicativi, sia perché il periodo di valutazione (4 anni) è breve, sia perché tali parametri risultano significativamente influenzati, come già detto, dalle condizioni idrologiche in alveo, che non si possono considerare naturali, risultando pesantemente alterate dal prelievo idroelettrico a monte, e che risultano differenti fra i tre anni precedenti ed il 2003 a causa del nuovo vincolo del rilascio del DMV a S Mauro.

L'analisi degli andamenti su base mensile mostra una certa ciclicità nelle concentrazioni rilevate: valori maggiori di concentrazione in pieno inverno (quando le portate in alveo sono minori) e valori minimi in piena estate (quando le portate risultano un po' più sostenute ma i carichi sversati dal depuratore sono minori a causa della minor popolazione presente sull'area metropolitana torinese durante il periodo estivo).

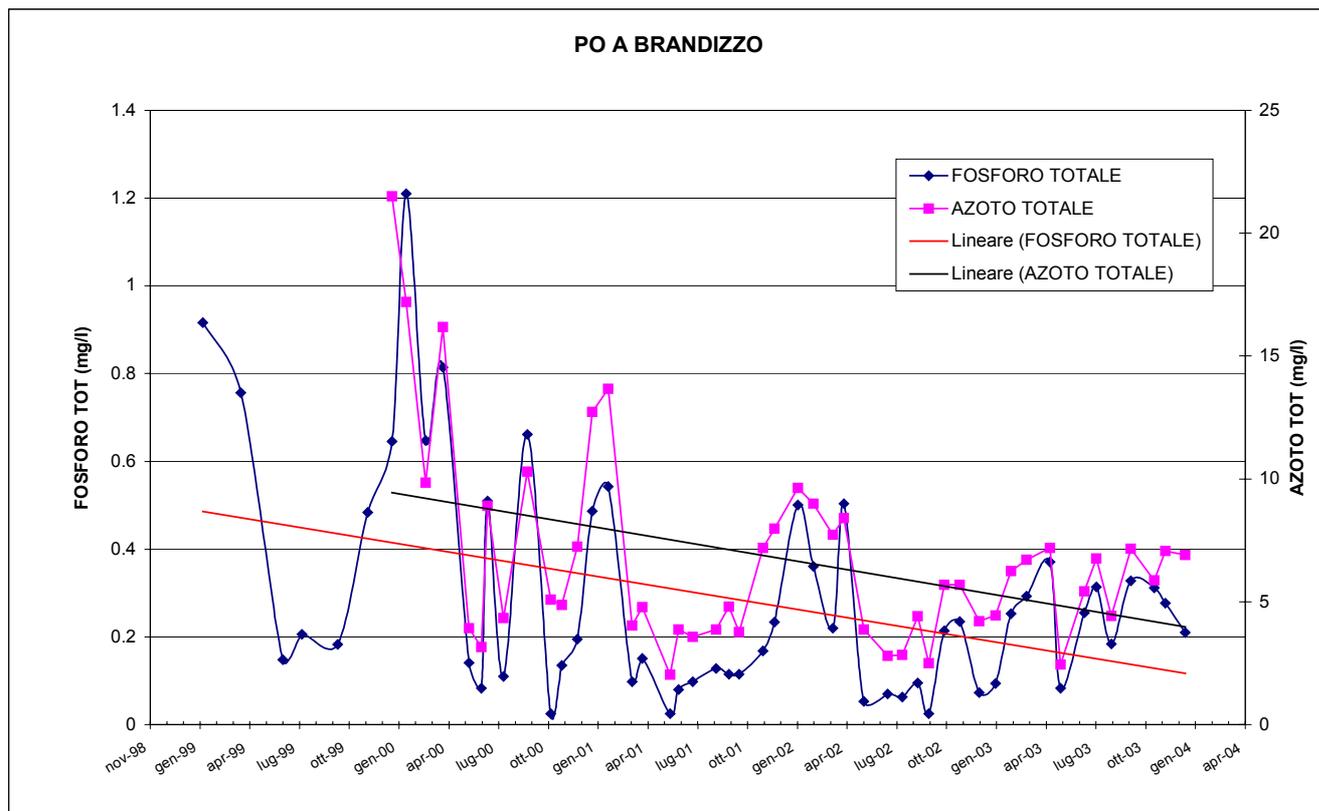


Figura 23 - Andamento delle concentrazioni puntuali misurate da ARPA a Brandizzo (periodo 1999-2003).

Nella tabella seguente sono riportati in sintesi i valori medi annui delle concentrazioni stimate a Brandizzo; è evidente la riduzione dei valori medi di concentrazione rispetto all'anno 2000 (che però è stato caratterizzato da un evento di piena eccezionale), mentre per gli altri anni si osservano condizioni pressoché stazionarie, con addirittura un leggero aumento del fosforo.

Concentrazioni medie a Brandizzo	Fosforo totale (mg/l)	Azoto totale (mg/l)
Osservazioni sul periodo 2000-2003	0.287	6.7
2003	0.248	5.9
2002	0.201	5.6
2001	0.187	6.0
2000	0.432	9.4

Tabella 2 - Concentrazioni medie annue misurate a Brandizzo (valori puntuali mensili)

Se quindi dai valori medi (e dall'andamento grafico) le concentrazioni rilevate nel 2003 non sembrano così differenti rispetto a quelle misurate negli anni precedenti, salvo la presenza di alcuni picchi di

concentrazione all'inizio del periodo, forse la causa è proprio da ricercarsi nelle variate condizioni idrologiche del 2003 sul tratto, in seguito al rilascio del DMV a S. Mauro.

Se in passato i monitoraggi ARPA a Brandizzo venivano condotti quando i deflussi in alveo erano almeno rilevabili, attualmente le portate in alveo presentano persistentemente un valore minimo, e quindi il campionamento viene condotto quasi sempre in condizioni con deflussi più significativi.

Di conseguenza può essere che nel 2003 la variazione di carico veicolato a Brandizzo, dovuta al minor scarico del depuratore SMAT, non si rileva, con campionamenti su base mensile, in termini evidenti di diversa concentrazione in alveo, essendo aumentata mediamente la portata defluente.

Da tutti questi elementi si ricava la sensazione che deve essere posta una certa attenzione a considerare reale l'evidente trend in diminuzione calcolato dai dati di concentrazione misurati.

Risulta quindi difficile poter verificare l'effetto sul corpo idrico dell'entrata in funzione del modulo di denitrificazione dell'impianto SMAT, basandosi sulla variazione a Brandizzo delle concentrazioni fra il 2003 e gli anni precedenti; meglio sarebbe valutare le variazioni di carico veicolato.

Volendo ragionare sui carichi, in prima approssimazione assumendo la stessa metodologia di calcolo dei carichi veicolati annui descritta nell'elaborato III.m/1, si possono stimare sulla sezione di Brandizzo, in base ai valori di portata registrati a Castiglione i seguenti valori di carico:

Carico annuo a Brandizzo – anno 2003			
Ptot		Ntot	
g/s	ton/anno	g/s	ton/anno
7.62	240	145.87	4600

Tabella 3 – Carichi veicolati totali annui stimati a Brandizzo (anno 2003)

In mancanza però dei valori misurati di portata a Castiglione per gli anni precedenti (la stazione è entrata in funzione nel 2002), non è stato possibile condurre la stima dei carichi veicolati sul periodo precedente.

Lo stesso calcolo dei carichi veicolati può essere condotto per la sezione di monitoraggio a Torino, per l'anno 2003, per valutare il contributo in termini di carico del bacino di monte, ottenendo i seguenti valori:

Carico annuo a Torino – anno 2003			
Ptot		Ntot	
g/s	ton/anno	g/s	ton/anno
7.40	233	257.35	8116

Tabella 4 – Carichi veicolati totali annui stimati a Torino (anno 2003)

Fra Torino e Brandizzo c'è il canale Cimena, che in effetti si porta via a S. Mauro una buona fetta del carico rilevato a Torino, sebbene il regime di morbida e di piena del Po può contribuire significativamente al carico complessivo trasportato a valle.

Quindi si può assumere che a Brandizzo il carico rilevato è, in condizioni di magra, prevalentemente da attribuirsi al depuratore SMAT, a meno del contributo legato ai deflussi sul Po superiori alla portata massima di derivazione a S. Mauro

I carichi sversati in Po nel 2002 (dato ufficiale fornito da SMAT nell'ambito dell'attività di censimento degli impianti principali di trattamento condotta dalla Regione Piemonte) dall'impianto di Castiglione sono stati:

- 4848 t/anno per l'azoto (con un'efficienza circa del 25% sui carichi in entrata)
- 282 t/anno per il fosforo (con un'efficienza circa del 70% sui carichi in entrata)

ed in effetti tali valori corrispondono ai valori di carico stimato a Brandizzo per il 2003.

Assumendo nel 2003 un'aumentata efficienza sull'abbattimento dell'azoto, legata all'attivazione del modulo di denitrificazione, fino al 48% del carico entrante nell'impianto, si può calcolare che nel 2003 siano state sversate dallo scarico SMAT circa 3350 t/a di azoto.

I carichi valutati dai dati di concentrazione misurati a Brandizzo risultano pertanto compatibili con tali stime, ma non permettono di evidenziare, mancando il valore di riscontro per gli anni precedenti, l'entità del beneficio in alveo dell'attivazione del primo modulo di abbattimento azoto dell'impianto SMAT.

Nei prossimi anni, e specialmente dopo il 2007, quando sarà completato il potenziamento dell'impianto con l'attivazione completa dei moduli di denitrificazione, e sulle aste fluviali si potrà considerare quasi a regime il vincolo di garanzia di rilascio idrico a valle di tutte le derivazioni, e anche alcuni interventi previsti dai Piani d'Ambito sul comparto fognario e depurativo saranno realizzati, è plausibile aspettarsi un più evidente miglioramento della qualità delle acque del Po, non solo nel tratto subito a valle dello scarico del depuratore, monitorato nella sezione di controllo di Brandizzo, bensì, come anche il modello numerico messo a punto dimostra, anche sull'intera asta fluviale.

6.2 L'obiettivo del PsE a Isola S. Antonio

Il Piano Stralcio per il controllo dell'Eutrofizzazione (PsE) dell'Autorità di Bacino del Po³ assume quale parametro di riferimento per la valutazione dell'efficacia della propria azione i valori di concentrazione massima ammissibile di fosforo stabiliti per la sezione strategica del fiume Po al confine regionale, corrispondenti a 0,12 mg/l quale obiettivo intermedio al 2008 e a 0,10 mg/l al 2016.

³ Adottato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del fiume Po con Delibera n. 15 del 31.01.2001.

Analizzando i dati di concentrazione di fosforo e azoto misurati da ARPA a Isola S. Antonio negli ultimi 4 anni, nell'ambito della sua attività istituzionale di monitoraggio su base mensile, si osserva un andamento sostanzialmente stabile dei dati, ovvero non risultano trend evidenti, come si osserva dalla figura seguente.

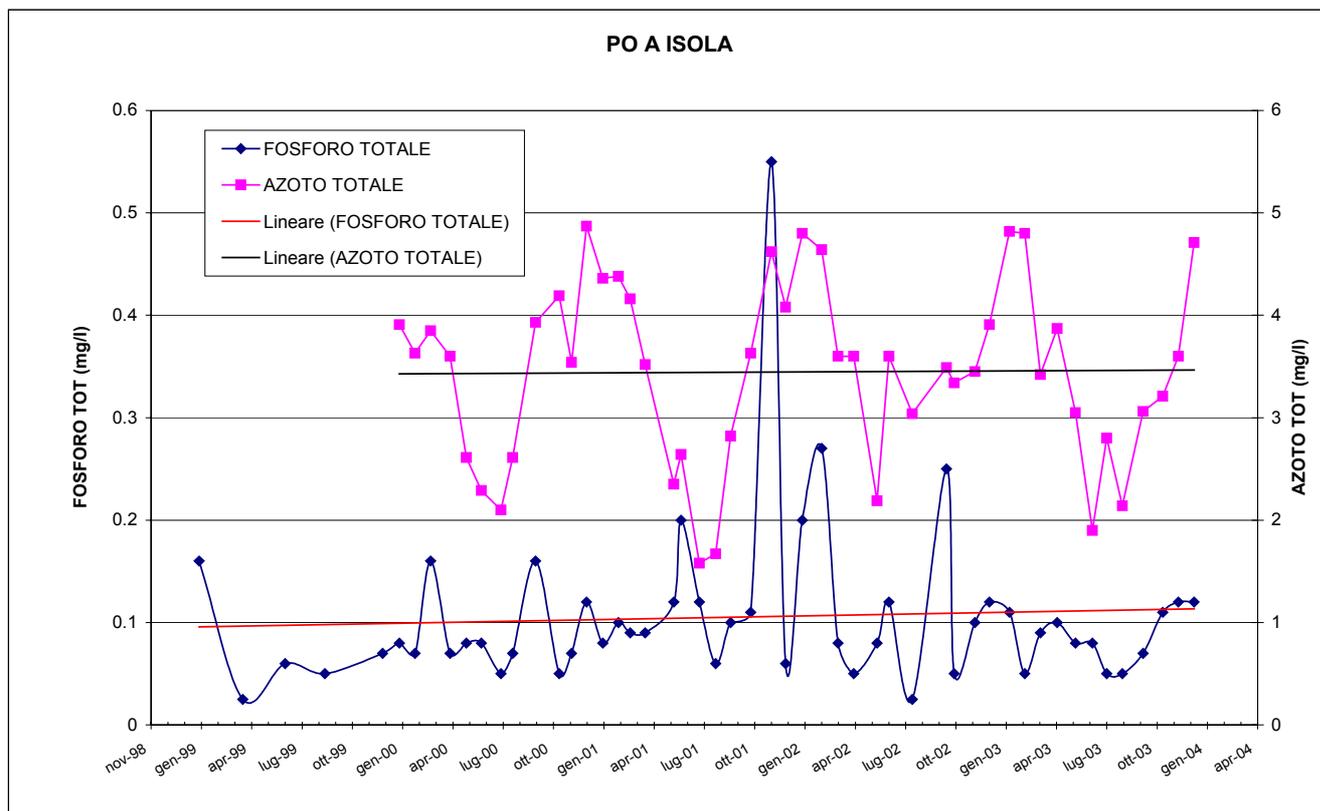


Figura 24 - Andamento delle concentrazioni puntuali misurate da ARPA a Isola S. Antonio (periodo 1999-2003).

In tabella sono riportati i valori medi annui delle concentrazioni di fosforo stimate a Isola S. Antonio dai dati del monitoraggio, insieme ad alcuni valori di confronto relativi ai deflussi giornalieri disponibili alla stazione di misura regionale delle portate.

Concentrazioni medie a Isola	Fosforo totale (mg/l)	Portate a Isola (m ³ /s)		
		Qmax	Qmedia	Qmin
Osservazioni sul periodo 2000-2003	0.109			
2003	0.086	4530.0	321.1	42.7
2002	0.122	4623.8	686.5	113.3
2001	0.140	2201.9	405.9	121.1
2000	0.088	n.d.	n.d.	n.d.

Tabella 5 - Concentrazioni medie annue misurate a Isola S. Antonio (valori puntuali mensili).

Il leggero trend che si osserva sul fosforo dai dati mensili, riportato anche al dato medio annuo, non risulta facilmente interpretabile, ma non sembra particolarmente significativo essendo basato su soli 4 anni, considerando inoltre che le condizioni idrologiche nella sezione di monitoraggio sembrano piuttosto differenti di anno in anno.

Attualmente, pertanto, il valore medio sul periodo recente delle concentrazioni si attesta su 0.11 mg/l, di poco superiore al valore limite al 2016 indicato dal PsE, mentre per il solo 2003 esso risulta inferiore al valore limite.

Avendo a disposizione, dalle elaborazioni ARPA, anche le stime delle concentrazioni al 75° percentile, si hanno i seguenti valori:

Concentrazioni 75° percentile a Isola	Fosforo totale (mg/l)
2003	0.11
2002	0.16
2001	0.12
2000	0.08

Tabella 6 – Valori al 75° percentile delle concentrazioni misurate a Isola S. Antonio

I valori al 75° percentile risultano superiori al valore limite al 2016 indicato dal PsE, salvo che nel 2000; ma l'anno 2003 presenta un valore che è superiore solo del 10% rispetto al valore limite.

Confrontando tali valori derivanti dalle misure mensili con quelli risultanti dalle simulazioni deterministiche condotte su base giornaliera con il modello numerico (cfr. relazione tecnica III.o/1) si riscontrano alcune discordanze sui valori soglia al 75° percentile, specialmente quelli risultanti dalle simulazioni di scenario condotte con il modello, che considerano la realizzazione di alcuni interventi a scala di bacino finalizzati al raggiungimento della concentrazione massima ammissibile.

L'analisi modellistica può pertanto aver prodotto dei risultati che a Isola sembrano essere piuttosto cautelativi rispetto ai valori attualmente misurati, anche se la simulazione si è fermata al luglio 2002 e quindi non "vede" l'anno 2003 e gli scenari ipotizzati implementano condizioni teoriche e generalizzate di intervento sui bacini afferenti all'asta del Po.

E' però da mettere in evidenza anche come i monitoraggi ARPA su base mensile siano di fatto finalizzati alla classificazione ambientale secondo il protocollo del D.Lgs 152/99 e non a valutazioni più specifiche sui carichi e sulle condizioni "evolutive" dei parametri significativi in una sezione, quale il fosforo a Isola.

Sarebbe quindi necessario poter disporre di misurazioni più continue di tale parametro nella sezione di controllo di Isola, sia per meglio rappresentare l'andamento reale del carico di fosforo veicolato (specialmente durante gli eventi di morbida e di piena), sia per permettere una migliore e più realistica

valutazione del valore di concentrazione al 75° percentile, sia per meglio calibrare il modello numerico messo a punto.

Per altro a breve saranno disponibili sul Po i dati quali-quantitativi delle stazioni automatiche di Chivasso, Casale e Castiglione, (recentemente attivate e in fase di validazione) che permetteranno di affinare la taratura del modello disponendo di dati qualitativi in continuo e della possibilità di meglio rappresentare l'evoluzione sull'asta delle fenomenologie che interessano i principali parametri qualitativi.

Affinando la taratura del modello e definendo in dettaglio gli interventi proponibili sugli affluenti e sui principali scarichi diretti, sarà più agevole poter implementare correttamente simulazioni di scenario al variare delle condizioni idrologiche al contorno e dei quantitativi di inquinanti apportati al sistema idrografico di pianura, e quindi valutarne (in termini non solo cautelativi) gli effetti e i benefici reali.

6.3 L'area obiettivo "Po tratto metropolitano"

L'analisi conoscitiva condotta ha messo in evidenza la specifica situazione del tratto del fiume Po all'interno dell'area metropolitana Torinese, soggetto a forti pressioni (sottensioni e scarichi) e dalla modificazione del regime idraulico indotta principalmente dalla traverse di derivazione (La Loggia, ex Michelotti e diga del Pascolo).

La condizione di deflusso potamale in regime idrologico ordinario e di magra nei tratti soggetti a rigurgito provoca effetti di sedimentazione e rimovimentazione del materiale di trasporto, di alterazione dei parametri chimico-fisici (in particolare temperatura e ossigeno disciolto) più direttamente influenti sulla componente biotica, di eutrofizzazione nelle zone di ristagno.

La presenza sistematica di elementi artificiali longitudinali (rivestimenti spondali) e trasversali (traverse e paratoie di regolazione), unitamente all'alterazione delle caratteristiche del substrato di fondo per effetto dei fenomeni di sedimentazione di materiale fine, determina una situazione di criticità rispetto alle biocenosi acquatiche.

Su questo contesto si sovrappone l'effetto degli scarichi non collettati o abusivi provenienti dal reticolo idrografico secondario e degli apporti di affluenti secondari ma fortemente degradati sul piano della qualità chimico-fisica (Banna, Chisola, Sangone).

Vanno infine considerati il rilevante interesse di questo tratto sul piano fruizionale e di qualificazione dell'ambiente urbano e la presenza del prelievo SMAT di Moncalieri destinato ad uso potabile.

La situazione sopra delineata rende evidentemente delicato e precario l'equilibrio ecologico di questo tratto fluviale, ed è prevedibile una tendenza al peggioramento di alcuni fattori in assenza di specifici

interventi normativi (accumulo di sedimenti, stato di tossicità acuta e cronica delle acque e dei sedimenti, degrado della catena trofica).

Riguardo l'evoluzione delle pressioni esercitate dagli scarichi industriali, essa risulta stimabile in funzione dei processi di ammodernamento, sviluppo e trasformazione determinati dalle condizioni di mercato e dalle vigenti leggi ambientali; a tal riguardo non si possono che indicare invece tendenze positive in termini di riduzione dell'impatto.

Le problematiche rilevate e l'analisi a priori dell'evoluzione delle pressioni non possono allo stato attuale essere analizzate con il modello numerico di qualità messo a punto sull'intero tratto.

L'analisi modellistica condotta in fase III sull'intera asta del Po evidenzia per il tratto metropolitano, rappresentato dalla sezione di Torino – parco Michelotti dove sono condotti i campionamenti ARPA per l'analisi di qualità, (sezione, peraltro, che essendo a valle dei principali tratti rigurgitati non è del tutto rappresentativa delle reali problematiche fluviali), condizioni che richiedono interventi strutturali ben organizzati e che interessino sia gli affluenti, sia il miglioramento delle condizioni ecologiche del tratto stesso.

Per tener conto delle problematiche dei tratti rigurgitati e dei fenomeni di sedimentazione è necessario poter integrare il modello sia con informazioni più di dettaglio sulla geometria dell'asta, sui manufatti presenti, su tutte le pressioni effettivamente esistenti (anche gli scarichi acque bianche, per esempio) sia utilizzando moduli di simulazione specialistici dei fenomeni di trasporto solido e di veicolazione di inquinanti nella matrice solida.

Dalla miglior conoscenza dei fenomeni idrodinamici e qualitativi sul tratto sarà più agevole identificare gli obiettivi di riqualificazione necessari per correggere le criticità sopra evidenziate e i relativi interventi specialistici.

APPENDICE 1

**Descrizione del codice di calcolo MIKE 11 -
moduli HD, AD e WQ**

1. IL SISTEMA MODULARE

Il programma MIKE 11 è stato realizzato dal DHI (Danish Hydraulic Institute) a partire dal programma SYSTEM11 che dal 1972, anno della sua messa a punto, ad oggi, è stato usato in un grande numero di applicazioni in tutto il mondo con ottimi risultati e riconoscimenti.

MIKE 11 è costituito da una serie di moduli di calcolo che consentono di modellizzare diversi fenomeni quanti-qualitativi del ciclo dell'acqua. Si riconoscono in particolare i seguenti ambiti di modellizzazione.

- **Idrodinamica:** simulazione del flusso in reti di canali a pelo libero comunque connesse e con eventuali caratterizzazioni quasi-2D (collegamenti tra canali di flusso e celle di esondazione).
- **Idrologia:** calcolo della trasformazione afflussi-deflussi a partire da dati di pioggia, temperatura ed evapotraspirazione su bacini naturali o urbani, ricorrendo a due moduli di calcolo: uno basato su un modello idrologico a parametri concentrati a serbatoi (NAM) per il calcolo della pioggia netta e la simulazione della distribuzione dell'acqua in superficie e nel sottosuolo; l'altro basato sull'approccio dell'idrogramma unitario, consente di ricorrere a diverse formulazioni per il calcolo delle perdite e per la definizione della forma dell'idrogramma di piena.
- **Qualità dell'acqua:** simulazione del processo idrodinamico di trasporto e dispersione di una sostanza in soluzione o in sospensione di qualsiasi natura nel corpo idrico, eventualmente caratterizzata da una cinetica di decadimento lineare; simulazione di una serie di processi qualitativi (ciclo BOD-DO con nitrificazione-denitrificazione, ciclo del fosforo, fenomeno dell'eutrofizzazione, trasporto di metalli pesanti) in cui il modulo di trasporto-dispersione è formalmente accoppiato al prescelto modulo di qualità dell'acqua.
- **Trasporto solido e morfologia fluviale:** simulazione disaccoppiata (senza modificazione della geometria della rete di canali) o accoppiata (con feed-back sulla geometria dei canali e calcolo delle trasformazioni morfologiche) del trasporto solido, per mezzo di una serie di moduli in cui sono implementate diverse formulazioni di trasporto al fondo ed in sospensione universalmente riconosciute; calcolo della stabilità delle forme di fondo.

Moduli complementari del codice di calcolo permettono in modo agevole e ampiamente "user friendly" la gestione dei dati di ingresso (geometrie, serie storiche), con modalità di intervento e implementazione analogiche e grafiche.

Il sistema di restituzione dei risultati prevede una serie di analisi statistiche sui risultati della modellazione, oltreché la rappresentazione dei risultati su sezioni, profili, piani quotati, con interfaccia in input ed in output verso i più comuni sistemi G.I.S. e l'animazione dinamica a video delle variazioni temporali di fenomeni non stazionari.

2. IL CODICE DI CALCOLO MIKE 11 - MODULO IDRODINAMICO (HD)

MIKE 11 (Danish Hydraulic Institute, 1993) è un programma generale per la simulazione del flusso idrico a pelo libero in estuari, fiumi, sistemi d'irrigazione e simili corpi idrici. MIKE 11 simula il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. E' possibile tenere conto di:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenti).

L'adozione del programma di simulazione MIKE 11 consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

2.1 Descrizione delle condizioni di moto simulate

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

- approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito;
- approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle, cioè simulare i fenomeni di rigurgito;
- approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc..

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

2.2 Equazioni generali di De Saint Venant

MIKE 11, mediante il terzo tipo di formulazione, risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- a) il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- b) la pendenza del fondo è piccola;

- c) le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali adottate:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

dove:

A = area della sezione bagnata (m²);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m^{1/2} s⁻¹);

g = accelerazione di gravità (m s⁻²);

h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);

Q = portata (m³/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale adottata (m² s⁻¹).

2.3 Simulazione delle correnti veloci con l'approccio dell'onda dinamica

Per le correnti veloci viene applicata un'equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente. Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

2.4 Approssimazione dell'onda diffusiva

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare tutti i termini legati alla quantità di moto nelle equazioni generali di De Saint Venant:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine $\partial h/\partial x$. Per ragioni di stabilità questo termine nella soluzione viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

2.5 Descrizione in corrispondenza di strutture

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. In MIKE 11 la descrizione di ogni struttura viene effettuata in un segmento di corso d'acqua.

Sono previsti i tipi di strutture seguenti.

Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

Tipo 2. Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

Tipo 3. Tombino

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso. Deve essere inserita una relazione Q-h che contempli tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

Tipo 4. Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_{j1}) \cdot Z_{j2}$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

Tipo 6. Strutture mobili

Un particolare modulo di calcolo associato al MIKE 11 HD, lo Structure Operation SO, consente di simulare all'interno della rete la presenza di una o più strutture mobili, con la caratteristica di luce sotto battente o di stramazzo a ventola. La posizione della struttura mobile (sia essa l'apertura della paratoia o l'abbattimento della ventola) viene determinato automaticamente dal modello in funzione del tempo di altre variabili del sistema. Tali variabili possono essere un livello, una differenza di livelli tra due punti della rete di simulazione, una portata od una differenza di portate. E' inoltre possibile prevedere per ogni struttura una duplice regola operativa di funzionamento, standard o di emergenza, automaticamente attivata dal superamento di assegnate soglie critiche di livello o di portata.

2.6 Resistenza d'attrito

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler.

Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{C^2AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{M^2AR^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a $1/n$, essendo n il coefficiente di Manning.

2.7 Condizioni iniziali

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

2.8 Metodo di soluzione

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).

La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

2.9 Condizioni al contorno

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne, attrito indotto dal vento. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad esempio la scala di deflusso per una sezione d'alveo).

3. IL MODULO DI TRASPORTO DISPERSIONE - MIKE 11 - AD

Il modulo AD (Advection-Dispersion) simula il trasporto e la dispersione di sostanze conservative o non conservative. La trattazione delle sostanze non conservative viene effettuata per mezzo dell'applicazione di una cinetica di decadimento lineare del primo ordine. Per la simulazione di reazioni biologico-chimiche più complesse il modulo di calcolo deve essere accoppiato al modulo WQ.

Il modulo è basato sulla soluzione dell'equazione monodimensionale di conservazione della massa di una sostanza disciolta o sospesa:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_s \cdot q$$

nella quale:

- C = concentrazione (unità arbitraria);
- D = coefficiente di dispersione idrodinamica ($m^2 s^{-1}$);
- A = area della sezione (m^2);
- K = coefficiente di decadimento lineare (s^{-1});
- C_s = concentrazione di un "pozzo" o di una "sorgente";
- q = portata laterale.

L'equazione rappresenta due fenomeni di trasporto che sono quello convettivo (movimento del soluto con la velocità media del flusso) e quello dispersivo dovuto ai gradienti di concentrazione.

Le assunzioni su cui è basata la validità della legge sono le seguenti:

- per la monodimensionalità dell'equazione non è considerato alcun gradiente trasversale di concentrazione all'interno di ogni sezione di calcolo, ciò significa che le concentrazioni di eventuali pozzi o sorgenti sono assunte come istantaneamente disciolte nel corpo idrico con una concentrazione pari alla concentrazione media di quella sezione;
- la sostanza è conservativa o soggetta ad una reazione del primo ordine;
- è applicata la legge di diffusione di Fick, cioè il trasporto dispersivo è proporzionale al gradiente di concentrazione.

L'equazione è risolta con un sistema numerico alle differenze finite implicito, centrato nello spazio e nel tempo in modo tale da minimizzare ogni possibile errore di dispersione numerica. E' stato inoltre introdotto un termine correttivo in modo da ridurre l'errore di troncamento del terzo ordine, rendendo possibile la simulazione di profili di concentrazione molto ripidi.

E' possibile simulare contemporaneamente più di 50 composti chimici in soluzione.

Il modulo AD richiede il risultato di una applicazione idrodinamica, i coefficienti di dispersione lungo la rete di corsi d'acqua simulata (costanti o funzione dinamica della velocità della corrente) e le condizioni iniziali e al contorno. La condizione al contorno di valle può essere sostituita da una condizione di pura convezione che permette la simulazione di sistemi aperti.

4. IL MODULO DI QUALITA' DELL'ACQUA - MIKE 11 WQ

Il modulo di qualità dell'acqua è utilizzato per studi sulla qualità delle acque di fiumi o canali in aree influenzate dall'attività antropica, nei quali il consumo di ossigeno possa essere largamente influenzato dalla presenza di carichi di materiale organico o chimico.

Il modulo WQ contiene una serie di equazioni di bilancio di massa delle sostanze che intervengono principalmente nel ciclo dell'ossigeno (ciclo BOD/DO con nitrificazione e denitrificazione). Altri moduli di qualità presenti in MIKE 11 consentono la trattazione del ciclo del fosforo (modulo PHOS), dell'eutrofizzazione (modulo EU) e dei metalli pesanti (modulo HM).

Il modulo WQ (BOD/DO) consente a sua volta l'attivazione di livelli di simulazione sempre più raffinati a seconda del tipo e della consistenza dei dati e delle informazioni di base sulla qualità del corpo idrico. Basilamente i sei livelli di soluzione delle equazioni di qualità dell'acqua sono:

1. BOD/DO;
2. BOD/DO con scambio di materiale organico con il letto del corso d'acqua (deposizione, risospensione di BOD);
3. BOD/DO con nitrificazione;
4. BOD/DO con scambio con il fondo, nitrificazione e denitrificazione;
5. BOD/DO con inclusione della richiesta immediata di ossigeno e scambio con il fondo;
6. BOD/DO con tutti i processi menzionati.

Le variabili di calcolo sono:

- ossigeno disciolto (DO);
- materiale organico (BOD);

- azoto e ammoniaca ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$);
- nitrati (NO_3^-);
- batteri coliformi.

Una serie di processi biologico/chimici di trasformazione rappresentati da cinetiche di vario ordine e grado consentono di rappresentare i seguenti fenomeni:

- degradazione della sostanza organica;
- produzione fotosintetica dell'ossigeno;
- respirazione di piante e animali;
- scambio di ossigeno con l'atmosfera (reazione);
- scambio di BOD sospeso con il fondo (deposizione, risospensione);
- richiesta d'ossigeno per il BOD sul fondo;
- nitrificazione e denitrificazione;
- decadimento dei batteri dipendente dalla radiazione solare, dalla temperatura e dalla salinità dell'acqua (negli estuari).

Le espressioni sono influenzate da fattori esterni come la temperatura, la radiazione solare e le portate.

Il bilancio di massa per i parametri di qualità che rientrano nelle equazioni sono calcolati per mezzo di un integratore di Runge-Kutta del 4° ordine in un sistema di soluzione a due passi iterativi di calcolo accoppiato con la soluzione del modulo AD. In pratica, nel corso di una simulazione, ogni composto presente nell'ambiente idrico viene trasportato e disperso nella corrente di flusso (modulo AD) e, a ogni passo di tempo, viene calcolato il bilancio di massa per interazione con l'ambiente idrico (modulo WQ).

I risultati esprimono, come quelli del modulo AD, profili e diagrammi temporali di concentrazione dei singoli composti nel corso della simulazione.

APPENDICE 2

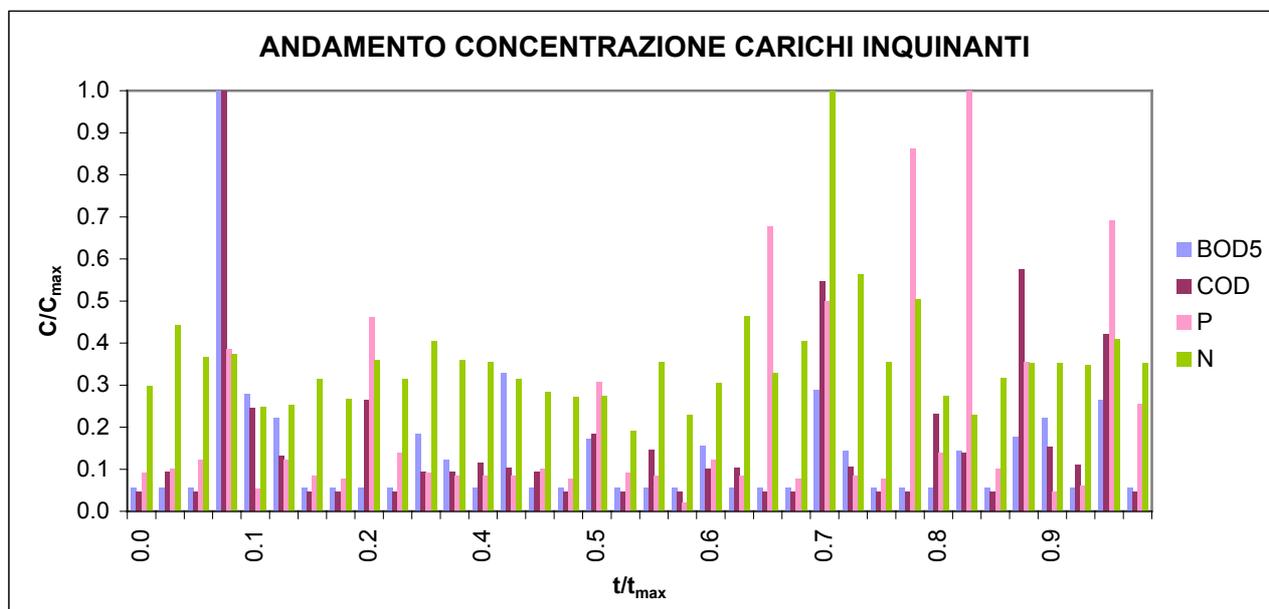
Misure di qualità lungo l'asta del Fiume Po (periodo 1/1/2000-31/12/2002). Stazioni di misura: Villafranca, Casalgrasso, Carmagnola, Carignano, Moncalieri, Torino, San Mauro, Brandizzo, Lauriano, Verrua Savoia, Trino, Casale Monferrato, Valenza, Isola

DATE:

0.0 = 27 gennaio 2000
0.3 = 28 novembre 2000
0.5 = 19 giugno 2001
0.7 = 16 gennaio 2002
0.9 = 24 settembre 2002
1.0 = 16 dicembre 2002

Tempo (t_{max}) = 36 mesi

STAZIONE PO A MONCALIERI



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 18 mg/l

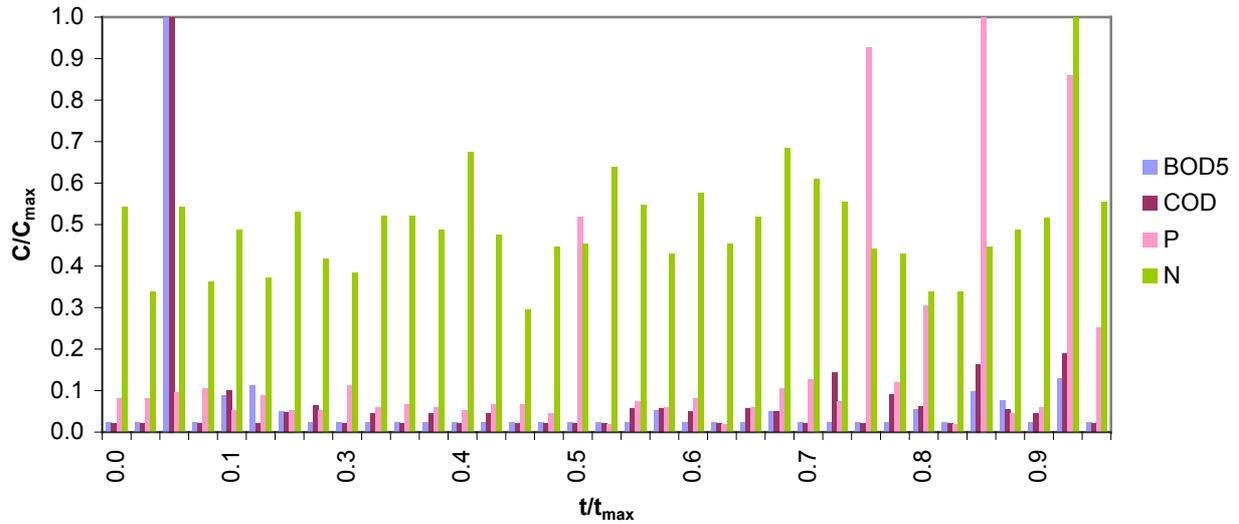
COD (C_{max}) = 53 mg/l

P (C_{max}) = 1.3 mg/l

N (C_{max}) = 13.1 mg/l

STAZIONE PO A TORINO

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 45 mg/l

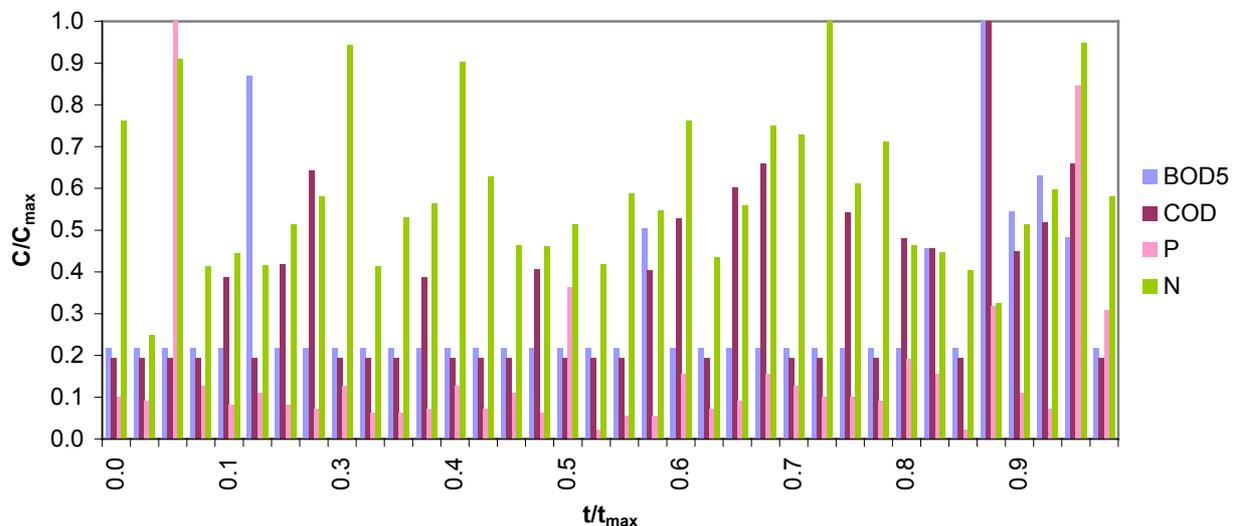
COD (C_{max}) = 119 mg/l

P (C_{max}) = 1.35 mg/l

N (C_{max}) = 8.84 mg/l

STAZIONE PO A S. MAURO

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

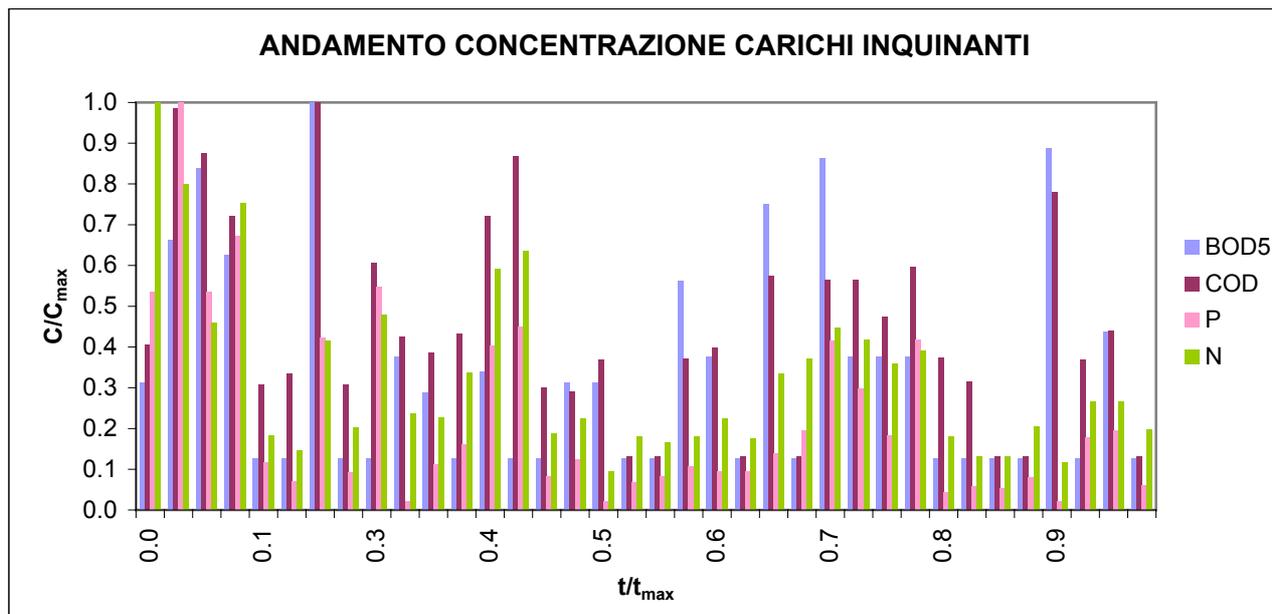
BOD₅ (C_{max}) = 4.6 mg/l

COD (C_{max}) = 12.9 mg/l

P (C_{max}) = 1.1 mg/l

N (C_{max}) = 6.04 mg/l

STAZIONE PO A BRANDIZZO



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

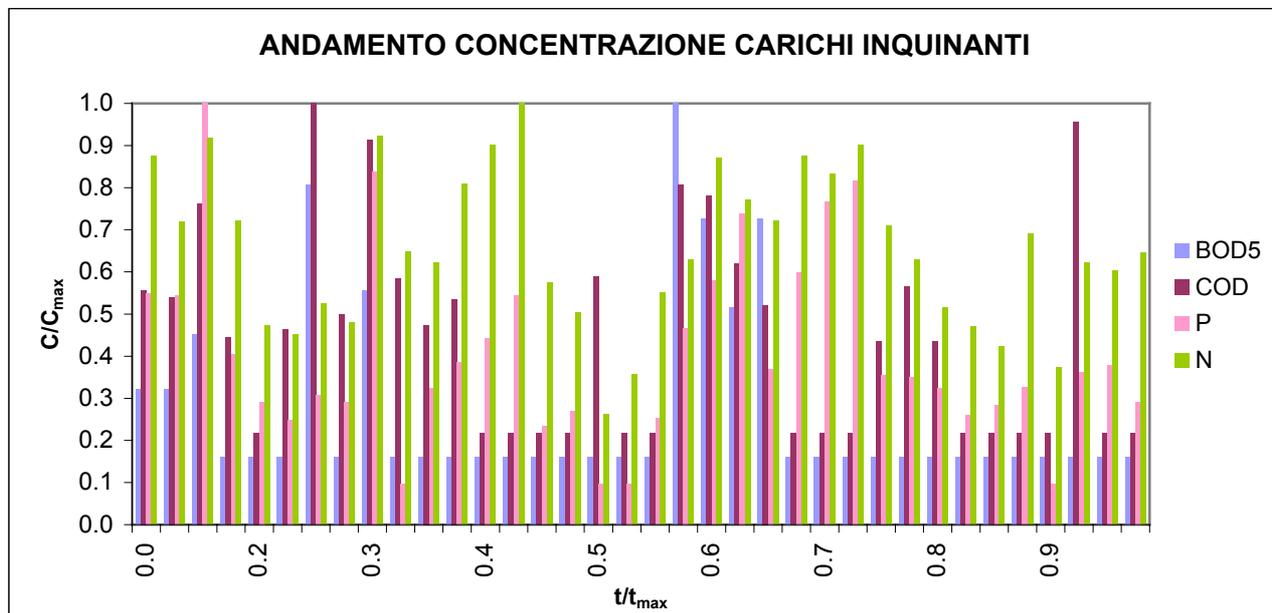
BOD₅ (C_{max}) = 8 mg/l

COD (C_{max}) = 19 mg/l

P (C_{max}) = 1.21 mg/l

N (C_{max}) = 21.5 mg/l

STAZIONE PO A LAURIANO



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

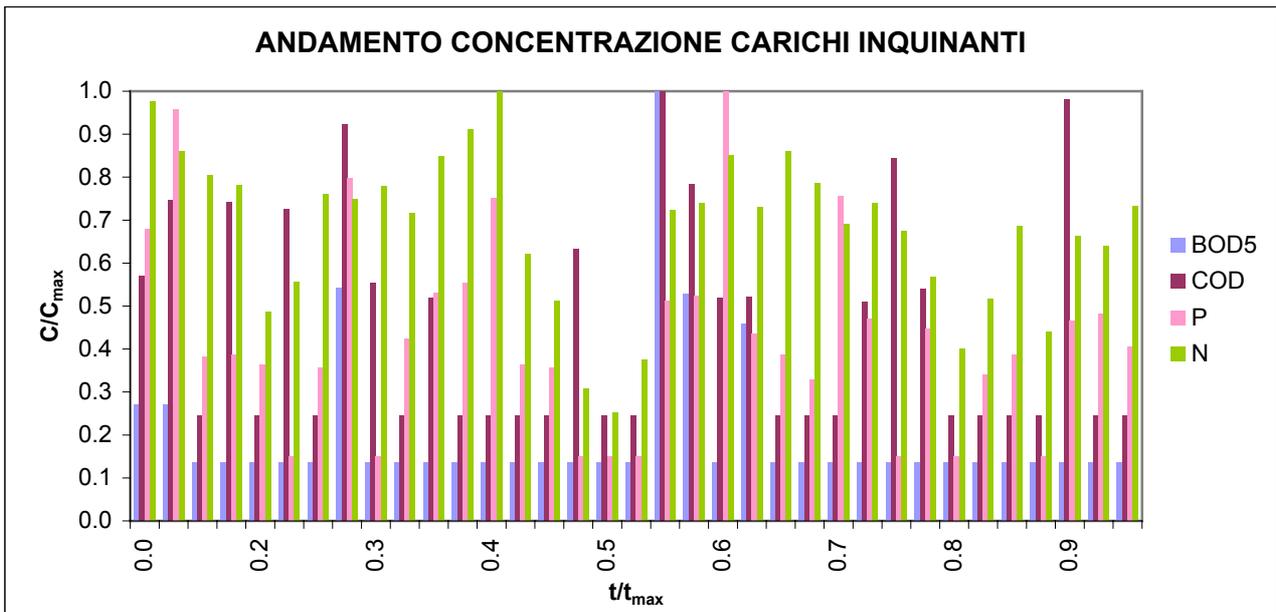
BOD₅ (C_{max}) = 6.2 mg/l

COD (C_{max}) = 11.5 mg/l

P (C_{max}) = 0.257 mg/l

N (C_{max}) = 6.06 mg/l

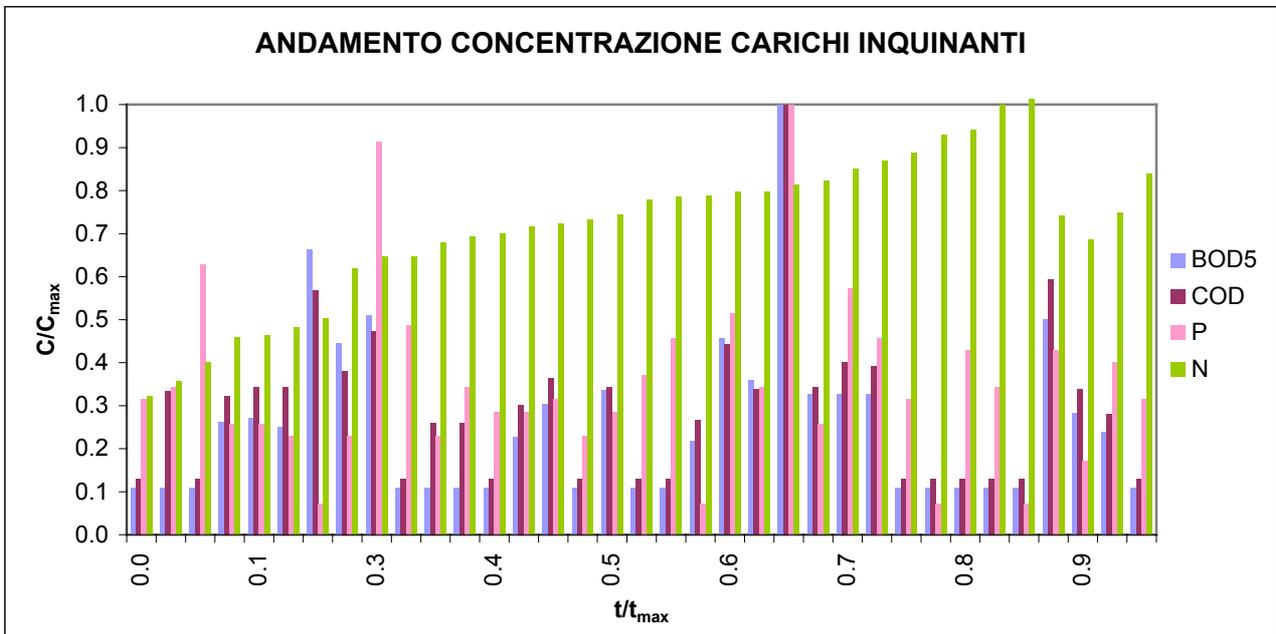
STAZIONE PO A VERRUA SAVOIA



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 7.4 mg/l
 COD (C_{max}) = 10.2 mg/l
 P (C_{max}) = 0.168 mg/l
 N (C_{max}) = 5.11 mg/l

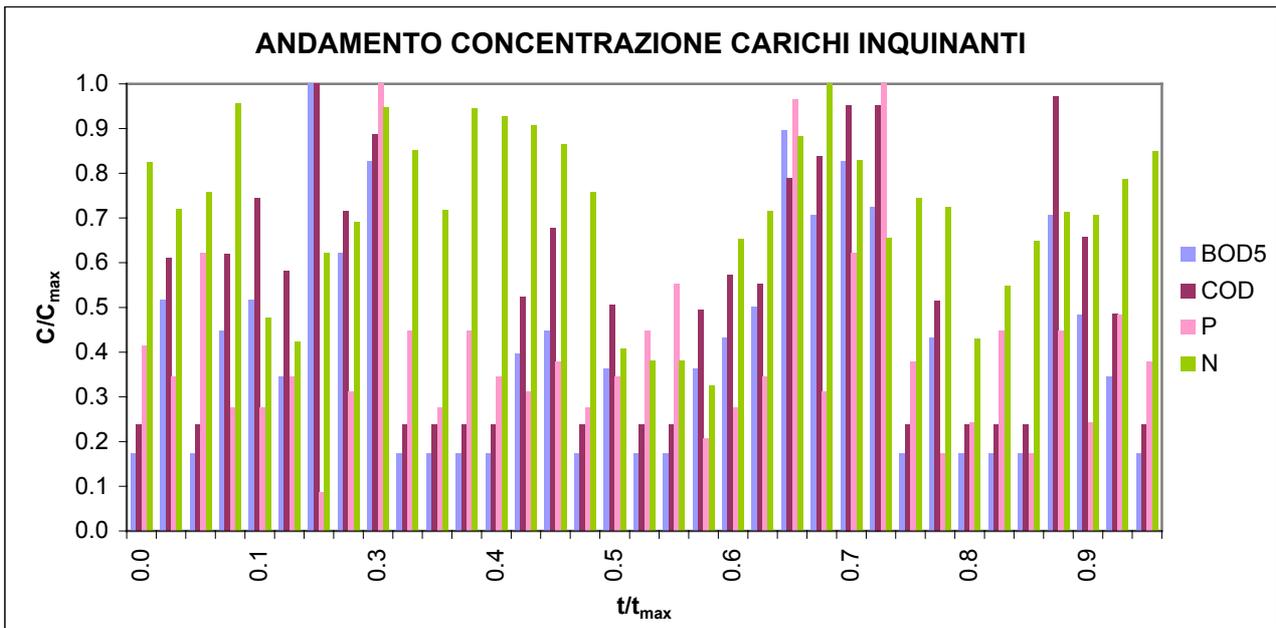
STAZIONE PO A TRINO



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 9.2 mg/l
 COD (C_{max}) = 19.2 mg/l
 P (C_{max}) = 0.35 mg/l
 N (C_{max}) = 5.4 mg/l

STAZIONE PO A CASALE MONFERRATO



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

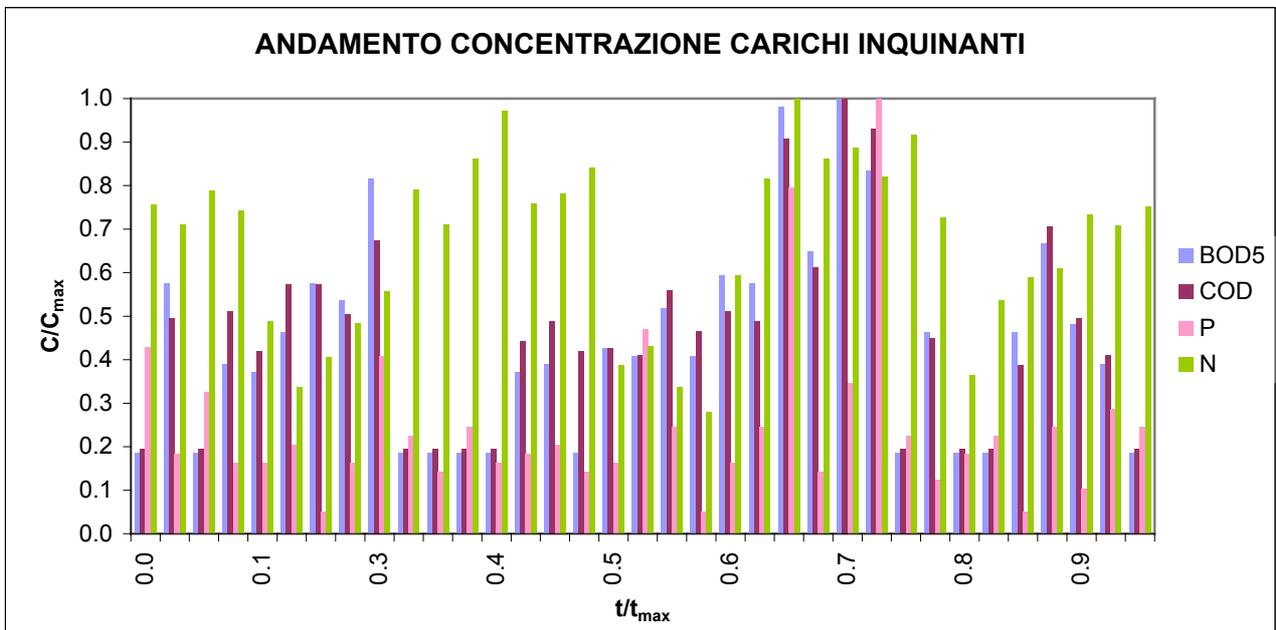
BOD₅ (C_{max}) = 5.8 mg/l

COD (C_{max}) = 10.5 mg/l

P (C_{max}) = 0.29 mg/l

N (C_{max}) = 5.11 mg/l

STAZIONE PO A VALENZA



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 5.4 mg/l

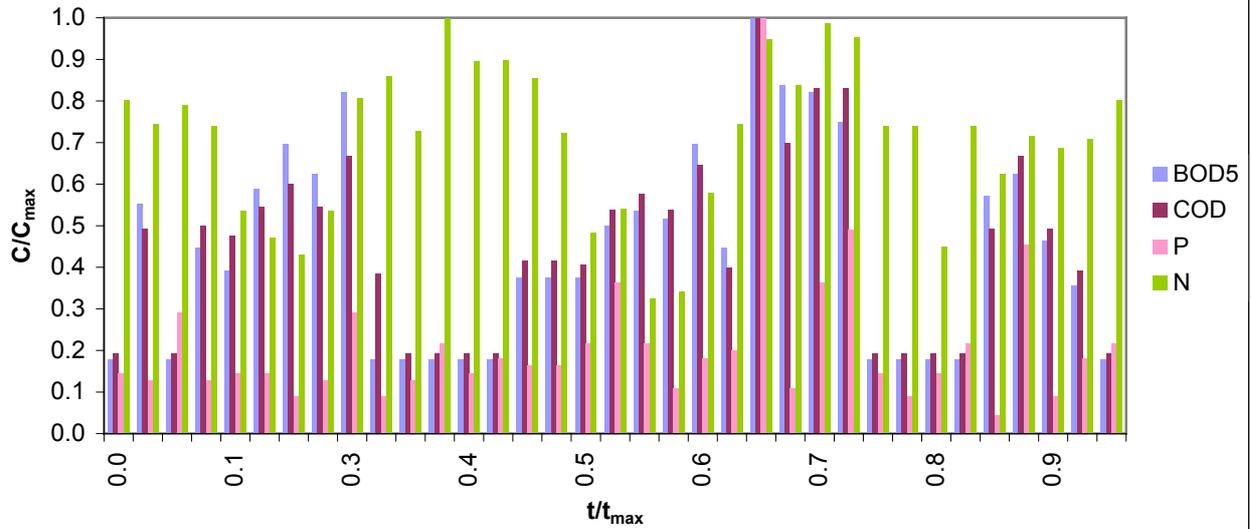
COD (C_{max}) = 12.9 mg/l

P (C_{max}) = 0.49 mg/l

N (C_{max}) = 5.23 mg/l

STAZIONE PO A ISOLA SANT'ANTONIO

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 5.6 mg/l

COD (C_{max}) = 13 mg/l

P (C_{max}) = 0.55 mg/l

N (C_{max}) = 4.87 mg/l

APPENDICE 3

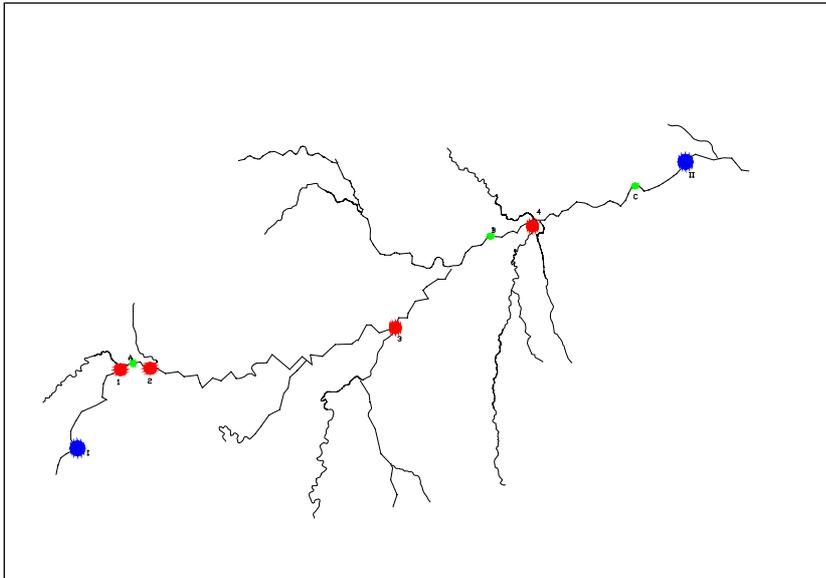
**Attivazione del modello quali-quantitativo
sull'asta del Tanaro nel tratto S.Martino Alfieri -
Montecastello (fase 1)**

**3/1 Schema del tratto simulato e principali
risultati delle verifiche di taratura**

**3/2 Misure di qualità lungo l'asta del Fiume
Tanaro**

APPENDICE 3/1

**Schema del tratto simulato e principali
risultati delle verifiche di taratura**



IMMISSIONI:

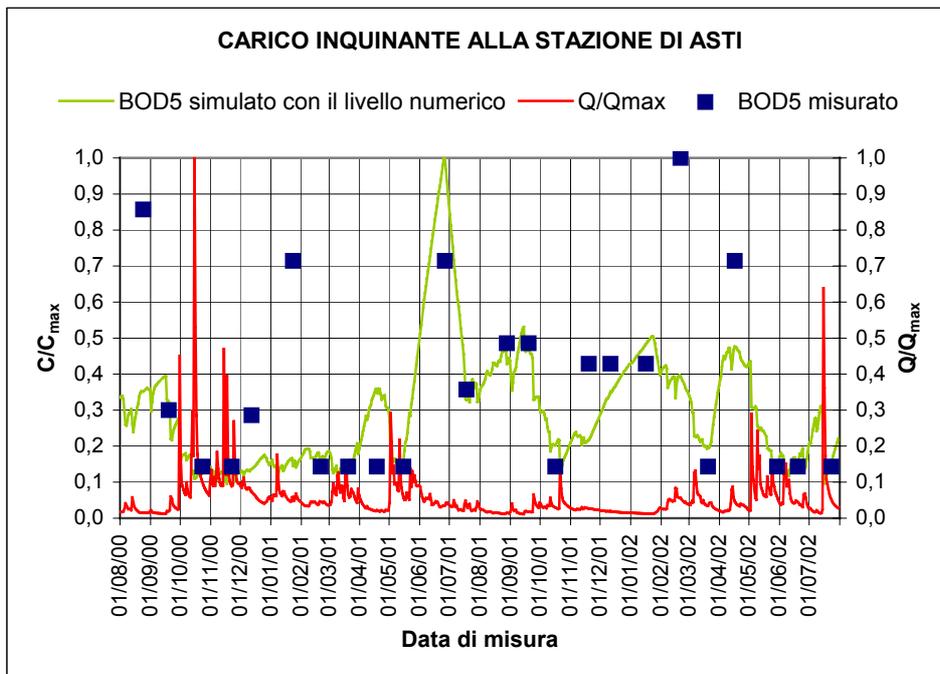
1 <i>Borbore</i>	progressiva	177.44 Km
2 <i>Versa</i>		181.86 Km
3 <i>Belbo</i>		217.30 Km
4 <i>Bormida</i>		235.30 Km

STAZIONI DI MISURA:

A <i>Asti</i>	progressiva	180.60 Km
B <i>Alessandria</i>		227.74 Km
C <i>Montecastello</i>		235.30 Km

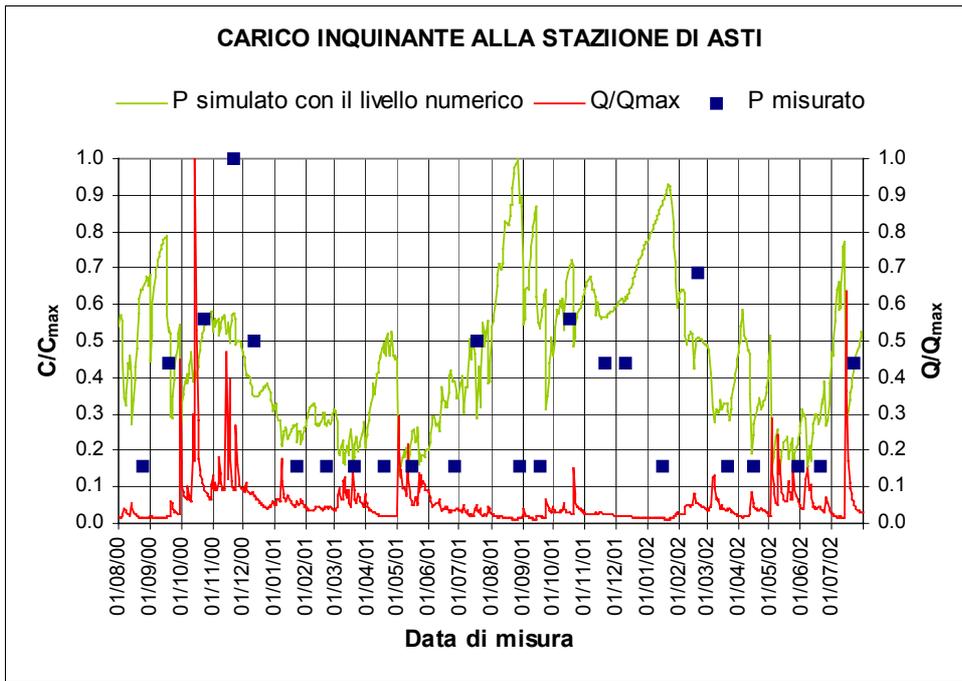
I Condizione al contorno monte:		
Q(t)	progressiva	173.40 Km
II Condizione al contorno valle:		
z(t)	progressiva	244.70 Km

Tanaro dalla progr. Km 173.406 (Tanaro a San Martino Alfieri) alla progr. km. 244.712 (Tanaro Montecastello).



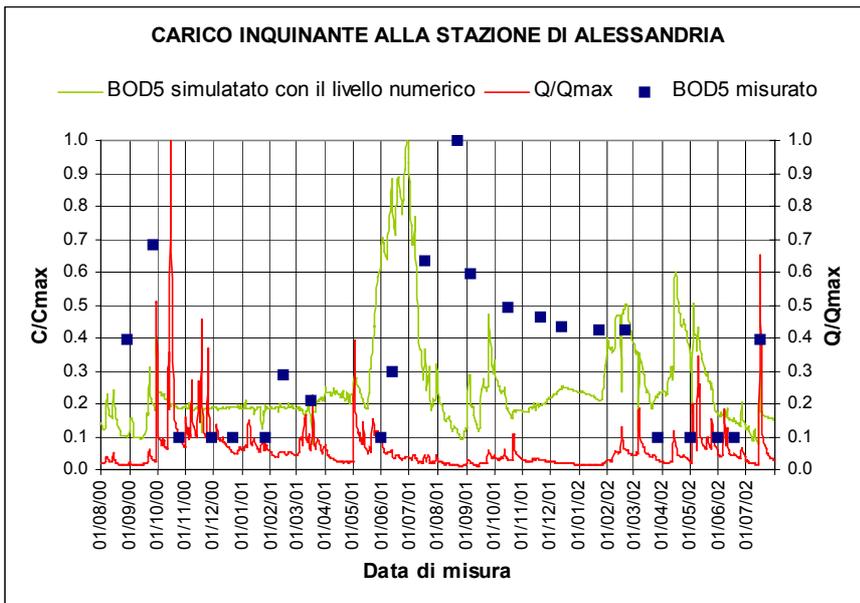
VALORI MASSIMI:
 BOD₅ sim. = 10.9 mg/l
 BOD₅ mis. = 7 mg/l
 Q_{max} = 1343.7 m³/s

Fiume Tanaro: andamento carico inquinante di BOD₅ alla stazione di Asti



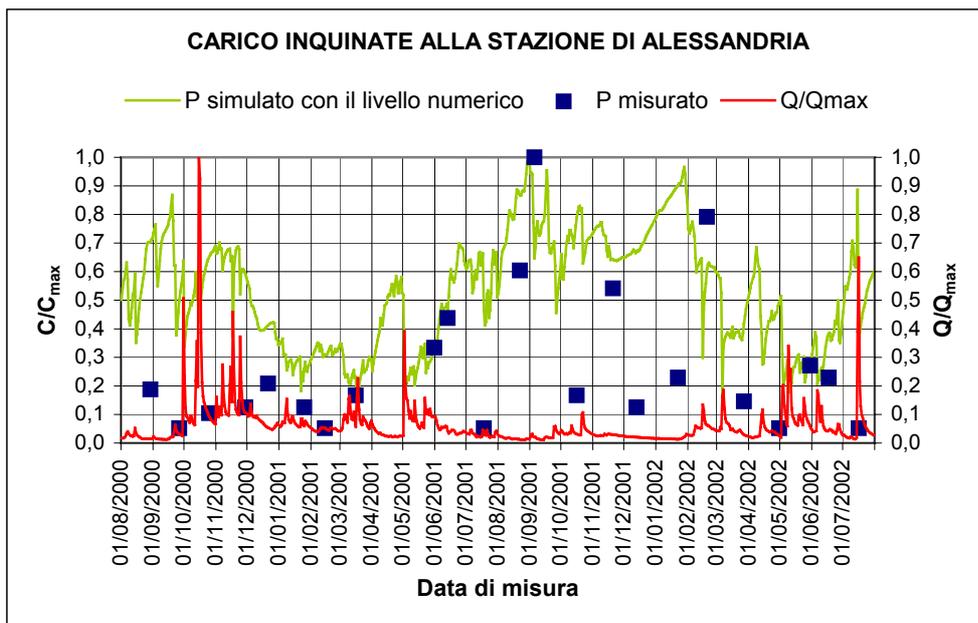
VALORI MASSIMI:
 P sim. = 7 mg/l
 P mis. = 0,16 mg/l
 Q_{max} = 1343.7 m³/s

Fiume Tanaro: andamento carico inquinante di P alla stazione di Asti.



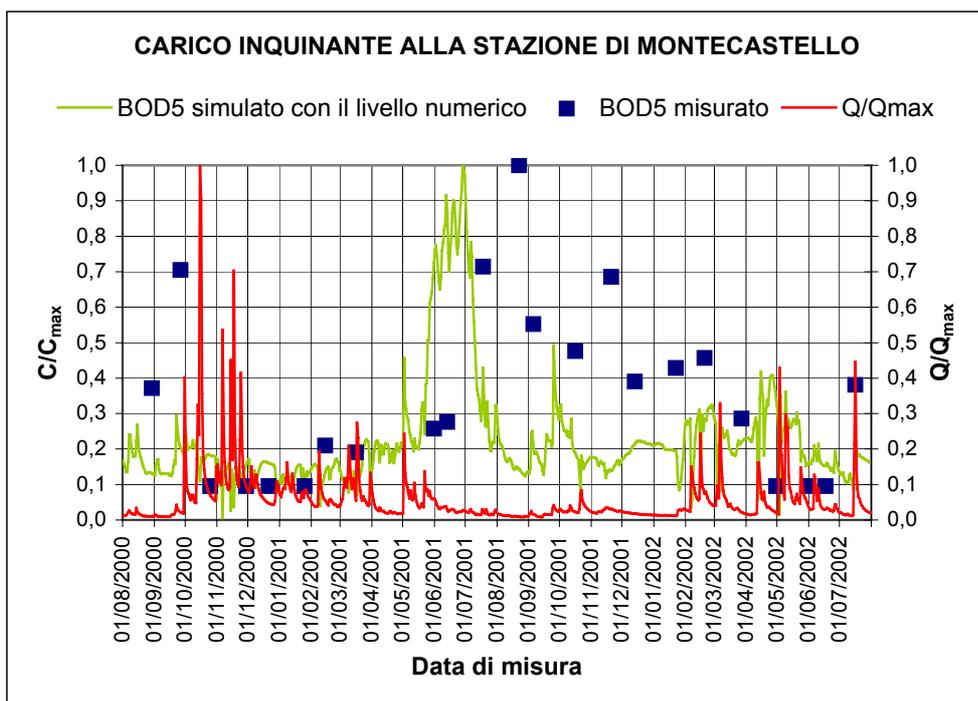
VALORI MASSIMI:
 BOD₅ sim. = 4,69 mg/l
 BOD₅ mis. = 10.1
 Q_{max} = 1328.23 m³/s

Fiume Tanaro: andamento carico inquinante di BOD₅ alla stazione di Alessandria.



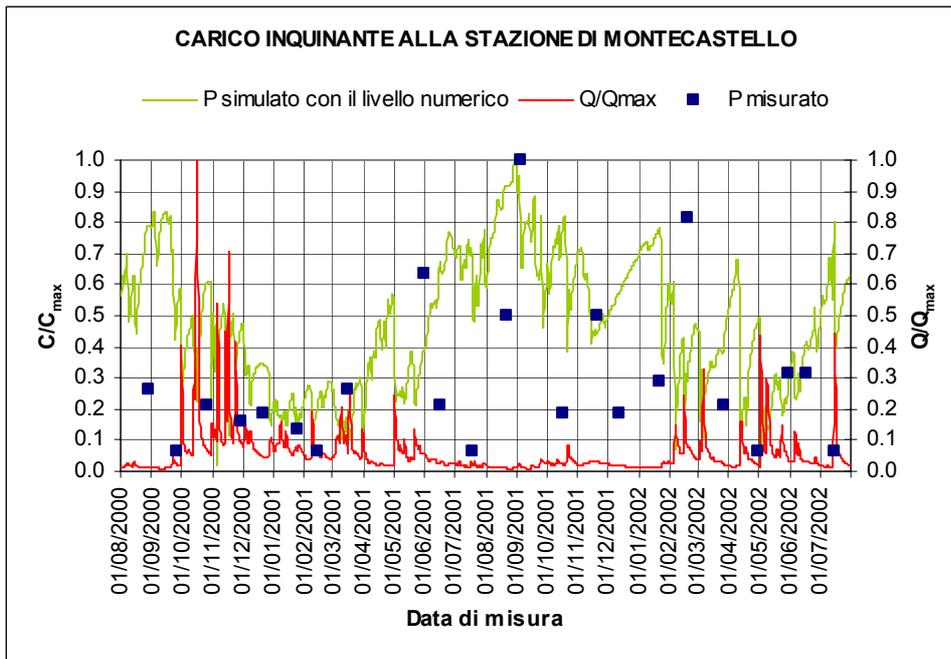
VALORI MASSIMI:
 P sim. = 0.184 mg/l
 P mis. = 0.48 mg/l
 $Q_{max} = 1328.23 \text{ m}^3/\text{s}$

Fiume Tanaro: andamento carico inquinante di P alla stazione di Alessandria.



VALORI MASSIMI:
 BOD₅ sim. = 3.7 mg/l
 BOD₅ mis. = 10.5 mg/l
 $Q_{max} = 2209.1 \text{ m}^3/\text{s}$

Fiume Tanaro: andamento carico inquinante di BOD₅ alla stazione di Montecastello.



VALORI MASSIMI:
 P sim. = 0.165 mg/l
 P mis. = 0.38 mg/l

 $Q_{max} = 2209.1 \text{ m}^3/\text{s}$

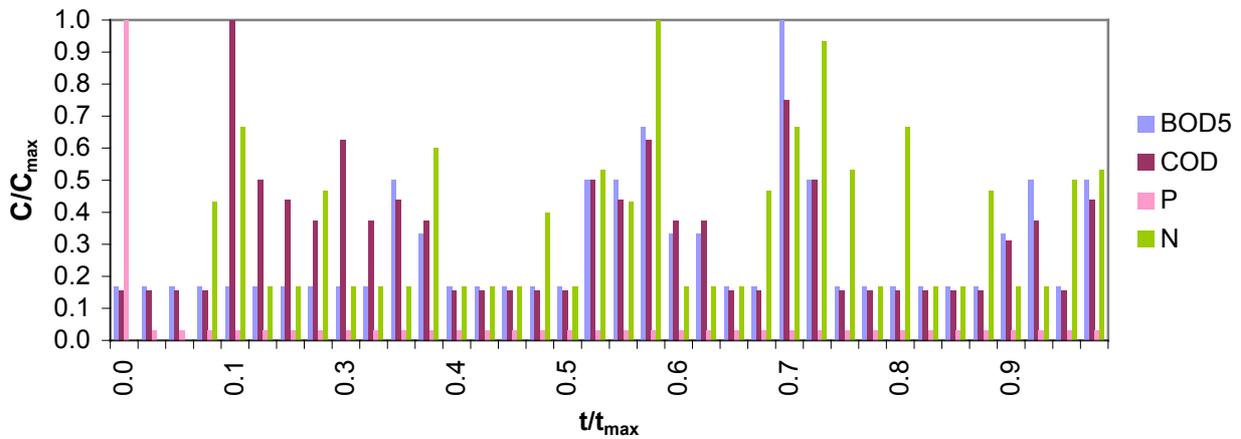
Fiume Tanaro: andamento carico inquinante di P alla stazione di Montecastello.

APPENDICE 3/2

Misure di qualità lungo l'asta del Fiume Tanaro (periodo 1/1/2000-31/12/2002). Stazioni di misura: Ceva, Bastia, Narzole, La Morra, Neive, San Martino Alfieri, Asti, Castello Annone, Alessandria, Montecastello, Bassignana

STAZIONE TANARO A CEVA

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

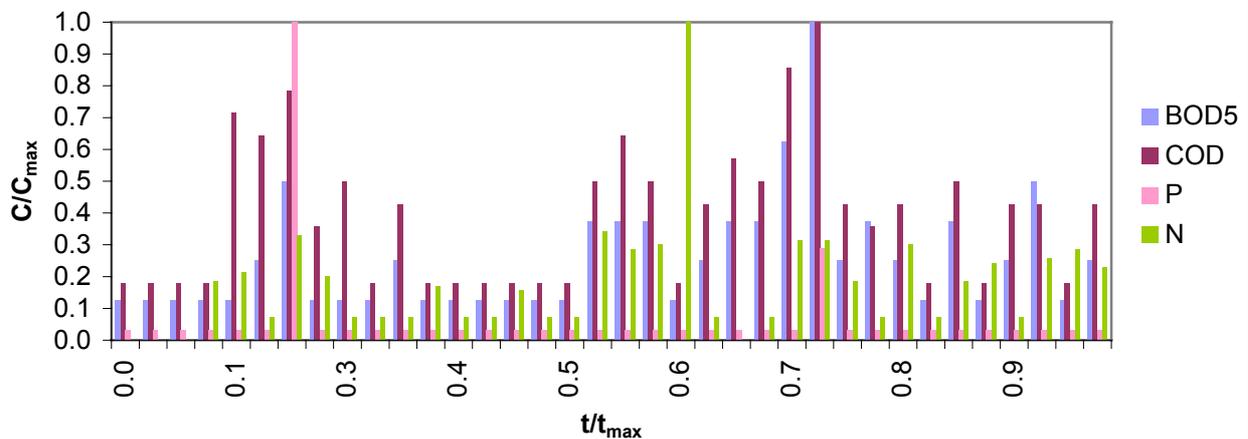
0.0 = 26 gennaio 2000
 0.1 = 15 novembre 2000
 0.3 = 15 novembre 2000
 0.5 = 20 giugno 2001
 0.7 = 9 gennaio 2002
 0.9 = 10 settembre 2002
 1.0 = 10 dicembre 2002
 Tempo (t_{max}) = 36 mesi

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 6 mg/l
 COD (C_{max}) = 16 mg/l
 P (C_{max}) = 0.8 mg/l
 N (C_{max}) = 3 mg/l

STAZIONE TANARO A BASTIA

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

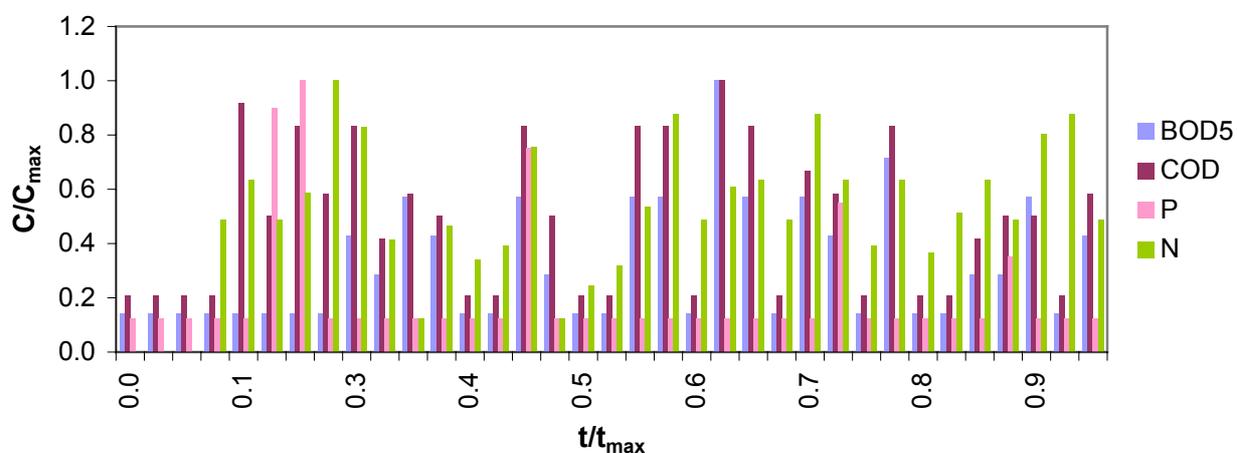
0.0 = 26 gennaio 2000
 0.1 = 15 novembre 2000
 0.3 = 15 novembre 2000
 0.5 = 20 giugno 2001
 0.7 = 9 gennaio 2002
 0.9 = 10 settembre 2002
 1.0 = 10 dicembre 2002
 Tempo (t_{max}) = 36 mesi

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 8 mg/l
 COD (C_{max}) = 14 mg/l
 P (C_{max}) = 0.8 mg/l
 N (C_{max}) = 7 mg/l

STAZIONE TANARO A NARZOLE

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

0.0 = 26 gennaio 2000

0.5 = 20 giugno 2001

0.9 = 10 settembre 2002

Tempo (t_{max}) = 36 mesi

0.3 = 15 novembre 2000

0.7 = 13 febbraio 2002

1.0 = 10 dicembre 2002

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

$BOD_5 (C_{max}) = 7 \text{ mg/l}$

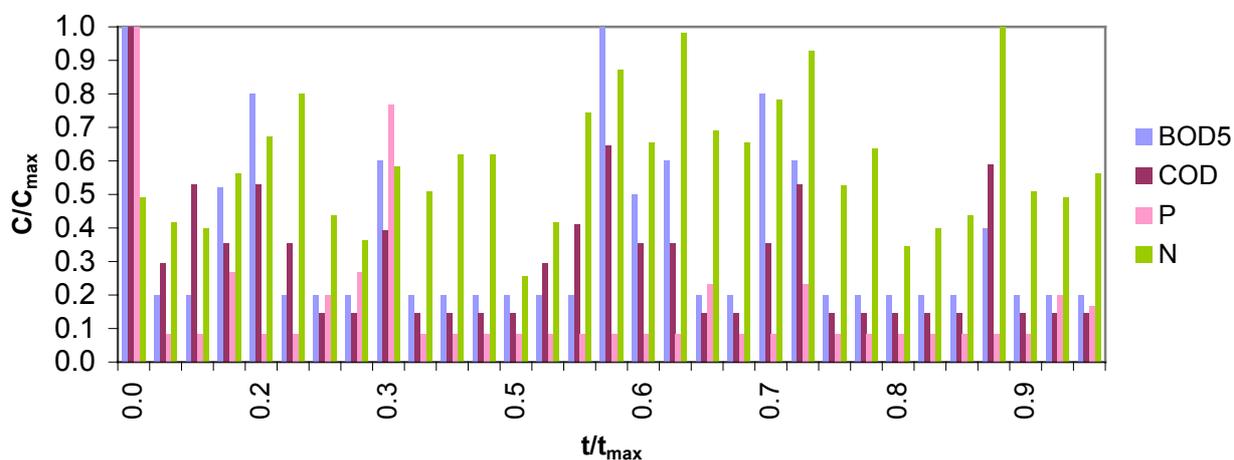
$COD (C_{max}) = 12 \text{ mg/l}$

$P (C_{max}) = 0.2 \text{ mg/l}$

$N (C_{max}) = 4.1 \text{ mg/l}$

STAZIONE TANARO A LA MORRA

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

0.0 = 26 gennaio 2000

0.5 = 20 giugno 2001

0.9 = 10 settembre 2002

Tempo (t_{max}) = 36 mesi

0.3 = 15 novembre 2000

0.7 = 13 febbraio 2002

1.0 = 19 dicembre 2002

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

$BOD_5 (C_{max}) = 5 \text{ mg/l}$

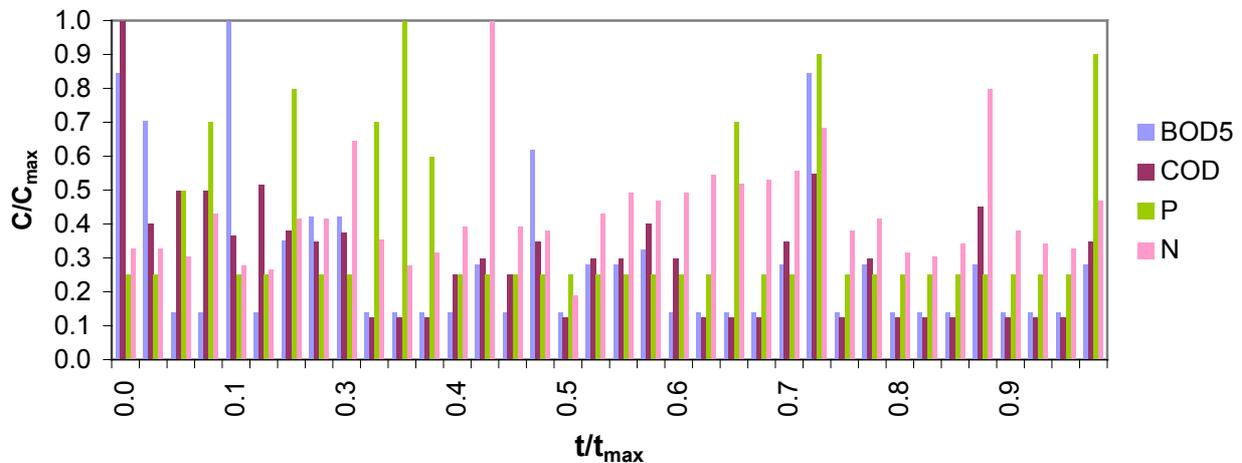
$COD (C_{max}) = 17 \text{ mg/l}$

$P (C_{max}) = 0.3 \text{ mg/l}$

$N (C_{max}) = 5.5 \text{ mg/l}$

STAZIONE TANARO A NEIVE

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

0.0 = 26 gennaio 2000

0.5 = 26 giugno 2001

0.9 = 19 settembre 2002

Tempo (t_{max}) = 36 mesi

0.3 = 22 novembre 2000

0.7 = 16 gennaio 2002

1.0 = 10 dicembre 2002

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

$BOD_5 (C_{max}) = 7.1 \text{ mg/l}$

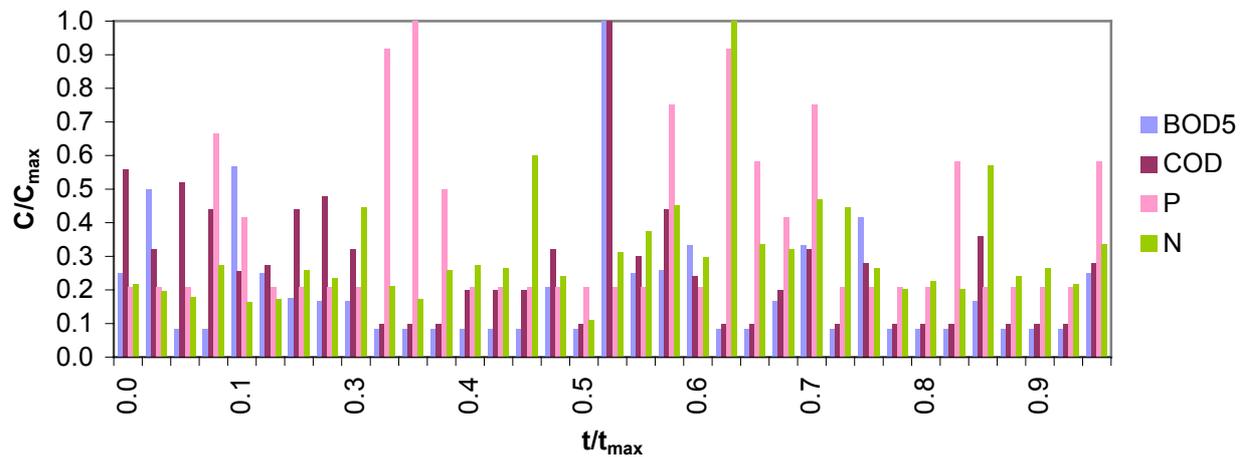
$COD (C_{max}) = 20 \text{ mg/l}$

$P (C_{max}) = 0.1 \text{ mg/l}$

$N (C_{max}) = 7.9 \text{ mg/l}$

STAZIONE TANARO A S. MARTINO ALFIERI

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

0.0 = 27 gennaio 2000

0.5 = 26 giugno 2001

0.9 = 19 settembre 2002

Tempo (t_{max}) = 36 mesi

0.3 = 22 novembre 2000

0.7 = 11 gennaio 2002

1.0 = 19 dicembre 2002

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

$BOD_5 (C_{max}) = 12 \text{ mg/l}$

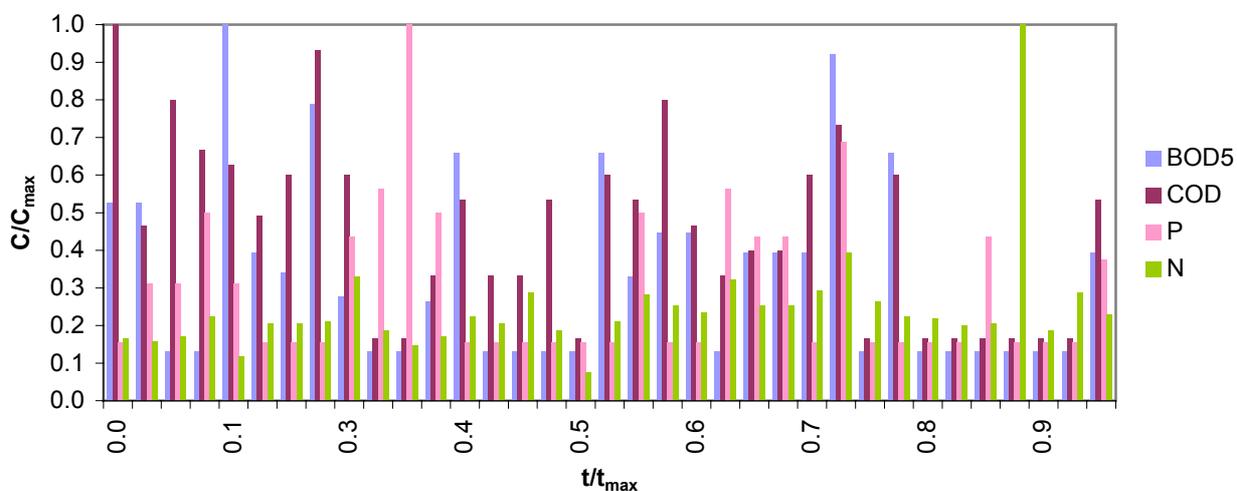
$COD (C_{max}) = 25 \text{ mg/l}$

$P (C_{max}) = 0.12 \text{ mg/l}$

$N (C_{max}) = 12.8 \text{ mg/l}$

STAZIONE TANARO A ASTI

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

0.0 = 26 gennaio 2000

0.5 = 26 giugno 2001

0.9 = 19 settembre 2002

Tempo (t_{max}) = 36 mesi

0.3 = 22 novembre 2000

0.7 = 16 gennaio 2002

1.0 = 19 dicembre 2002

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

$BOD_5 (C_{max}) = 7.6 \text{ mg/l}$

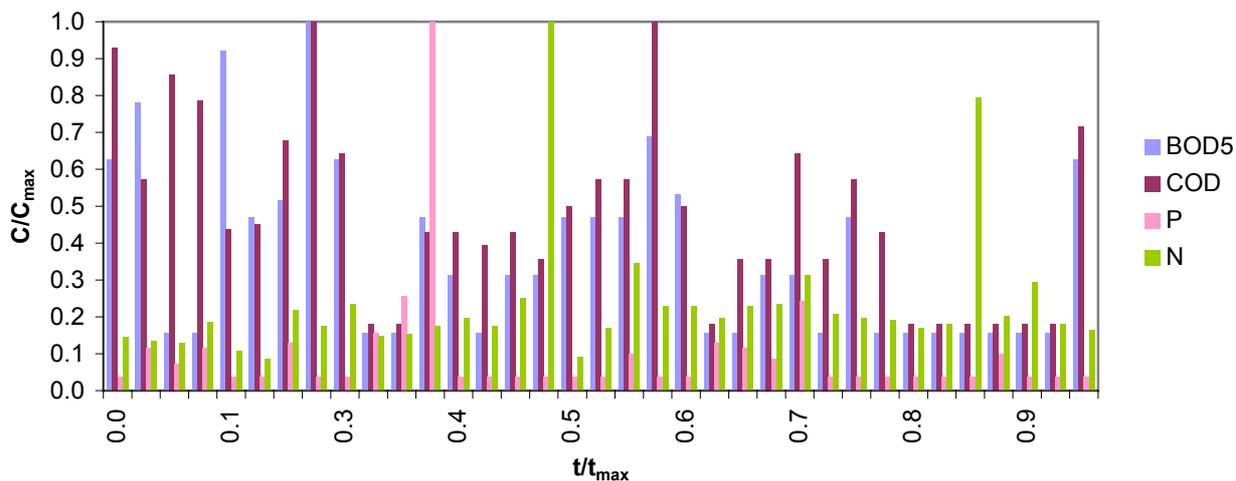
$COD (C_{max}) = 15 \text{ mg/l}$

$P (C_{max}) = 0.16 \text{ mg/l}$

$N (C_{max}) = 17 \text{ mg/l}$

STAZIONE TANARO A CASTELLO ANNONE

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

0.0 = 27 gennaio 2000

0.5 = 26 giugno 2001

0.9 = 19 settembre 2002

Tempo (t_{max}) = 36 mesi

0.3 = 22 novembre 2000

0.7 = 20 febbraio 2002

1.0 = 19 dicembre 2002

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

$BOD_5 (C_{max}) = 6.4 \text{ mg/l}$

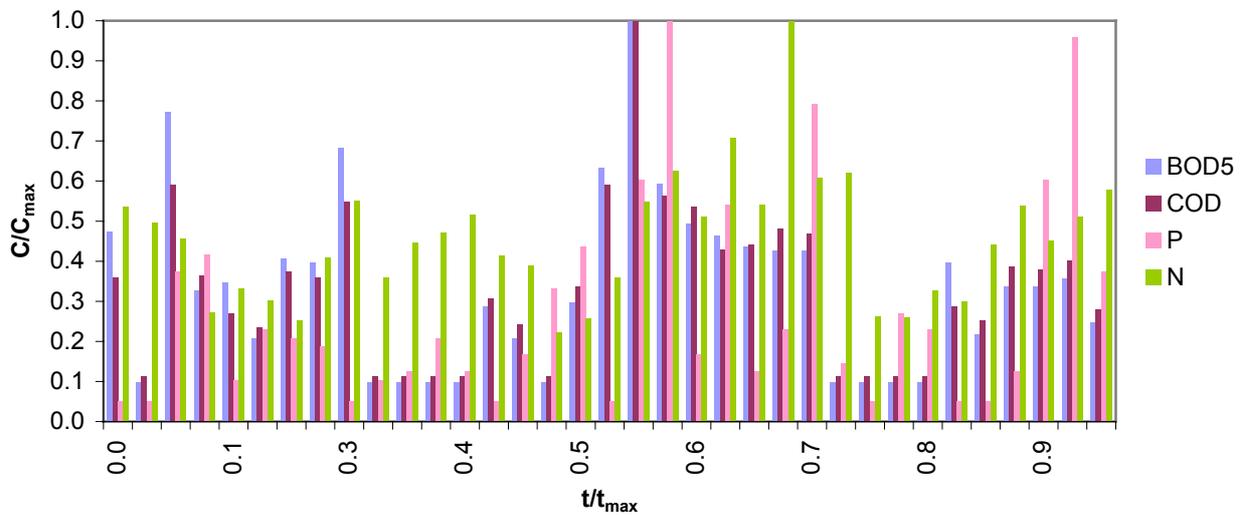
$COD (C_{max}) = 14 \text{ mg/l}$

$P (C_{max}) = 0.7 \text{ mg/l}$

$N (C_{max}) = 18.8 \text{ mg/l}$

STAZIONE TANARO A ALESSANDRIA

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

0.0 = 21 gennaio 2000

0.5 = 19 giugno 2001

0.9 = 24 settembre 2002

Tempo (t_{max}) = 36 mesi

0.3 = 29 novembre 2000

0.7 = 16 febbraio 2002

1.0 = 19 dicembre 2002

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 10.1 mg/l

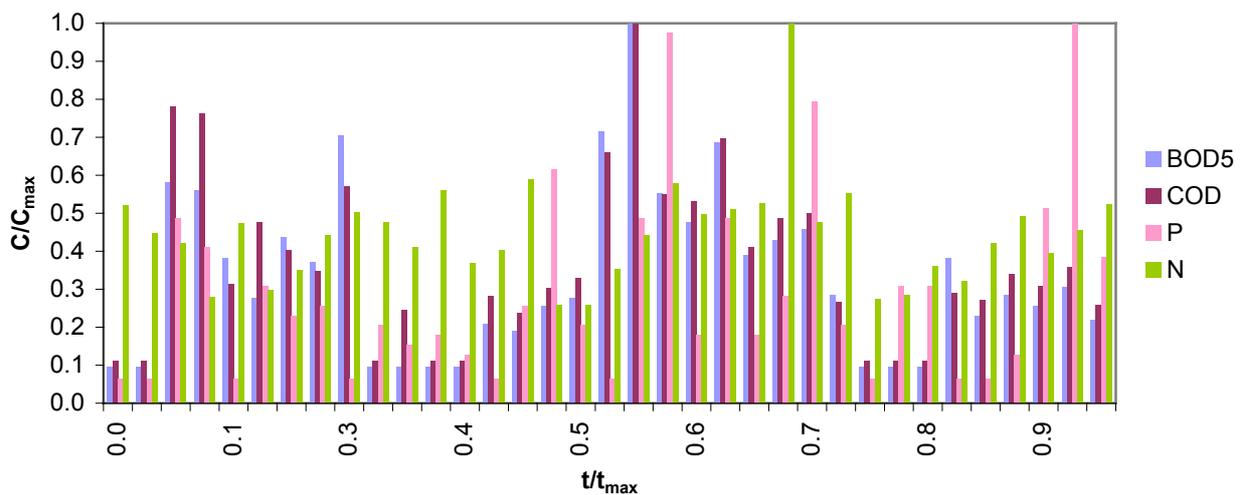
COD (C_{max}) = 22.2 mg/l

P (C_{max}) = 0.48 mg/l

N (C_{max}) = 7.66 mg/l

STAZIONE TANARO A MONTECASTELLO

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

0.0 = 17 gennaio 2000

0.5 = 13 giugno 2001

0.9 = 24 settembre 2002

Tempo (t_{max}) = 36 mesi

0.3 = 29 novembre 2000

0.7 = 22 gennaio 2002

1.0 = 19 dicembre 2002

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 10.5 mg/l

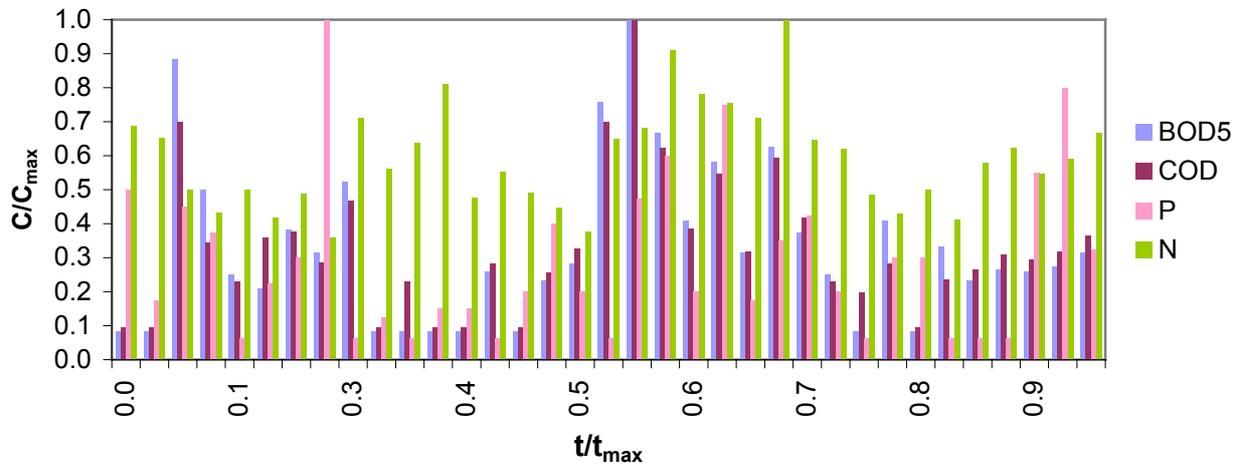
COD (C_{max}) = 22.4 mg/l

P (C_{max}) = 0.39 mg/l

N (C_{max}) = 8.06 mg/l

STAZIONE TANARO A BASSIGNANA

ANDAMENTO CONCENTRAZIONE CARICHI INQUINANTI



DATE:

0.0 = 17 gennaio 2000
 0.5 = 13 giugno 2001
 0.9 = 24 settembre 2002
 Tempo (t_{max}) = 36 mesi

0.3 = 29 novembre 2000
 0.7 = 22 gennaio 2002
 1.0 = 19 dicembre 2002

VALORI INQUINANTI MASSIMI:

BOD₅ (C_{max}) = 12 mg/l
 COD (C_{max}) = 26.1 mg/l
 P (C_{max}) = 0.4 mg/l
 N (C_{max}) = 5,81 mg/l