

Indice

Introduzione	5
Capitolo 1 Descrizione degli impianti	6
1.1 Impianto A	6
1.1.1 Schema funzionale	7
1.1.2 Dotazioni	7
1.2 Impianto B	11
1.2.1 Schema funzionale	11
1.2.2 Dotazioni	13
Capitolo 2 Descrizione dei dati	16
Capitolo 3 Metodi convenzionali di elaborazione dei dati gestionali	26
3.1 Definizioni	26
3.1.1 Caratteristiche qualitative delle acque di scarico	26
3.1.2 Parametri operativi	28
3.2 Analisi esplorativa dei dati	31
3.2.1 Composizione tipica di liquami domestici	31
3.2.2 Rapporti	32
3.2.3 Carichi	33
3.3 Rendimenti	33
3.4 Limiti allo scarico	34
Capitolo 4 Richiami di statistica	35
4.1 Statistica descrittiva	35
4.1.1 Indici di posizione	35
4.1.1.1 Media	36
4.1.1.2 Percentili	36
4.1.2 Indici di dispersione	36
4.1.2.1 Varianza	36
4.1.2.2 Scarto quadratico medio	36
4.1.2.3 Coefficiente di variazione	37
4.1.3 Indici di forma	37

4.1.3.1	Indice di asimmetria	37
4.1.4	<i>Box plot</i>	37
4.2	<i>Outliers</i>	38
4.2.1	Procedura di identificazione e di trattamento degli <i>outliers</i>	39
4.3	Dati mancanti	39
4.3.1	Tecniche di trattamento dei dati mancanti	40
4.4	Media mobile	41
4.5	Componenti di una <i>time series</i>	42
4.5.1	Trend	42
4.5.1.1	Individuazione del trend	42
4.5.1.2	Rimozione del trend	44
4.5.2	Componente periodica	44
4.6	Correlazione	45
4.6.1	Coefficiente di correlazione di Spearman	45
Capitolo 5	Risultati delle elaborazioni	47
5.1	Analisi esplorativa dei dati - risultati	47
5.1.1	Impianto A	48
5.1.1.1	Caratteristiche del liquame in ingresso	48
5.1.1.1.1	Caratteristiche qualitative	50
5.1.1.1.2	Carichi inquinanti	64
5.1.1.2	Caratteristiche dell'effluente	69
5.1.1.2.1	Caratteristiche qualitative	69
5.1.1.3	Prestazioni	75
5.1.1.4	Parametri operativi	76
5.1.2	Impianto B	84
5.1.2.1	Caratteristiche del liquame in ingresso	84
5.1.2.1.1	Caratteristiche qualitative	85
5.1.2.1.2	Carichi inquinanti	98
5.1.2.2	Caratteristiche dell'effluente	103
5.1.2.2.1	Caratteristiche qualitative	103
5.1.2.3	Prestazioni	109
5.1.2.4	Parametri operativi	110
5.2	Statistica descrittiva - risultati	114
5.3	Analisi degli <i>outliers</i>	123
5.4	Individuazione e rimozione del trend	125
5.5	Individuazione della componente periodica	153
5.6	Analisi della correlazione	179
Capitolo 6	Sviluppi futuri	192
Conclusioni		193

INDICE

Appendice A Configurazione R e RStudio™	196
Bibliografia	197

Introduzione

Lo studio delle condizioni di funzionamento degli impianti di depurazione permette di valutare se le diverse fasi del processo di depurazione si svolgono come previsto oppure se ci sono problematiche da individuare e risolvere. Inoltre, può essere utile anche per stabilire se ci sono dei compatti da potenziare in via preventiva, prima dell'insorgere di eventuali problemi.

Il monitoraggio degli impianti, anche grazie all'utilizzo di misuratori e sonde dotati di *data logger*, mette a disposizione una buona quantità di dati da analizzare. Convenzionalmente questi dati sono elaborati rappresentandoli graficamente e traendo conclusioni dall'analisi visuale dei grafici. Questo metodo consente di ottenere dei risultati validi che, però, dipendono fortemente dall'esperienza e dalla sensibilità dell'analista e che mancano quindi di una base oggettiva.

In questo lavoro di tesi, ai metodi convenzionali, che prevedono lo studio della rappresentazione grafica dei dati grezzi, si sono affiancati dei metodi statistici ampiamente applicati in altri settori, al fine di confermare, smentire o semplicemente arricchire quanto ricavato dai primi. L'analisi visuale dei dati non deve essere però soppiantata da questi altri metodi perché alcune considerazioni non si possono evincere se non per mezzo di una visione di insieme dei dati unitamente all'esperienza dell'osservatore.

I metodi sopraccitati sono stati applicati ai dati provenienti da due impianti di depurazione a fanghi attivi situati nella regione Veneto, per il periodo che va dall'inizio dell'anno 2015 alla fine del primo semestre del 2018. In particolare, dopo aver descritto gli impianti (Capitolo 1) e i dati forniti dal gestore (Capitolo 2), sono stati riportati e interpretati i risultati delle analisi (Capitolo 5). I concetti teorici di cui ci si è serviti sono richiamati nel Capitolo 3 per quanto riguarda l'ingegneria sanitaria-ambientale e nel Capitolo 4 per la statistica. Infine, nel Capitolo 6, sono elencate alcune idee di elaborazioni da approfondire in lavori futuri.

Capitolo 1

Descrizione degli impianti

In questo capitolo si presenta una sintetica descrizione dei due impianti di depurazione a fanghi attivi della regione Veneto oggetto di studio.

1.1 Impianto A

L'impianto A, come indicato nel Piano di Tutela delle Acque (PTA) della regione Veneto, si trova in una zona omogenea di protezione definita di ricarica degli acquiferi.

Il liquame chiarificato viene scaricato in un fiume e i limiti di emissione sono regolati dalla tabella 1, allegato A, colonna C del PTA. Sebbene a partire dall'8 dicembre 2012 siano entrati in vigore i limiti di emissione per scarico in area sensibile, non si hanno nuove disposizioni poiché la percentuale di riduzione del carico complessivo di azoto totale e fosforo totale in ingresso a tutti gli impianti a livello di bacino è almeno pari al 75% (art. 25, comma 3 del PTA). Inoltre, nel periodo dell'anno compreso tra aprile e settembre, deve essere rispettato anche il limite per *Escherichia coli*, pari a 5.000 UFC/100 mL [RegioneVeneto, 2018]. La Tabella 1.1 riassume i valori dei limiti indicati dalla normativa sopracitata.

Parametro	Unità di misura	Limite
BOD ₅	mg/L	25
COD	mg/L	125
SST	mg/L	35
P _{tot}	mg/L	10
NH ₄ ⁺	mg/L	15
N-NO ₂ ⁻	mg/L	0,6
N-NO ₃ ⁻	mg/L	20
<i>E. coli</i> - da 01/04 a 30/09	UFC/100 mL	5.000

Tabella 1.1: Limiti allo scarico - impianto A

1.1.1 Schema funzionale

L'impianto, avente una potenzialità autorizzata di 30.000 abitanti equivalenti, è provvisto di una linea acque e di una linea fanghi così strutturate (Figura 1.1.1 e Figura 1.1.2):

- Linea acque
 - grigliatura grossolana
 - grigliatura fine - 3 mm (2 linee)
 - dissabbiatura aerata di tipo pista
 - equalizzazione e omogeneizzazione
 - predenitrificazione (3 linee in parallelo)
 - defosfatazione chimica con cloruro ferrico
 - sedimentazione secondaria (3 linee in parallelo)
 - disinfezione finale a raggi U.V.
- Linea fanghi
 - stabilizzazione aerobica e ispessimento
 - disidratazione tramite centrifuga

In testa all'impianto è posizionato uno sfioratore per le acque meteoriche, dotato di griglia semicilindrica con coclea interna.

Relativamente al comparto biologico, si precisa che i processi di denitrificazione e nitrificazione hanno luogo in tre linee parallele. Inoltre, ci sono due circuiti di ricircolo del fango, uno per la nuova linea 3 e uno per le linee 1 e 2, che, quindi, condividono lo stesso fango di ricircolo.

La defosfatazione avviene attraverso il dosaggio di cloruro ferrico per mezzo di due pompe a portata costante: una pompa invia il reattivo alla linea 3 con una certa portata, mentre l'altra invia una portata doppia dello stesso composto alle linee 1 e 2.

Nella linea fanghi, il bacino per la stabilizzazione aerobica è diviso in due parti, entrambe aerate. In una di esse avviene il preispessimento del fango, a monte della centrifugazione dello stesso.

La Tabella 1.2 raccoglie i dati dimensionali dei comparti più significativi.

1.1.2 Dotazioni

In Tabella 1.3 si riportano alcuni vincoli idraulici, estratti dalla documentazione di progetto.



Figura 1.1.1: Ripresa aerea dell'impianto A

Il comparto di ossidazione/nitrificazione è aerato tramite un totale di quattro elettrosoffianti Robuschi: due sono a servizio delle vecchie linee (linea 1 e linea 2), uno è a servizio della nuova linea (linea 3) e uno è di riserva. Le loro caratteristiche sono riassunte in Tabella 1.4.

Ipotizzando che in aspirazione l'aria abbia una temperatura di 30°C e una pressione di 1 atm, la portata totale insufflabile è di circa 4.400 Nm³/h (1.100 Nm³/h per ogni singolo compressore). La logica di funzionamento dei compressori è basata su un valore di set point di 2 mg/L.

Il surnatante proveniente dall'ispezzitore viene ricircolato a metà della vasca di ossidazione della linea 3, mentre il centrato viene immesso all'uscita della medesima vasca.

La strumentazione presente all'interno dell'impianto consiste in:

- autocampionatori, uno all'ingresso (dopo la grigliatura) e uno all'uscita, funzionanti in base alla portata;
- torbidimetro all'uscita finale;
- misuratore di portata a ultrasuoni sul canale di alimentazione alla disabbattura;

CAPITOLO 1. DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI

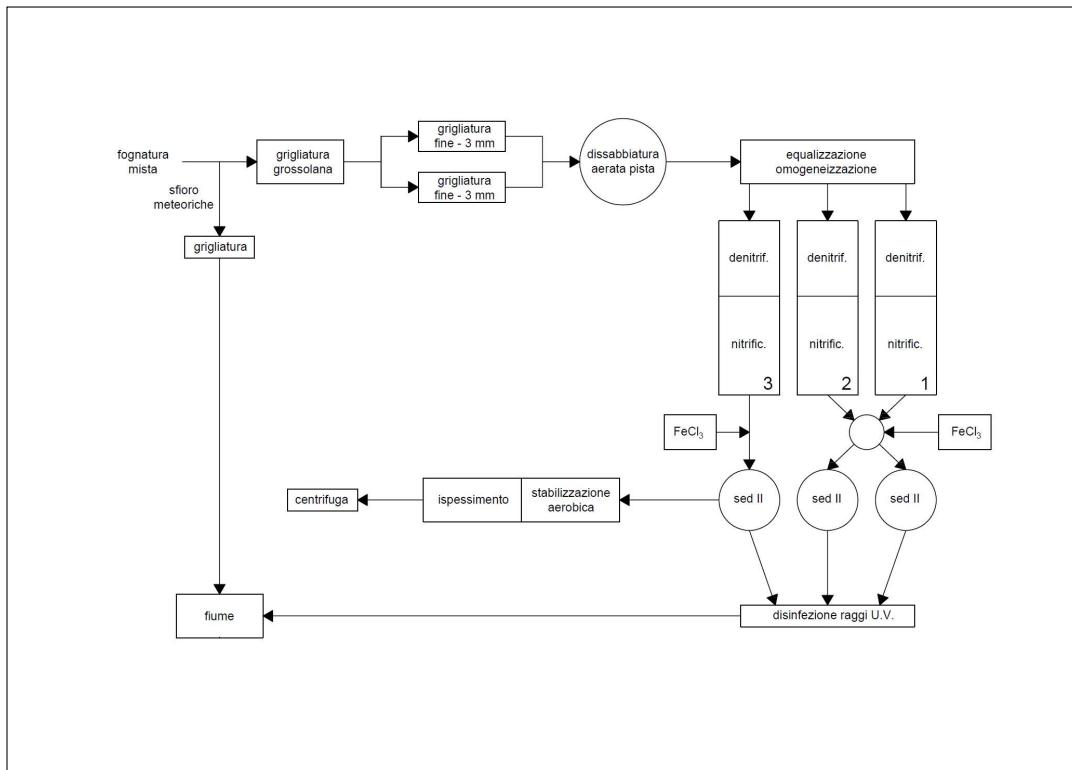


Figura 1.1.2: Schema funzionale dell'impianto A

- sonde per l'ossigeno disciolto, una all'uscita delle linee 1 e 2 e una sulla linea 3;
- misuratore di livello ad ultrasuoni sul comparto di stabilizzazione aerobica per la misura della quantità di fango estratta dal comparto biologico;
- pH-metro in equalizzazione.

Ad esclusione di torbidimetro e pH-metro, gli strumenti sono dotati di *data logger* per la memorizzazione delle misure.

CAPITOLO 1. DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI

Equalizzazione e Omogeneizzazione	Dimensioni in pianta Altezza Volume	6,8 m x 7,5 m 3,9 m 199 m ³
Reattori di ossidazione	Numero Dimensioni in pianta Altezza Volume singolo reattore Volume complessivo	3 10 m x 11,5 m 4,25 m 977,5 m ³ 2.932,5 m ³
Sedimentatori secondari	Numero Diametro Altezza periferia Area utile singolo sedimentatore Volume singolo sedimentatore Circonferenza singolo sedimentatore Area complessiva Volume complessivo Circonferenza complessiva	3 16 m 2,2 m 185 m ² 442 m ³ 50,24 m 555 m ² 1.326 m ³ 150,72 m
Stabilizzazione aerobica e ispessimento	Volume di progetto	680 m ³

Tabella 1.2: Dati dimensionali dei principali comparti dell'impianto A

Portata massima in tempo di pioggia (da collaudo funzionale)	Totale: 499,8 m ³ /h Ciascuna linea: 166,6 m ³ /h
Portata massima disinfezione a raggi U.V.	500 m ³ /h
Portata massima dissabbiatore di tipo pista	648 m ³ /h
Portata e carico massimi centrifuga per disidratazione fanghi	9 m ³ /h, 180 kgSS/h

Tabella 1.3: Vincoli idraulici

Linee 1 e 2		
Compressore tipo ES 85/3P - RVP125 (inverter)	Portata aspirazione [m ³ /h] Δp [mbar] rpm [min^{-1}]	1.225 450 2.081
Compressore tipo ES 86/3P - RVP125 (soft-start)	Portata aspirazione [m ³ /h] Δp [mbar] rpm [min^{-1}]	1.213 450 1.670
Linea 3		
Compressore tipo ES 85/3P - RVP125 (soft-start)	Portata aspirazione [m ³ /h] Δp [mbar] rpm [min^{-1}]	1.225 450 2.081
Compressore tipo ES 86/3P - RVP125 (riserva)	Portata aspirazione [m ³ /h] Δp [mbar] rpm [min^{-1}]	1.213 450 1.670

Tabella 1.4: Caratteristiche degli elettrosoffianti

1.2 Impianto B

L'impianto B, come indicato nel Piano di Tutela delle Acque (PTA) della regione Veneto, è collocato in una zona omogenea di protezione definita come zona montana.

L'effluente viene immesso in due torrenti successivi e i limiti di emissione sono regolati dalla tabella 1, allegato A, colonna C del PTA, ma per i parametri BOD_5 , COD, azoto totale e fosforo totale si devono rispettare i limiti di tabella 4, allegato 5, parte III del D. Lgs. 152/06 relativa allo scarico sul suolo [RegioneVeneto, 2018] [Italia, 2006]. Questo è giustificato dal fatto che i corpi idrici ricettori sono a carattere torrentizio, ovvero, in tempo secco, hanno una portata praticamente nulla. In particolare, per quanto riguarda i limiti imposti per azoto totale e fosforo totale, si precisa che, sebbene numericamente siano coincidenti con i limiti per scarico in area sensibile, essi sono da considerarsi come valori puntuali e non come media annua (come quelli per scarico in area sensibile). Il limite per *Escherichia coli*, fissato dall'autorità competente in fase di autorizzazione allo scarico, tenendo conto delle condizioni ambientale e igienico-sanitaria del corpo idrico ricettore, è pari a 5.000 UFC/100 mL. La Tabella 1.5 riassume i valori dei limiti indicati dalla normativa sopracitata.

Parametro	Unità di misura	Limite
BOD_5	mg/L	20
COD	mg/L	100
SST	mg/L	35
P_{tot}	mg/L	2
N_{tot}	mg/L	15
NH_4^+	mg/L	15
$N-NO_2^-$	mg/L	0,6
$N-NO_3^-$	mg/L	20
<i>E. coli</i>	UFC/100 mL	5.000

Tabella 1.5: Limiti allo scarico - impianto B

1.2.1 Schema funzionale

L'impianto, avente una potenzialità autorizzata di 10.000 abitanti equivalenti e dimensionato per una portata di 2.000 m³/d, è provvisto di una linea acque e di una linea fanghi così strutturate (Figura 1.2.1 e Figura 1.2.2):

- Linea acque
 - grigliatura - 3 mm
 - dissabbiatura aerata
 - equalizzazione aerata

- equalizzazione
 - denitrificazione
 - nitrificazione (2 linee)
 - defosfatazione chimica con policloruro di alluminio
 - sedimentazione secondaria
 - disinfezione chimica
- Linea fanghi
 - stabilizzazione aerobica, con possibilità di ispessimento (3 bacini)
 - disidratazione tramite centrifuga mobile

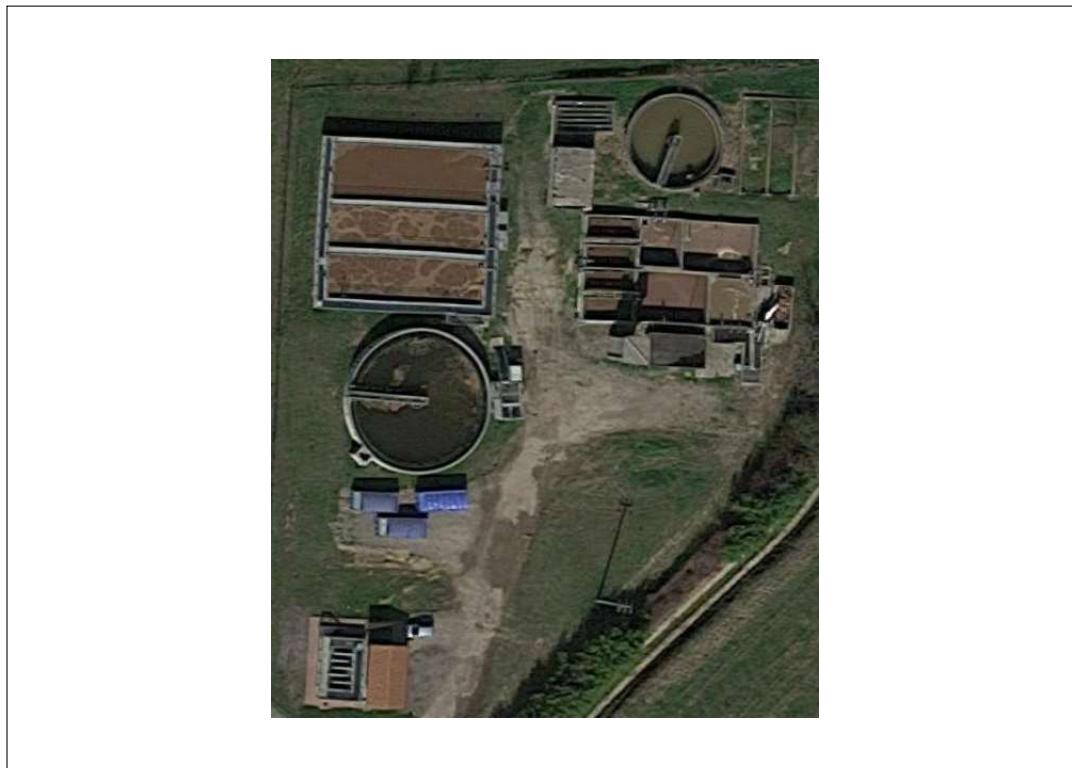


Figura 1.2.1: Ripresa aerea dell'impianto B

Il comparto di equalizzazione è provvisto di uno sfioro che, in tempo di pioggia, invia le acque miste a una linea di trattamento costituita da sedimentazione e disinfezione.

Relativamente alla disinfezione, l'acido peracetico non viene dosato nel comparto di disinfezione stesso, bensì nel rispettivo canale di by-pass.

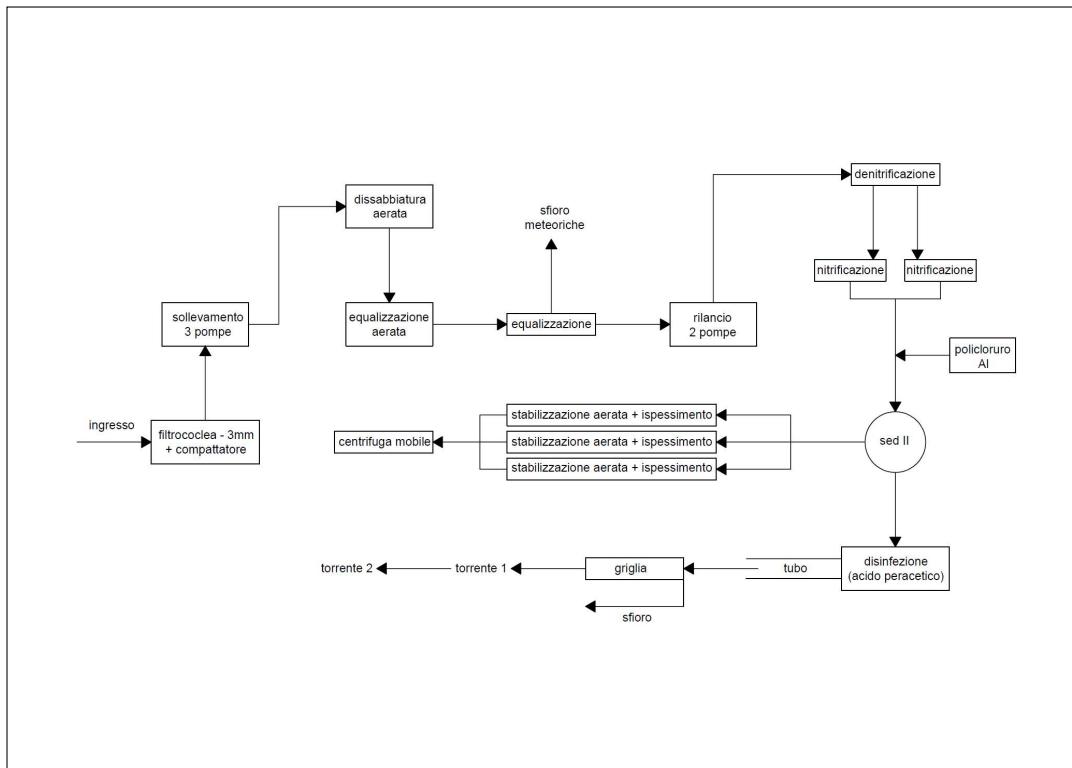


Figura 1.2.2: Schema funzionale dell'impianto B

A seguito della disinfezione finale, il refluo viene convogliato, attraverso una tubazione interrata, a un manufatto di grigliatura che successivamente scarica nei corpi idrici ricettori.

In Tabella 1.6 sono raccolti i dati dimensionali dei comparti più significativi.

1.2.2 Dotazioni

La Tabella 1.7 riporta le caratteristiche delle principali attrezzature elettromeccaniche presenti all'interno dell'impianto.

La logica di automazione dell'impianto prevede un'alimentazione a portata costante (circa 85 m³/h). Le pompe per il rilancio del liquame dalla vasca di equalizzazione a quella di denitrificazione si avviano e si arrestano in funzione del livello nella vasca di equalizzazione.

Per l'aerazione della vasca di ossidazione, se si ipotizza che l'aria in aspirazione abbia una temperatura pari a 30°C, la portata di aspirazione corrisponde a circa 1.550 Nm³/h. Le due elettrosoffianti sono dotate di inverter che lavorano in funzione della concentrazione di ossigeno dissolto in vasca di ossidazione, il cui set point è di 1 mg/L.

CAPITOLO 1. DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI

Dissabbiatura aerata	Dimensioni in pianta Altezza Volume	6,6 m x 4,4 m 3,25 m 94,38 m ³
Equalizzazione (dimensione totale dei due bacini idraulicamente collegati)	Dimensioni in pianta Altezza Volume	15 m x 6,6 m 5 m 495 m ³
Reattore di denitrificazione	Dimensioni in pianta Altezza Volume	20 m x 8 m 4,25 m 680 m ³
Reattori di ossidazione	Numero Dimensioni in pianta Altezza Volume singolo reattore Volume complessivo	2 20 m x 5,8 m 4,25 m 493 m ³ 986 m ³
Sedimentatore secondario	Diametro utile Altezza periferia Area Volume Circonferenza	18 m 2,6 m 254 m ² 762 m ³ 56,5 m
Vasca di disinfezione	Dimensioni in pianta Altezza Volume	5,2 m x 3 m 2,25 m 35,1 m ³
Stabilizzazione aerata e ispessimento	Numero Dimensioni in pianta Altezza Volume singolo bacino	2 6 m x 6 m 4 m 144 m ³
	Numero Dimensioni in pianta Altezza Volume Volume complessivo (3 bacini)	1 10 m x 6 m 4 m 240 m ³ 528 m ³

Tabella 1.6: Dati dimensionali dei principali comparti dell'impianto B

CAPITOLO 1. DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI

Il surnatante dell’ispezzitore è ricircolato a valle del sollevamento e del campionatore di portata, mentre il ricircolo del centrato è immesso all’inizio del comparto di denitrificazione.

La strumentazione presente all’interno dell’impianto consiste in:

- autocampionatori, uno all’ingresso (prima della dissabbiatura) e uno all’uscita;
- misuratore di portata ad induzione elettromagnetica installato sull’alimentazione del comparto biologico;
- misuratore di portata a ultrasuoni (rileva la misura del battente su uno stramazzo in parete sottile) installato allo scarico;
- sonda per la misura dell’ossigeno disciolto nella vasca di ossidazione.

Tutti questi strumenti sono dotati di *data logger* per la memorizzazione delle misure.

Grigliatura		
Filtrococlea SAVI VSR-700	Luce di filtrazione [mm]	3
	Portata massima [L/s]	160
	Portata massima [m^3/h]	576
Rilancio equalizzazione - denitrificazione		
Pompe	Numero	2
	Portata massima [L/s]	26
	Portata massima [m^3/d]	2.246
	Prevalenza massima [m]	7,2
Ricircolo del fango		
Pompe	Numero	2
	Portata massima [L/s]	27
	Prevalenza massima [m]	3
Aerazione ossidazione		
Elettrosoffiante Rocuschi Robox tipo ES 85/3P - RVP125 (inverter)	Numero	2
	Portata aspirazione [m^3/h]	1.711
	Δp [mbar]	530
	rpm [min^{-1}]	2.792

Tabella 1.7: Caratteristiche delle principali apparecchiature elettromeccaniche

Capitolo 2

Descrizione dei dati

I dati gestionali relativi agli impianti di depurazione studiati sono stati forniti dal gestore. I dati di precipitazione, invece, sono stati reperiti nel sito di Arpa Veneto¹. In particolare, questi dati sono delle *time series*, poiché ogni misura è associata a uno specifico giorno dell'anno. Una *time series*, infatti, è una sequenza di osservazioni ordinata nel tempo e, nella sua analisi, grande importanza è assunta dall'ordine in cui sono state fatte le osservazioni [Anderson, 1994].

Le principali caratteristiche statistiche dei dati sono ricavate dalla statistica descrittiva (sezione 4.1). Alcune di queste sono caratteristiche intrinseche della serie di dati e rappresentano una descrizione dei dati a disposizione. In particolare, si indicheranno i valori di:

- **Lunghezza della serie storica:** lunghezza in anni, indipendentemente dalla frequenza di campionamento, calcolata come differenza tra anno dell'ultimo rilevamento e anno del primo rilevamento aumentata di un'unità [ISPRA, 2013].
- **Numero totale di dati:** numero di osservazioni presenti nella serie [ISPRA, 2013].
- **Numero di NA (*Not Available*):** numero di dati mancanti, ovvero di giorni in cui non si ha osservazione.
- **Percentuale di NA:** percentuale di dati mancanti rispetto al numero di giorni del periodo considerato.
- **Serie di NA più lunga:** maggior numero di dati mancanti consecutivi all'interno della serie di dati.
- **Serie di NA più frequente:** numero di NA consecutivi maggiormente riscontrato nella serie di dati.

¹<http://www.arpa.veneto.it/bollettini/storico>

- **Frequenza di n NA:** numero di intervalli di n NA consecutivi.
- **Completezza:** rapporto tra il numero totale di dati e il numero massimo di dati (inteso come il numero di giorni del periodo considerato) [ISPRA, 2013].

Per entrambi gli impianti, i dati a disposizione sono:

- pH
- temperatura (T)
- portata (Q)
- solidi sospesi totali (SST)
- BOD_5
- COD
- ione ammonio (NH_4^+)
- azoto nitroso (N-NO_2^-)
- azoto nitrico (N-NO_3^-)
- azoto Kjeldahl (TKN)
- azoto totale (N_{tot})
- fosforo totale (P_{tot})
- *Escherichia coli*
- portata del fango di supero (Q_f)
- volume del fango in vasca di ossidazione (SSSox)
- solidi sospesi totali in vasca di ossidazione (SSTox)
- indice di volume del fango (SVI)
- solidi sospesi totali nel fango di ricircolo (SSTRIC)

In Tabella 2.1, Tabella 2.2 e Tabella 2.3 sono raccolte le caratteristiche sopra descritte per i dati dell'impianto A, mentre in Tabella 2.4, Tabella 2.5 e Tabella 2.6 ci sono quelle per l'impianto B.

La valutazione delle caratteristiche dei dati mancanti permette di avere un'idea generale della distribuzione temporale dei dati e della loro frequenza di campionamento.

IMPIANTO A - ingresso													
	pH	T	Q	SST	BOD ₅	COD	NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	TKN	N _{tot}	P _{tot}	E. coli
Lunghezza [anni]													
Lunghezza [giorni]													
Numerico totale dati	334	964	1.277	219	579	545	180	180	542	218	219	177	
Numerico di NA	943	313	0	1.058	698	732	1.097	1.097	735	1.059	1.058	1.100	
Percentuale di NA [%]	73,8	24,5	0	82,9	82,9	54,7	85,9	85,9	57,6	82,9	82,9	86,1	
Serie di NA più lunga	13	7	-	13	13	4	4	13	13	4	13	13	19
Serie di NA più frequente	6	6	-	6	6	1	1	6	6	1	6	6	6
1 NA	-	-	-	-	300	330	-	-	335	-	-	-	-
2 NA	-	-	-	24	24	165	167	-	-	164	24	24	-
3 NA	-	1	-	19	19	16	16	-	-	16	19	19	-
4 NA	2	1	-	6	6	5	5	1	1	6	6	6	1
5 NA	10	4	-	24	24	-	-	14	14	-	24	24	13
Frequenza di	6 NA	128	43	-	124	124	-	-	152	152	-	123	124
	7 NA	10	4	-	6	6	-	-	11	11	-	7	6
	8 NA	1	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	1
	10 NA	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1	1	-
	13 NA	3	-	-	1	1	-	-	2	2	-	1	3
	19 NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Completezza [%]	26,2	75,5	0,0	17,1	17,1	45,3	42,7	14,1	14,1	42,4	17,1	17,1	13,9

Tabella 2.1: Descrizione dei dati in ingresso - impianto A

IMPIANTO A - uscita													
	pH	T	Q	SST	BOD ₅	COD	NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	TKN	N _{tot}	P _{tot}	E. coli
Lunghezza [anni]													
Lunghezza [giorni]													
Numerico totale dati	333	962	1.277	578	217	579	544	543	179	218	219	178	
Numerico di NA	944	315	0	699	1.060	698	733	734	1.098	1.059	1.058	1.099	
Percentuale di NA [%]	73,9	24,7	0	54,7	83,0	54,7	57,4	57,5	86,0	82,9	82,9	86,1	
Serie di NA più lunga	13	7	-	5	13	4	4	4	13	13	13	13	
Serie di NA più frequente	6	6	-	1	6	1	1	1	6	6	6	6	
1 NA	-	2	-	300	-	300	330	325	325	-	-	-	-
2 NA	-	-	-	165	24	165	168	163	163	-	24	24	-
3 NA	-	1	-	16	18	16	13	17	17	-	19	19	-
4 NA	2	1	-	4	6	5	7	8	8	1	6	6	1
5 NA	10	4	-	1	23	-	-	-	-	14	24	24	13
6 NA	126	43	-	-	122	-	-	-	-	150	123	124	149
7 NA	10	4	-	-	6	-	-	-	-	11	7	6	11
8 NA	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
10 NA	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	1	1	-
12 NA	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1
13 NA	4	-	-	1	-	-	-	-	-	3	1	1	3
Completezza [%]	26,1	75,3	0,0	45,3	17,0	45,3	42,6	42,5	42,5	14,0	17,1	17,1	13,9

Tabella 2.2: Descrizione dei dati in uscita - impianto A

Tabella 2.3: Descrizione dei dati dei parametri operativi - impianto A

IMPIANTO B - ingresso													
	pH	T	Q	SST	BOD ₅	COD	NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	TKN	N _{tot}	P _{tot}	E. coli
Lunghezza [anni]													
Lunghezza [giorni]													
Numero totale dati	333	963	1.275	218	572	545	179	534	215	218	176		
Numero di NA	944	314	2	1.059	1.059	705	732	1.098	743	1.062	1.059	1.101	
Percentuale di NA [%]	73,9	24,6	0,2	82,9	82,9	55,2	57,3	86,0	86,0	58,2	83,2	82,9	86,2
Serie di NA più lunga	14	14	2	13	13	4	4	14	14	6	14	13	14
Serie di NA più frequente	6	6	2	6	6	1	1	6	6	1	6	6	6
1 NA	-	-	-	1	1	291	328	-	-	317	1	1	-
2 NA	-	-	1	25	25	139	168	-	-	158	25	25	-
3 NA	-	-	22	22	20	20	16	-	-	20	22	22	-
4 NA	3	2	-	4	4	9	5	2	2	11	4	4	2
5 NA	9	3	-	22	22	-	-	13	13	-	22	22	13
6 NA	127	42	-	122	122	-	-	151	151	1	119	122	146
Frequenza di	7 NA	8	2	-	6	6	-	9	9	-	7	6	8
	8 NA	2	1	-	1	1	-	2	2	-	1	1	2
	10 NA	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1	1	-
	11 NA	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1	1	-
	13 NA	3	-	-	1	1	-	2	2	-	1	1	4
	14 NA	1	1	-	-	-	1	1	1	-	1	2	2
Completezza [%]	26,1	75,4	99,8	17,1	17,1	44,8	42,7	14,0	14,0	41,8	16,8	17,1	13,8

Tabella 2.4: Descrizione dei dati in ingresso - impianto B

IMPIANTO B - uscita													
	pH	T	SST	BOD ₅	COD	NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	TKN	N _{tot}	P _{tot}	E. coli	
Lunghezza [anni]													
Lunghezza [giorni]													
Numerico totale dati	332	963	572	218	572	548	546	546	176	215	218	174	
Numerico di NA	945	314	705	1.059	705	729	731	731	1.101	1.062	1.059	1.103	
Percentuale di NA [%]	74,0	24,6	55,2	82,9	55,2	57,1	57,2	57,2	86,2	83,2	82,9	86,4	
Serie di NA più lunga	14	14	4	13	4	4	5	5	14	14	13	14	
Serie di NA più frequente	6	6	1	6	1	1	1	1	6	6	6	6	
Frequenza di NA	1 NA	-	-	291	1	291	325	322	322	-	1	1	-
	2 NA	-	-	159	25	159	168	167	167	-	25	25	-
	3 NA	-	1	20	22	20	16	15	15	-	22	22	-
	4 NA	3	2	9	4	9	5	5	5	2	4	4	2
	5 NA	9	3	-	22	-	-	2	2	12	22	22	12
	6 NA	125	42	-	122	-	-	-	-	146	119	122	144
	7 NA	8	2	-	6	-	-	-	-	8	7	6	7
	8 NA	2	1	-	1	-	-	-	-	2	1	1	2
	10 NA	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1	-
	11 NA	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1	-
	13 NA	4	-	-	1	-	-	-	-	4	1	1	6
	14 NA	1	1	-	-	-	-	-	-	2	1	-	2
Completezza [%]	26,0	75,4	44,8	17,1	44,8	42,9	42,8	42,5	13,8	16,8	17,1	13,6	

Tabella 2.5: Descrizione dei dati in uscita - impianto B

IMPIANTO B - parametri operativi						
	Qf	SSSOX	SSTOX	SVI	SSTRIC	
Lunghezza [anni]				4		
Lunghezza [giorni]			1.277			
Numero totale dati	1.277	277	329	277	180	
Numero di NA	0	1.000	948	1.000	1.097	
Percentuale di NA [%]	0,0	78,3	74,2	78,3	85,9	
Serie di NA più lunga	-	14	8	14	14	
Serie di NA più frequente	-	1	1	1	6	
1 NA	-	97	138	96	-	
2 NA	-	1	-	-	-	
3 NA	-	3	2	3	1	
4 NA	-	92	135	93	1	
5 NA	-	14	13	15	9	
Frequenza di						
6 NA	-	52	26	51	158	
7 NA	-	5	5	5	9	
8 NA	-	2	1	2	1	
12 NA	-	1	-	1	1	
13 NA	-	5	-	5	-	
14 NA	-	1	-	1	1	
Completezza [%]	100,0	21,7	25,8	21,7	14,1	

Tabella 2.6: Descrizione dei dati dei parametri operativi - impianto B

CAPITOLO 2. DESCRIZIONE DEI DATI

Ciò che si osserva è che, per entrambi gli impianti, la portata in ingresso e in uscita è misurata con una frequenza giornaliera. Altre grandezze, come COD, NH₄⁺ e TKN in ingresso e SST, COD, N-NO₂⁻ e N-NO₃⁻ in uscita, sono misurate mediamente ogni 2 o 3 giorni. Tutte le restanti grandezze in ingresso e in uscita, invece, sono misurate in media ogni 7 giorni, ad eccezione della temperatura che, sia in ingresso che in uscita, è misurata ogni 7 giorni fino alla fine del 2015 e successivamente è rilevata con frequenza giornaliera. Anche il per il pH si ha, nel 2018, un aumento di frequenza di rilevazione del dato che passa da una media di 7 giorni a una misurazione giornaliera.

I parametri operativi sono misurati con frequenze diverse nei due impianti. Per l'impianto A, si ha il dato della portata di supero principalmente ogni 2, 3 o 4 giorni, mentre tutti gli altri parametri sono misurati ogni 7 giorni. Per l'impianto B, invece, si hanno frequenze di campionamento maggiormente variabili. La portata del fango di supero è misurata nei giorni in cui si estrae il fango di supero mentre negli altri giorni è ovviamente nulla. I solidi sospesi totali nella vasca di ossidazione sono misurati ogni 2 o 5 giorni e il volume del fango nella vasca di ossidazione e lo SVI ogni 2, 5 o 7 giorni. Infine, i solidi sospesi totali nel fango di ricircolo sono misurati ogni 7 giorni.

Tra i dati forniti dal gestore si ha anche la concentrazione di ossigeno disciolto (OD). I suoi valori, a differenza degli altri parametri, sono disponibili per gli anni 2017 e 2018 e la misurazione è fatta ogni 6 minuti. La descrizione della serie di dati è riassunta in Tabella 2.7. Come si osserva anche nella tabella, per l'impianto B si hanno a disposizione le misure di concentrazioni per meno giorni rispetto all'impianto A. In particolare, si hanno i valori di OD fino alle ore 13:12 del 27 giugno 2018.

CAPITOLO 2. DESCRIZIONE DEI DATI

OSSIGENO DISCiolto			
	IMPIANTO A Linee 1 -2	IMPIANTO A Linea 3	IMPIANTO B
Lunghezza [anni]	2	2	2
Lunghezza [giorni]	546	543	543
Numero massimo di misurazioni (ogni 6 minuti)	131.040	130.213	129.902
Numero totale dati	131.007	130.992	129.902
Numero di NA	33	48	311
Percentuale di NA [%]	0,03	0,04	0,24
Serie di NA più lunga	8	45	208
Serie di NA più frequente	1	-	1
Frequenza di			
1 NA	6	1	2
2 NA	1	1	-
3 NA	1	-	1
7 NA	2	-	1
8 NA	1	-	1
12 NA	-	-	1
29 NA	-	-	1
42 NA	-	-	1
45 NA	-	1	-
208 NA	-	-	1
Completezza [%]	99,97	99,96	99,76

Tabella 2.7: Descrizione dei dati di concentrazione di OD

Capitolo 3

Metodi convenzionali di elaborazione dei dati gestionali

In questo capitolo sono sintetizzati i principali concetti teorici dell'ingegneria sanitaria-ambientale utilizzati quando si procede con l'elaborazione dei dati gestionali per mezzo di metodi convenzionali. Questi metodi coinvolgono l'analisi della rappresentazione grafica dei dati tal quali, il calcolo e la rappresentazione di rapporti tra variabili, carichi e rendimenti e, occasionalmente, la valutazione di parametri statistici di base come media, mediana e percentili.

3.1 Definizioni

3.1.1 Caratteristiche qualitative delle acque di scarico

SST - Solidi Sospesi Totali I solidi sospesi totali sono tutte le particelle di dimensione superiore a 10^{-3} mm contenute nel liquame, la cui misurazione viene condotta mediante filtrazione a $0,45 \mu\text{m}$ e successiva evaporazione della fase liquida in stufa a 105°C . Essi includono sia i solidi sedimentabili che quelli non sedimentabili che si distinguono effettuando una decantazione statica in cono Imhoff per due ore. Il risultato è espresso in termini di volume di fango sedimentato (SSS) rispetto al volume del campione (l'unità di misura è mL/L). Entrambi i tipi di solidi sospesi possono essere volatili o non volatili, in virtù del fatto che siano di tipo organico o inorganico [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

Temperatura La temperatura del liquame influenza i processi biologici e la solubilità dell'ossigeno. Temperature relativamente elevate velocizzano i processi di depurazione, ma temperature troppo elevate (superiori a $40-50^\circ\text{C}$) inibiscono i processi di ossidazione biologica e di nitrificazione. Inoltre, all'aumentare della temperatura, la concentrazione a saturazione dell'ossigeno

CAPITOLO 3. METODI CONVENZIONALI DI ELABORAZIONE DEI DATI GESTIONALI

disciolto in vasca di ossidazione diminuisce. Anche temperature basse, inferiori ai 12°C, sono problematiche perché i batteri nitrificanti cessano la propria attività [Bonomo, 2008].

BOD - Biological Oxygen Demand Il BOD è una misura del contenuto di sostanza organica biodegradabile. Questa misura è di tipo indiretto perché ciò che si determina è la quantità di ossigeno che i batteri consumano per ossidare i composti biodegradabili contenuti nel liquame. Poiché la tecnica di misurazione del BOD richiede tempi lunghi, la procedura standard prevede di misurare il BOD₅, ovvero il consumo di ossigeno dopo 5 giorni dall'avvio della prova. Tale valore, per reflui di origine domestica, rappresenta il 68% del BOD totale [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

COD - Chemical Oxygen Demand IL COD è una misura della quantità di ossigeno richiesto per ossidare chimicamente le sostanze (principalmente organiche) contenute nel liquame, utilizzando un forte ossidante. Durante la procedura di misurazione, vengono ossidati anche eventuali composti inorganici riducenti, mentre non si hanno effetti sull'azoto in forma ammoniacale. La durata della procedura è di circa 2 ore (molto minore rispetto a quella per il BOD₅) [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

pH Il pH è un parametro che influenza le reazioni chimiche e biochimiche. La maggior parte dei processi biologici ha luogo per valori di pH compresi tra 5,5 e 9 [Bonomo, 2008].

Azoto L'azoto è un nutriente indispensabile per la crescita dei microrganismi. Nelle acque reflue, l'azoto è presente sotto forma di:

- azoto ammoniacale (N-NH_4^+);
- azoto nitroso (N-NO_2^-);
- azoto nitrico (N-NO_3^-);
- azoto organico, cioè azoto combinato a molecole organiche come proteine, amminoacidi, ecc.

Spesso si fa riferimento anche ad altri due parametri:

- TKN (*Total Kjeldahl Nitrogen*): somma dell'azoto ammoniacale e dell'azoto organico;
- azoto totale: somma di TKN, azoto nitroso e azoto nitrico.

CAPITOLO 3. METODI CONVENZIONALI DI ELABORAZIONE DEI DATI GESTIONALI

Nei reflui civili, l'azoto ammoniacale rappresenta una grande percentuale del totale, seguito dall'azoto organico. Le forme ossidate, invece, danno un contributo irrigorio [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

Qualora i dati a disposizione fornissero il valore di concentrazione di ione ammonio NH_4^+ , esso va convertito in azoto ammoniacale N-NH_4^+ con un semplice esercizio di determinazione della composizione percentuale del composto, quindi:

$$\text{NH}_4^+ : (14 + 4 \cdot 1) = \text{N-NH}_4^+ : 14 \quad (3.1)$$

$$\text{N-NH}_4^+ = 0,78 \cdot \text{NH}_4^+ \quad (3.2)$$

Fosforo Anche il fosforo è un nutriente necessario per il metabolismo dei batteri. Esso proviene principalmente dalle deiezioni umane e contributi molto minori derivano dall'impiego di polifosfati in ambito industriale [Bonomo, 2008].

Escherichia coli È la specie di batteri più rappresentativa dei coliformi fecali ed è indice sicuro di inquinamento fiscale delle acque poiché è il costituente predominante della popolazione batterica residente nell'intestino umano. Per questo motivo, è il parametro di riferimento per la carica batterica nella normativa nazionale [Bonomo, 2008].

3.1.2 Parametri operativi

SSTox I solidi sospesi totali in vasca di ossidazione sono una misura indiretta della biomassa perché contengono anche altre componenti come materiale inorganico, organismi legati ai batteri e microrganismi morti. Valori tipici di concentrazione di SST in vasca di ossidazione sono di circa 3-5 kgSST/m³. Per una stima migliore, sarebbe opportuno considerare i solidi sospesi volatili (SSV) che non includono il materiale sospeso di tipo inorganico. Se si volessero quindi convertire in SSV i SST, si consideri che, in mancanza di misurazioni dirette o di indicazioni specifiche per il caso in esame, è buona norma considerare, per liquami urbani, un rapporto tra le due grandezze pari a 0,7-0,75 [Bonomo, 2008].

Fango di ricircolo È la frazione di fango sedimentato sul fondo del sedimentatore che viene ricircolata nel reattore biologico al fine di reimettere la biomassa responsabile della biodegradazione [Collivignarelli and Bertanza, 2012]).

CAPITOLO 3. METODI CONVENZIONALI DI ELABORAZIONE DEI DATI GESTIONALI

SST_{RIC} I solidi sospesi totali nel fango di ricircolo sono una misura della biomassa in esso contenuta. La loro concentrazione è generalmente circa il doppio della concentrazione di SST nel reattore biologico [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

SVI - Sludge Volume Index L'indice di volume del fango, o indice di Mohlman, è una misura della sedimentabilità del fango attivo ed è dato dal rapporto tra il volume del fango (SSSO_X [mL/L], misurato tramite sedimentazione statica) e i grammi di SST_{OX} contenuti in un litro di miscela aerata:

$$SVI = \frac{SSSO_X}{SST_{OX}} \quad (3.3)$$

La sua unità di misura è quindi mL/g. In base alla definizione è facile osservare che valori bassi di SVI indicano una buona sedimentabilità, mentre valori elevati sono propri di fanghi mal sedimentabili [Bonomo, 2008].

Fango di supero È la frazione di fango sedimentato sul fondo del sedimentatore che viene estratta per mantenere costante la massa di fango attivo all'interno del sistema [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

Carico del fango - C_f Il carico del fango è una misura del substrato messo a disposizione della biomassa. È definito come la quantità di sostanza organica biodegradabile in ingresso al reattore biologico nell'unità di tempo e per unità di biomassa presente:

$$C_f = \frac{Q \cdot BOD_5}{V_{OX} \cdot SST_{OX}} \quad (3.4)$$

Il numeratore rappresenta il carico di BOD₅ in ingresso (in kg/d) mentre il denominatore è il prodotto tra il volume della vasca di ossidazione (in m³) e la concentrazione di biomassa in termini di solidi sospesi totali (in kg/m³). L'unità di misura del carico del fango è quindi kgBOD₅/(kgSST · d) o, più semplicemente, d⁻¹ [Bonomo, 2008].

Per bassi valori di carico del fango si hanno alto rendimento di depurazione, nitrificazione e scarsa produzione di fango di supero. All'aumentare di C_f, invece, il rendimento tende a diminuire, il fango di supero è più abbondante e, per valori superiori a 0,15 kgBOD₅/(kgSST · d), non avviene più la reazione di nitrificazione [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

Nel caso in cui l'impianto di depurazione analizzato abbia più di una linea biologica, si utilizza come SST_{OX} il valore medio sulle *n* linee.

SRT - Solid Retention Time L'età del fango, o tempo medio di residenza dei fanghi, è il tempo medio di permanenza di una colonia batterica nel sistema. Per calcolarla, si divide la massa di fanghi presenti all'interno del sistema (in

CAPITOLO 3. METODI CONVENZIONALI DI ELABORAZIONE DEI DATI GESTIONALI

termini di SST) per la massa di fanghi che viene allontanata dal sistema (nei fanghi di supero e nell'effluente):

$$SRT = \frac{V_{OX} \cdot SST_{OX}}{(Q_f \cdot SST_f + Q_{out} \cdot SST_{out})} \quad (3.5)$$

dove:

V_{OX} = volume della vasca di ossidazione [m^3];

SST_{OX} = concentrazione di SST nella vasca di ossidazione [kg/m^3];

Q_f = portata del fango si supero [m^3/d];

SST_f = concentrazione di SST nel fango di supero [kg/m^3];

Q_{out} = portata dell'effluente [m^3/d];

SST_{out} = concentrazione di SST nell'effluente [kg/m^3].

Per l'ossidazione della sostanza organica, il valore minimo dell'età del fango deve essere di 2,5-3,0 d a 20°C e 3,0-5,0 d a 10°C. Affinché avvenga nitrificazione, invece, l'età del fango deve essere maggiore, in genere superiore a 8-10 d. Per avere una completa rimozione dell'azoto con il processo di nitrificazione e denitrificazione, è richiesta un'età del fango di minimo 15-20 d [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

Nell'elaborazione dei dati, si è ricavato un valore di SRT per ogni mese, utilizzando le medie mensili di SST_{OX} , SST_f (che coincide con la concentrazione di solidi nel fango di ricircolo SST_{RIC}) e di carico di SST in uscita. Per il termine Q_f , invece, si è considerata la somma mensile espressa in m^3/d . Anche in questo caso, se ci sono più linee biologiche, si calcola SRT utilizzando i valori delle medie sulle n linee.

Concentrazione di ossigeno dissolto - OD La concentrazione di ossigeno dissolto è un parametro fondamentale per il processo biologico poiché essa deve essere adeguata al mantenimento delle condizioni ottimali per lo sviluppo degli organismi d'interesse per la rimozione degli inquinanti desiderati. In particolare, nella vasca di ossidazione/nitrificazione bisogna mantenere, per mezzo di compressori, una concentrazione tale per cui i microrganismi abbiano a disposizione l'ossigeno di cui necessitano per ossidare le sostanze organiche biodegradabili. È ovvio che maggiore è la concentrazione di ossigeno dissolto, maggiore è la resa di nitrificazione, a discapito però della sostenibilità economica del processo. Nella vasca di denitrificazione, invece, sono richieste condizioni anossiche e quindi non deve essere presente ossigeno dissolto.

La concentrazione a saturazione di un gas in un liquido (per esempio acqua) è data dalla legge di Henry, ovvero è proporzionale alla pressione parziale del gas nella miscela gassosa sovrastante la soluzione:

$$[A_{(aq)}] = K_H \cdot P_A \quad (3.6)$$

dove:

$[A_{(aq)}]$ = concentrazione molare del gas in acqua;

P_A = pressione parziale del gas;

K_H = costante di Henry che dipende dalla temperatura, dalle caratteristiche chimiche del liquido e del gas e dalla eventuale presenza di sali disioolti.

Per avere un valore di riferimento, la concentrazione a saturazione dell'ossigeno in acqua, alla temperatura di 20°C, è di 9,17 mg/L [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

3.2 Analisi esplorativa dei dati

L'analisi esplorativa dei dati (EDA - *Exploratory Data Analysis*) è l'analisi visuale dei dati per mezzo di grafici diagnostici ed è il primo passo da compiere per l'elaborazione di una *time series*. Alcune caratteristiche delle serie di dati sono identificabili solo tramite un controllo visivo e quindi l'analisi esplorativa non deve essere sostituita da metodi statistici più sofisticati. Questa analisi consiste nell'osservazione dell'andamento dei dati grezzi al fine di individuare, per esempio, valori anomali e andamenti temporali (come trend, stagionalità e ciclicità) dei dati. Il grafico che mostra il comportamento della serie di dati nel tempo è il *timeplot*. L'intento è quello di evidenziare aspetti particolari e di scegliere quali ulteriori grafici produrre perché di particolare utilità nella comprensione dei dati studiati [ISPRA, 2013].

3.2.1 Composizione tipica di liquami domestici

I *timeplot* delle concentrazioni in ingresso dei diversi inquinanti possono essere confrontati con la Tabella 3.1, che descrive la composizione tipica di un liquame domestico, per stabilire quale sia il livello di concentrazione dell'acqua reflua che si sta analizzando.

Parametro	Concentrazione [mg/L]		
	Forte	Media	Debole
SST	350	200	100
BOD₅	300	200	100
COD	1.000	500	250
N_{tot}	85	40	20
N-NH₄⁺	50	25	12
N-NO₂⁻	0	0	0
N-NO₃⁻	0	0	0
P_{tot}	10	6	3

Tabella 3.1: Composizione tipica di un liquame domestico [Vismara, 1998]

3.2.2 Rapporti

Per la valutazione delle condizioni di funzionamento degli impianti a fanghi attivi, è utile calcolare, rappresentare e analizzare l'andamento dei rapporti tra le concentrazioni in ingresso di alcuni inquinanti. In particolare, sono interessanti i rapporti BOD_5/COD , N_{tot}/BOD_5 , N_{tot}/COD , P_{tot}/BOD_5 , P_{tot}/COD , P_{tot}/N_{tot} .

Il rapporto tra BOD_5 e COD dà indicazioni riguardo alla percentuale di sostanza organica biodegradabile rispetto al totale delle sostanze ossidabili. Inoltre, definito su base statistica il valore di tale rapporto, si può scegliere di misurare il COD per le analisi di routine e quindi di risalire al BOD_5 . Questa scelta di carattere pratico sarebbe da favorire vista la maggiore rapidità della procedura di misurazione del COD rispetto a quella del BOD_5 , che verrebbe comunque condotta periodicamente per verifica [Bonomo, 2008].

Gli altri rapporti, invece, sono utili per capire se le caratteristiche del liquame in ingresso sono sbilanciate verso i nutrienti e, in caso affermativo, se lo sono verso il fosforo o verso l'azoto.

I rapporti ottenuti dai dati degli impianti in esame vanno confrontati con i rispettivi valori minimo, tipico e massimo. Per determinare questi riferimenti, si considerano gli apporti pro capite (minimo, tipico e massimo) per ciascun inquinante. Come è ovvio che sia, il rapporto tipico è calcolato dividendo gli apporti tipici, mentre per il rapporto minimo e massimo si combinano opportunamente apporti massimi e minimi (vale a dire che per numeratore e denominatore si utilizzeranno rispettivamente gli apporti minimo e massimo per il rapporto minimo e viceversa per quello massimo).

Gli apporti pro capite e i valori di riferimento dei rapporti sono raccolti in Tabella 3.2.

Apporto pro capite [$g ab^{-1} d^{-1}$]			
Parametro	Minimo	Massimo	Tipico
BOD_5	54	70	60
COD	110	130	120
N_{tot}	12	15	12
P_{tot}	1,2	1,5	1,2
Rapporti [-]			
Rapporto	Minimo	Massimo	Tipico
BOD_5/COD	0,415	0,636	0,500
N_{tot}/BOD_5	0,171	0,278	0,200
N_{tot}/COD	0,092	0,136	0,100
P_{tot}/BOD_5	0,017	0,028	0,020
P_{tot}/COD	0,009	0,014	0,010
P_{tot}/N_{tot}	0,080	0,125	0,100

Tabella 3.2: Valori di riferimento, nel caso di un liquame urbano, relativamente all'apporto pro capite dei principali inquinanti e dei loro rapporti [Bonomo, 2008] [Hartley, 2013]

3.2.3 Carichi

Il carico in ingresso esprime la massa di inquinante che entra nel sistema in un giorno e la sua unità di misura è kg/d. Il calcolo è semplicemente dato dal prodotto tra la concentrazione in ingresso di inquinante e la portata in ingresso:

$$Carico = Concentrazione_{IN} \cdot Q_{IN} \quad (3.7)$$

Al fine di valutare se i carichi in ingresso siano compatibili con la potenzialità di progetto, è utile calcolare i valori di carico espressi nella stessa unità di misura di quest'ultima, ovvero abitanti equivalenti (AE). Noti i valori tipici di apporto pro capite per ciascun inquinante (Tabella 3.2), il carico in abitanti equivalenti è il rapporto tra il carico e l'apporto pro capite.

3.3 Rendimenti

I rendimenti danno informazioni riguardo all'efficacia dei processi che avvengono nell'impianto di depurazione. Di particolare interesse sono i rendimenti di rimozione di BOD₅, COD, azoto totale e fosforo totale e i rendimenti di nitrificazione e di denitrificazione:

$$\eta_{BOD_5} = \frac{BOD_{5-IN} - BOD_{5-OUT}}{BOD_{5-IN}} \cdot 100 \quad (3.8)$$

$$\eta_{COD} = \frac{COD_{IN} - COD_{OUT}}{COD_{IN}} \cdot 100 \quad (3.9)$$

$$\eta_{N_{tot}} = \frac{N_{tot-IN} - N_{tot-OUT}}{N_{tot-IN}} \cdot 100 \quad (3.10)$$

$$\eta_{P_{tot}} = \frac{P_{tot-IN} - P_{tot-OUT}}{P_{tot-IN}} \cdot 100 \quad (3.11)$$

$$\eta_{nit} = \frac{TKN_{IN} - N-NH_4^+_{OUT} - N_{ass}}{TKN_{IN} - N_{ass}} \cdot 100 \quad (3.12)$$

$$\eta_{den} = \frac{N_{tot-IN} - N-NH_4^+_{OUT} - N-NO_2^-_{OUT} - N-NO_3^-_{OUT} - N_{ass}}{N_{tot-IN} - N-NH_4^+_{OUT} - N_{ass}} \cdot 100 \quad (3.13)$$

Con N_{ass} si intende l'azoto assimilato, ovvero l'azoto che viene rimosso perché utilizzato per la sintesi batterica. In particolare, tale contributo è pari al 5% del BOD₅ rimosso [Collivignarelli and Bertanza, 2012].

Si precisa che tutti i termini che compaiono nelle equazioni sono dei carichi.

3.4 Limiti allo scarico

Le concentrazioni di inquinanti nell'effluente devono rispettare i limiti imposti dalla normativa.

A livello nazionale, i limiti di emissione degli scarichi idrici sono indicati nell'Allegato 5 alla parte III del D. Lgs. 152/06. Secondo l'art. 101, comma 2 di tale decreto, le regioni hanno la facoltà di definire valori limite diversi da quelli dell'Allegato 5 alla parte III, purché non siano meno restrittivi [Italia, 2006].

Lo stesso decreto stabilisce, per i parametri BOD_5 , COD e SST, il numero massimo consentito, su base annua, di campioni non conformi ai limiti allo scarico, in relazione al numero di campioni prelevati durante l'anno. Ciò significa che una certa percentuale di campioni in uscita può avere concentrazioni eccedenti quelle limite. Poiché ci si aspetta che campioni non conformi siano la conseguenza di carichi in ingresso particolarmente elevati, si può pensare di utilizzare questo riferimento per valutare se i carichi di inquinanti in ingresso, espressi in abitanti equivalenti, siano compatibili con la potenzialità di progetto dell'impianto. In altre parole, si considera accettabile avere una certa percentuale (uguale a quella determinata per l'uscita) di campioni in ingresso con carichi eccedenti gli abitanti equivalenti per cui è stato progettato l'impianto di depurazione.

Capitolo 4

Richiami di statistica

Il capitolo ha lo scopo di illustrare i concetti e i metodi statistici che stanno alla base delle elaborazioni effettuate.

In primo luogo si riporteranno le definizioni degli indici statistici e dei valori comunemente utilizzati in qualsiasi analisi statistica di base.

Successivamente saranno spiegati alcuni metodi statistici atti a individuare le caratteristiche della serie di dati in esame.

4.1 Statistica descrittiva

La statistica descrittiva è una caratterizzazione quantitativa dei dati, condotta attraverso il calcolo di alcuni parametri che sintetizzano le più importanti caratteristiche statistiche dei dati [ISPRA, 2013]. Come già spiegato nel Capitolo 3, questa analisi fornisce alcune caratteristiche intrinseche della serie di dati che si riferiscono alla lunghezza e alla completezza della serie e alla distribuzione dei dati mancanti nella serie stessa.

Altri parametri utili per descrivere statisticamente una serie di dati si suddividono in indici di posizione, indici di dispersione e indici di forma.

Nota: le definizioni presenti in questa sezione, se non espressamente indicato, sono estratte da [Ross and Morandin, 2008].

4.1.1 Indici di posizione

Gli indici di posizione danno informazioni relative alla posizione dei dati sulla scala dei numeri, cioè indicano l'ordine di grandezza dei valori assunti dai dati [ISPRA, 2013].

4.1.1.1 Media

La media \bar{x} di una serie di n misurazioni x_1, x_2, \dots, x_n è definita come:

$$\bar{x} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

4.1.1.2 Percentili

Dato il numero intero k compreso tra 0 e 100 e data una serie di dati, si definisce k -esimo percentile il valore maggiore o uguale al k per cento dei dati.

Tra i percentili, i più rilevanti sono:

- 25° percentile, detto anche *primo quartile*;
- 50° percentile, detto anche *secondo quartile* o *mediana*;
- 75° percentile, detto anche *terzo quartile*.

A differenza della media, la mediana è un indice di posizione robusto perché non risente della presenza di eventuali *outliers* [ISPRA, 2013] (per la definizione, si veda sezione 4.2).

4.1.2 Indici di dispersione

Gli indici di dispersione descrivono quanto i dati siano concentrati o dispersi rispetto ai valori determinati dagli indici di posizione e quindi indicano la variabilità dei dati [Ross and Morandin, 2008].

4.1.2.1 Varianza

La varianza s^2 di una serie di n misurazioni x_1, x_2, \dots, x_n di media \bar{x} è definita come:

$$s^2 := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.2)$$

4.1.2.2 Scarto quadratico medio

Lo scarto quadratico medio, o deviazione standard, s di una serie di n misurazioni x_1, x_2, \dots, x_n di media \bar{x} è la radice quadrata della varianza:

$$s := \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.3)$$

4.1.2.3 Coefficiente di variazione

Il coefficiente di variazione CV , o deviazione standard relativa, di una serie di n misurazioni x_1, x_2, \dots, x_n di media \bar{x} è definito come [Brown and Berthouex, 2002]:

$$CV := \frac{s}{\bar{x}} \quad (4.4)$$

Questo indice è di particolare utilità qualora si volessero confrontare le variabilità di diverse serie di dati perché non è dipendente dalla media dei dati, come invece avviene se si considera la deviazione standard.

4.1.3 Indici di forma

Gli indici di forma danno informazioni riguardo alla forma della distribuzione dei dati [ISPRA, 2013].

4.1.3.1 Indice di asimmetria

L'indice di asimmetria, o *skewness*, γ di una serie di n misurazioni x_1, x_2, \dots, x_n di media \bar{x} è definito come:

$$\gamma = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]^{3/2}} \quad (4.5)$$

Se l'indice assume valori positivi, si avrà una maggiore frequenza dei valori inferiori alla media e, viceversa, se l'indice è negativo si avrà una minore frequenza dei valori inferiori alla media. Se la distribuzione dei dati è simmetrica, invece, l'indice di asimmetria sarà pari a 0 [ISPRA, 2013].

4.1.4 *Box plot*

Le caratteristiche di una serie di dati possono essere descritte anche attraverso il grafico chiamato *box plot* (o *box-and-whisker plot*) (Figura 4.1.1). Esso evidenzia la mediana con una barra centrale e i quartili (corrispondenti al 25° e al 75° percentile) come un rettangolo (*box*). Il rettangolo, quindi, include il 50% dei dati, ovvero il cosiddetto scarto interquartile. I due segmenti esterni, detti baffi (*whiskers*), includono tutti i valori ad eccezione di quelli più estremi che sono invece rappresentati con dei pallini (come indicato nella sezione 4.2, saranno considerati possibili *outliers*) [Brown and Berthouex, 2002].

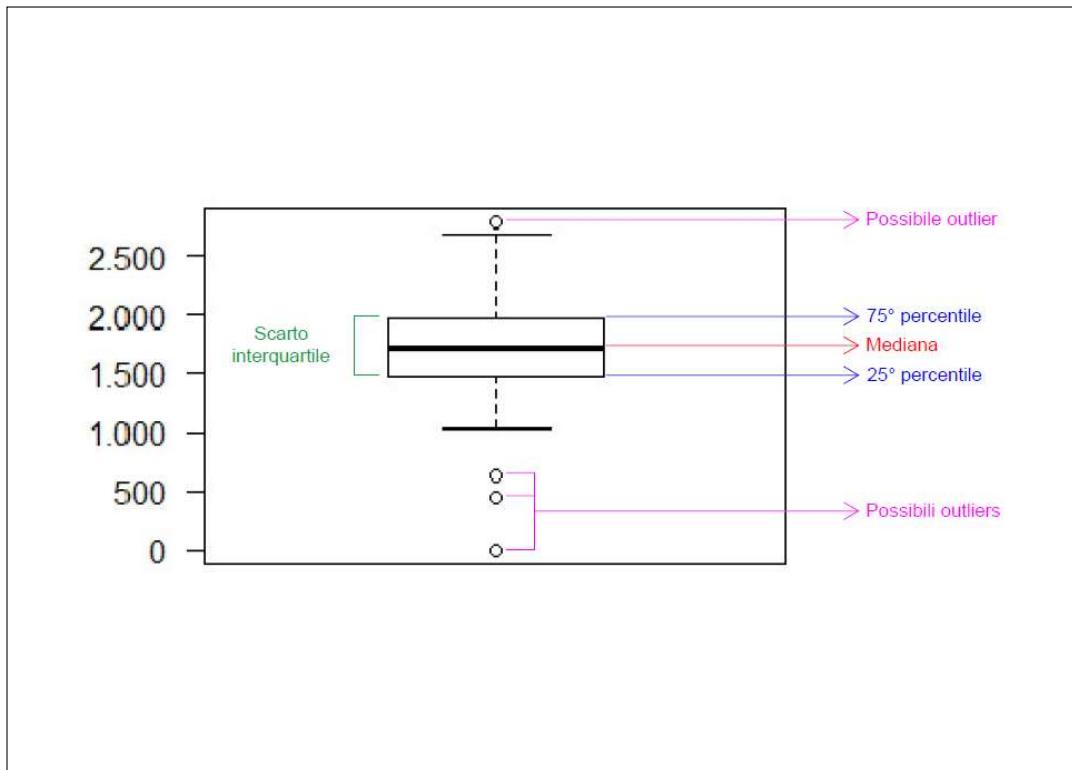


Figura 4.1.1: Esempio di *box plot*

4.2 Outliers

Gli *outliers*, o valori anomali, sono quei valori che si discostano marcatamente dagli altri valori della serie di dati. Per evitare di trarre conclusioni errate, prima di procedere all’analisi statistica è opportuno valutare quali dati siano da considerarsi *outliers* e come trattarli. Ci sono più metodi per definire, individuare e trattare gli *outliers* e non c’è un criterio per stabilire quale tra questi sia il migliore. Una volta scelto uno di questi metodi, è importante indicarlo e descriverlo, in modo da garantire la massima trasparenza e permettere una piena comprensione dell’analisi da parte di un eventuale lettore [Aguinis et al., 2013].

Nel caso in esame, si è innanzitutto fatta una distinzione tra due tipi di *outliers*:

- **Error outliers**: dati che si trovano a una certa distanza dagli altri poiché sono il risultato di misure non accurate. Per esempio possono essere dati che derivano da errori di campionamento, errori nella manipolazione dei dati, errori di calcolo o dati che sono al di fuori del possibile intervallo di valori.

- ***Interesting outliers***: misure accurate che giacciono a una certe distanza dagli altri dati e che contengono informazioni inattese ma importanti.

4.2.1 Procedura di identificazione e di trattamento degli *outliers*

Un metodo semplice per identificare gli *outliers* è l'utilizzo dei *box plot*. Come già mostrato nella Figura 4.1.1, i possibili *outliers* sono i punti agli estremi del grafico. In particolare, essi rappresentano i valori che giacciono al di fuori dell'intervallo pari a 1,5 volte lo scarto interquartile¹.

I dati così individuati sono dei potenziali *error outliers* o potenziali *interesting outliers*.

Nel primo caso, bisogna valutare se essi siano effettivamente valori anomali. È quindi necessario determinare la causa dell'anomalia: se c'è un errore nella raccolta e registrazione del dato, allora esso è un *error outlier*, se invece la causa non è chiara, esso diventa un *interesting outlier*.

Stabilito quali dati siano *error outliers*, si procede modificando il valore, sostituendolo con quello corretto, oppure rimuovendolo. La decisione deve essere presa dall'esperto del dominio in cui si opera e deve essere motivata.

A questo punto, si valutano i potenziali *interesting outliers* (quelli individuati fin dall'inizio e quelli che si è stabilito non fossero *error outliers*). Anche in questo caso, l'esperto di dominio, grazie alle sue competenze e consapevole del fine ultimo dell'analisi, studia i valori anomali e decide se conservarli, modificarli o eliminarli, specificando sempre la motivazione della scelta [Aguinis et al., 2013].

4.3 Dati mancanti

Quando si raccolgono e registrano i dati di una *time series*, capita spesso che si abbia a che fare con alcuni dati mancanti. Il dato può mancare per diversi motivi: non è stato misurato, è stato misurato ma è andato perso, è stato misurato ma è considerato inutilizzabile [Moritz et al., 2015].

Una serie contenente valori mancanti può far nascere dei problemi perché, per alcune analisi, sono richieste serie complete di dati. Di conseguenza, è opportuno valutare quale sia il metodo migliore per risolvere questi problemi, in base al tipo di analisi che si vuole condurre. Se si volessero confrontare due serie di dati, sarebbe necessario avere dati campionati in maniera sincrona (per esempio negli stessi giorni dell'anno), se si volesse invece fare un'analisi di

¹Come indicato nella documentazione di R: <https://www.rdocumentation.org/packages/graphics/versions/3.5.1/topics/boxplot>

frequenza, servirebbe una frequenza di campionamento costante, a intervalli regolari.

Si definiscano, innanzitutto, i diversi tipi di *missing data* [Moritz et al., 2015]:

- **MCAR - Missing Completely At Random:** la posizione dei dati mancanti non segue un meccanismo sistematico ma è completamente casuale. Questo implica che la probabilità che una certa osservazione sia mancante è indipendente dal valore delle altre variabili e che tale probabilità è indipendente anche dal valore dell'osservazione stessa. Nel caso in cui si abbia una *time series* univariata (ovvero di una sola variabile), la probabilità che una certa osservazione sia mancante è indipendente dall'istante temporale dell'osservazione nella serie.
- **MAR - Missing At Random:** la probabilità che un'osservazione sia mancante è indipendente dal valore dell'osservazione stessa ma è dipendente dalle altre variabili (compresa la variabile temporale). Nelle *time series* univariate, tale probabilità dipende dall'istante temporale dell'osservazione.
- **NMAR - Not Missing At Random:** la probabilità che un'osservazione sia mancante dipende dal valore della variabile stessa e potrebbe dipendere anche da altre variabili.

4.3.1 Tecniche di trattamento dei dati mancanti

Di seguito saranno elencati alcuni metodi che possono essere applicati per risolvere i problemi legati alla presenza di dati mancanti [Kang, 2013].

Case deletion Questo metodo consiste nell'eliminare i casi in cui ci sono dati mancanti e quindi significa che si esegue un'analisi dei casi completi. Per esempio, con riferimento ai dati trattati in questo lavoro, bisognerebbe considerare esclusivamente le misurazioni dei giorni in cui si ha il dato per ogni parametro.

Pairwise deletion Il metodo prevede l'eliminazione dei casi incompleti ma esclusivamente se relativi al tipo di analisi che si sta conducendo. Questi casi potranno essere comunque utilizzati per altre analisi. Per fare un esempio, si pensi ad un'analisi che coinvolga il rapporto tra BOD_5 e COD: verranno considerati solamente i giorni in cui si hanno le misure di entrambi i parametri, ma i giorni scartati potranno essere utilizzati per altre analisi.

Mean substitution I dati mancanti vengono sostituiti con il valore della media di tutti i dati. In alternativa la media può essere calcolata facendo una aggregazione dei dati. Per esempio, si calcola la media settimanale e il suo valore viene assegnato ai dati mancanti della settimana considerata.

Imputazione per regressione Il processo di imputazione consiste nella sostituzione dei dati mancanti con un valore stimato. In questo caso, l'imputazione viene fatta sostituendo i valori mancanti tramite un'equazione di regressione.

Last observation carried forward Ogni dato mancante viene rimpiazzato con il valore dell'ultima osservazione.

Maximum likelihood Questo metodo si applica quando ci sono alcuni dati mancanti ma la serie è relativamente completa. I dati mancanti vengono sostituiti utilizzando la distribuzione di probabilità delle altre variabili.

Imputazione multipla L'imputazione viene condotta con un modello di regressione contenente una componente casuale che cerca di mantenere la varianza originale dei dati. Il processo viene ripetuto m volte, ottenendo quindi m possibili nuove serie di dati. Ciascuna di esse viene analizzata con le procedure statistiche standard per le serie complete e, combinando i risultati ottenuti, si ottiene il valore finale da inserire al posto del dato mancante.

4.4 Media mobile

La curva della media mobile (*moving average*) permette di smussare le variazioni estreme nel grafico della *time series* e di evidenziare eventuali trend e ciclicità. Per calcolare la media mobile, si considera una periodo mobile di m valori (che, nel caso di *time series*, rappresentano giorni o anni), preferibilmente dispari. Preso il punto centrale del periodo, si calcola la media aritmetica del valore del punto stesso e dei valori interni al periodo che lo precedono e lo seguono. Il risultato è il valore dell'ordinata del punto della curva della media mobile che corrisponde all'ascissa del punto centrale considerato in partenza. La media mobile di un periodo di m valori applicata a una serie di n valori restituisce una serie di lunghezza $n - 2k$, dove $k = (m - 1)/2$:

$$y_i = \frac{1}{m} \sum_{j=i-k}^{i+k} x_j; \text{ con } i = k + 1, k + 2, \dots, (n - k) \quad (4.6)$$

Sebbene dal punto di vista matematico l'ampiezza m del periodo mobile possa essere scelta a piacere, per avere risultati significativi è necessario che

essa sia sufficientemente piccola rispetto alla lunghezza n delle serie di dati [Reddy, 2005].

4.5 Componenti di una *time series*

Una *time series* può essere considerata come la somma di tre componenti [ISPRA, 2013]:

- **Trend:** è detto anche tendenza deterministica ed esprime, nel lungo periodo, l'andamento dei dati. Tale andamento può essere crescente, decrescente o costante e può essere rappresentato per mezzo di una funzione analitica del tempo.
- **Componente periodica:** può essere una componente ciclica deterministica che ha periodicità diversa da quella annuale oppure una componente stagionale deterministica con frequenza annuale. Quest'ultima descrive la variabilità dei dati in relazione all'alternarsi delle stagioni e, sebbene la periodicità sia annuale, può manifestare valori diversi di anno in anno.
- **Componente irregolare:** è il cosiddetto *white noise*, che è un processo stocastico gaussiano avente una distribuzione di probabilità normale standard.

4.5.1 Trend

L'individuazione del trend, oltre ad avere uno scopo descrittivo della *time series*, è propedeutica alla rimozione del trend stesso. Quest'ultima operazione è necessaria se si vuole procedere all'individuazione di un'eventuale ciclicità o stagionalità che, altrimenti, potrebbe rimanere camuffata dal trend.

4.5.1.1 Individuazione del trend

L'individuazione del trend consiste nell'applicazione di alcuni metodi che permettono di estrapolare, tra le irregolarità di una serie di dati, la componente deterministica di lungo periodo.

I metodi statistici per l'individuazione del trend sono numerosi e non esiste un criterio di scelta ben definito. Essi possono essere parametrici o non parametrici a seconda del fatto che richiedano oppure no la definizione di un modello per i dati esaminati [Alexandrov et al., 2012]. Tra questi si è scelto di utilizzare il metodo della regressione lineare e il filtro LOESS.

Regressione lineare In generale, un modello lineare è una relazione tra la variabile di risposta Y e una combinazione lineare delle variabili di ingresso x_1, x_2, \dots, x_r per mezzo delle costanti $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_r$, chiamate *coefficienti di regressione*:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_r x_r + e \quad (4.7)$$

dove e è una componente casuale detta residuo. Nel caso della stima del trend di una *time series*, la variabile Y è il parametro indagato e la variabile x è unica ed è rappresentata dal tempo t :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 t + e \quad (4.8)$$

Tra i diversi metodi per la stima dei coefficienti di regressione, che viene fatta a partire da un campione n di dati, il più diffuso è il metodo dei minimi quadrati. Detti B_0 e B_1 gli stimatori rispettivamente di β_0 e β_1 , questo metodo consiste nello scegliere come coefficienti di regressione gli stimatori che minimizzano la somma (SS) dei quadrati degli scarti tra risposte stimate e reali:

$$SS := \sum_{i=1}^n (Y_i - B_0 - B_1 t_i)^2 \quad (4.9)$$

La retta $y = B_0 + B_1 t$ è la stima della retta di regressione, ovvero la retta che interpola meglio i dati [Ross and Morandin, 2008].

LOESS Il LOESS (o LOWESS - *LOcally WEighted Scatterplot Smoothing*) è metodo di regressione non parametrico, cioè che non richiede la definizione a priori di un modello matematico [Alexandrov et al., 2012]. Il modello si basa sul concetto di regressione locale pesata robusta (cioè poco influenzata dai valori anomali), tale per cui i valori di partenza vengono sostituiti con valori ricavati da un polinomio che approssima i dati per mezzo della regressione pesata ai minimi quadrati. Si sceglie una funzione dei pesi W che, generalmente, è una funzione tricubica:

$$W(x) = \begin{cases} (1 - |x|^3)^3 & \text{se } |x| < 1 \\ 0 & \text{se } |x| \geq 1 \end{cases} \quad (4.10)$$

Questa funzione è simmetrica, con peso massimo in corrispondenza dell'asse di simmetria e pesi decrescenti, fino a diventare nulli, via via che ci si allontana da tale asse. Ogni punto (t_i, y_i) della *time series* viene sostituito con il valore (t_i, \hat{y}_i) che si ottiene dalla regressione lineare pesata secondo W , detta regressione locale. Successivamente, per ogni (t_i, y_i) , si definiscono nuovi pesi δ_i dipendenti dalla misura del residuo $y_i - \hat{y}_i$ (più grande è il residuo, minore è il peso). Si ripete quindi la regressione utilizzando i nuovi pesi. Queste due operazioni sono ripetute più volte [Cleveland, 1979].

4.5.1.2 Rimozione del trend

Sia data la *time series* y costituita da trend T , componente periodica P e componente irregolare I :

$$y = T + P + I \quad (4.11)$$

Una volta individuata la funzione T , è possibile rimuoverla, per semplice sottrazione, dalla serie di partenza:

$$y = (T + P + I) - T = P + I \quad (4.12)$$

La rimozione del trend è necessaria per poter procedere con altre analisi come la valutazione della correlazione e l'analisi della periodicità della serie di dati. Evitando questo passaggio non sarebbe possibile notare quelle caratteristiche della *time series* che sono sovrastate dal trend [Wu et al., 2007].

4.5.2 Componente periodica

Per stabilire se la serie di dati sia costituita da una componente periodica significativa, si può ricorrere all'utilizzo della funzione di autocorrelazione (ACF - *AutoCorrelation Function*).

In termini intuitivi, la funzione di autocorrelazione è una misura della “similarità” tra una *time series* y_t e una versione di sé stessa $y_{t+\tau}$ traslata di un ritardo τ [Priestley, 1981]. Tale misura r_τ , detta *coefficiente di autocorrelazione* al ritardo (o *lag*) τ , è calcolata come:

$$r_\tau = \frac{\sum_{t=1}^{N-\tau} (y_t - \bar{y})(y_{t+\tau} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^{N-\tau} (y_t - \bar{y})^2} \quad (4.13)$$

dove N è il numero di osservazioni costituenti la *time series* e \bar{y} è la media di tutte le osservazioni y_t .

Il coefficiente di autocorrelazione assume valori compresi tra -1 (correlazione negativa perfetta) e +1 (correlazione positiva perfetta).

Ciò che si ottiene dall'applicazione della funzione di autocorrelazione a una *time series* è un grafico chiamato correlogramma che rappresenta il valore del coefficiente di autocorrelazione per ciascun *lag* considerato. Il *lag* varia da 0 (quando si confronta la serie con sé stessa) fino a un valore massimo che deve essere scelto in base alla periodicità massima che si prevede di individuare nei dati analizzati. In particolare, se una serie di dati è caratterizzata da fluttuazioni stagionali, allora il rispettivo correlogramma manifesta delle oscillazioni alla stessa frequenza [Nopiah et al., 2012].

4.6 Correlazione

La correlazione è definita come la relazione che sussiste tra due o più variabili. Tale relazione può essere positiva o negativa e lineare o non lineare:

- Correlazione positiva: al crescere (o decrescere) di una variabile, cresce (o decresce) anche l'altra;
- Correlazione negativa: al crescere (o decrescere) di una variabile, l'altra decresce (o cresce);
- Correlazione lineare: il rapporto tra le variazioni delle due variabili è costante;
- Correlazione non lineare: il rapporto tra le variazioni delle due variabili non è costante.

Esistono diversi metodi per analizzare la correlazione tra variabili. Il più noto e diffuso è il calcolo del coefficiente di correlazione di Pearson che, però, richiede il soddisfacimento di alcune condizioni tra cui la normalità della distribuzione di probabilità delle variabili e una relazione di linearità tra di esse. Non potendo sapere a priori se questi requisiti sono soddisfatti, è preferibile ricorrere a metodi non parametrici, la cui applicazione non dipende dalla distribuzione di probabilità delle variabili e dal tipo di relazione tra esse [Sharma, 2005].

4.6.1 Coefficiente di correlazione di Spearman

Il calcolo del coefficiente di correlazione di Spearman è un metodo non parametrico. Assegnando un rango alle osservazioni (ovvero il valore intero corrispondente alla posizione che le osservazioni occupano all'interno della serie ordinata in senso crescente) e basando il calcolo del coefficiente su questi ranghi piuttosto che sul valore delle osservazioni, è possibile evitare di fare assunzioni sulla distribuzione di probabilità delle variabili di interesse. Il coefficiente di correlazione di Spearman r tra due *time series* x e y di numerosità N è quindi dato da:

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N D_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (4.14)$$

dove D_i è la differenza di rango tra osservazioni corrispondenti nelle due serie di dati:

$$D_i = \text{rango}(x_i) - \text{rango}(y_i) \quad (4.15)$$

Il coefficiente può assumere valori compresi tra -1 e +1, dove +1 indica una perfetta correlazione positiva e -1 una perfetta correlazione negativa. Se il coefficiente è 0, significa che non c'è correlazione tra le variabili, ovvero esse sono scorrelate. In generale, più il coefficiente si avvicina ai valori estremi -1

e +1, più è forte la correlazione tra le variabili e, in maniera analoga, più un coefficiente si avvicina a 0, più la correlazione diventa debole [Sharma, 2005].

L'interpretazione qualitativa del coefficiente di Spearman per descrivere il grado di correlazione è indicata in Tabella 4.1.

Coefficiente di correlazione	Grado di correlazione
0,80 - 1,00	Positiva, molto forte
0,60 - 0,79	Positiva, forte
0,40 - 0,59	Positiva, moderata
0,20 - 0,39	Positiva, debole
0,00 - 0,19	Positiva, molto debole
(-0,19) - 0,00	Negativa, molto debole
(-0,39) - (-0,20)	Negativa, debole
(-0,59) - (-0,40)	Negativa, moderata
(-0,79) - (-0,60)	Negativa, forte
(-1,00) - (-0,80)	Negativa, molto forte

Tabella 4.1: Coefficienti di correlazione di Spearman e relativo grado di correlazione [Chowdhury et al., 2015]

Capitolo 5

Risultati delle elaborazioni

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle elaborazioni dei dati e le relative osservazioni. L'elaborazione numerica dei dati e la rappresentazione grafica dei risultati sono state effettuate con l'ausilio del linguaggio di programmazione **R** [R Core Team, 2018], un software libero specificatamente progettato per l'analisi statistica dei dati, e dell'ambiente di sviluppo *open source* **RStudio™**¹. La configurazione di tale ambiente è dettagliata in Appendice A.

Per poter condurre una qualsiasi analisi, è necessario decidere quale strategia adottare per trattare i dati mancanti. Nel caso in esame si riconosce che i dati mancanti sono del tipo MAR (sezione 4.3), infatti il valore del dato non influisce sulla probabilità che esso sia mancante, come invece avviene per la variabile tempo. Per esempio, è più probabile che i dati siano mancanti il sabato e la domenica, giorni in cui non si svolgono analisi di laboratorio. Tra i diversi metodi (sottosezione 4.3.1), si è scelto di utilizzare la *pairwise deletion*, in modo da avere a disposizione, per ogni analisi, il maggior numero possibile di dati. La *case deletion* è stata esclusa perché avrebbe ridotto in maniera drastica il numero di informazioni (i giorni in cui non si hanno valori mancanti per nessun parametro sono veramente pochi). Gli altri metodi, che prevedono la sostituzione del dato mancante con un nuovo valore, non sono stati ritenuti applicabili perché, per determinare il valore sostitutivo, si devono fare delle assunzioni e delle ipotesi che, invece, sono caratteristiche delle *time series* che vogliono essere verificate con le analisi.

5.1 Analisi esplorativa dei dati - risultati

L'analisi esplorativa dei dati non è altro che l'analisi visuale dei dati rappresentati, in questo caso, in un *timeplot*. Si è utilizzata spesso la curva della media mobile (definita nella sezione 4.4) per visualizzare meglio il comportamento delle serie di dati senza essere confusi dalle frequenti oscillazioni del grafico,

¹<https://www.rstudio.com>

spesso associate alla componente di rumore delle serie stesse (sezione 4.5). La media mobile è stata calcolata considerando periodi mobili mensili o bisettimanali e, nella legenda dei grafici, è stata contrassegnata con la sigla *MA* (*moving average*). In alcuni casi, per descrivere il comportamento della serie di dati, si sono utilizzati anche i parametri di posizione media, mediana e percentili (si veda la sottosezione 4.1.1).

A seguito di questa analisi, la padronanza e l'esperienza dell'analista nel campo della depurazione consentono di trarre conclusioni relative al funzionamento dell'impianto in esame.

Alcuni richiami alla teoria dell'ingegneria sanitaria-ambientale che sta alla base delle considerazioni fatte di seguito sono riassunti nel Capitolo 3.

5.1.1 Impianto A

5.1.1.1 Caratteristiche del liquame in ingresso

Il grafico di Figura 5.1.1 riporta l'andamento delle portate giornaliere in ingresso all'impianto e le precipitazioni mensili. I valori di portata presentano un trend decrescente durante l'anno 2015 e sembrano stabilizzarsi negli anni successivi. Tuttavia, un'osservazione più attenta dei valori della media annua permette di individuare un andamento crescente dal 2016 al 2018, anche se non marcato come quello precedente. Le maggiori portate dell'anno 2015 rispetto agli anni seguenti non sono correlate alle precipitazioni che, infatti, in tale anno, sono di scarsa entità. Anche negli anni successivi non si osserva correlazione tra le due grandezze, ad esclusione del 2018 in cui sembra che ai picchi di portata siano associate precipitazioni mensili abbondanti. La progressiva diminuzione dei valori di portata nel primo anno è dovuta a lavori svolti sulle reti per separare acque parassite (a tal riguardo sono in atto ulteriori verifiche) e anche a problemi riscontrati nel funzionamento della sonda di misura della portata.

Periodo	Media Q_{IN} [m^3/d]	Mediana Q_{IN} [m^3/d]	Media/Mediana [-]
2015	4.370	4.368	1,00
2016	2.620	2.461	1,06
2017	2.702	2.529	1,07
2018	2.921	2.661	1,09
2016 - 2018	2.713	2.532	1,07

Tabella 5.1: Media, mediana e rapporto media/mediana delle portate in ingresso

In Tabella 5.1 sono riportati i valori della media, della mediana e del loro rapporto per ciascun anno e per il periodo complessivo compreso tra il 2016 e il 2018 (si è escluso il 2015 perché, visto l'andamento marcatamente decrescente,

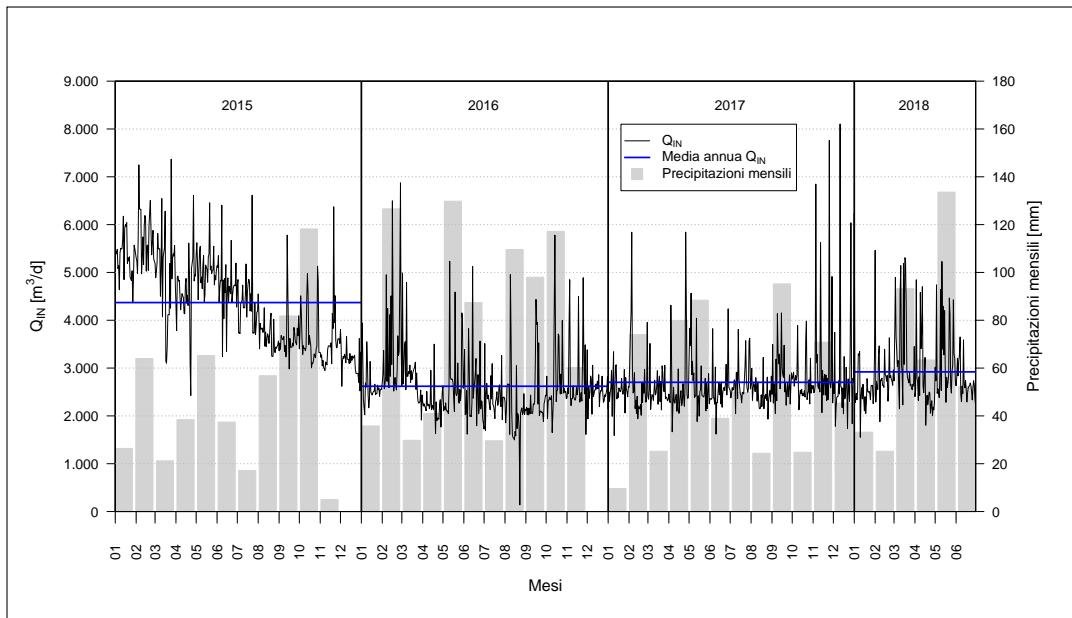


Figura 5.1.1: Andamento della portata giornaliera in ingresso e precipitazioni mensili

è poco rappresentativo). Come valore di riferimento per la portata in tempo asciutto sarebbe opportuno considerare la mediana perché, a differenza della media, non è influenzata dai valori estremi presenti nella serie di dati. Si noti come, nel caso in esame, il rapporto tra media e mediana è prossimo all'unità. Di conseguenza, per la portata in tempo asciutto per il periodo 2016 - 2018 può essere assunto il valore arrotondato di $2.500 \text{ m}^3/\text{d}$. Tale valore è di molto inferiore alla portata corrispondente alla potenzialità di progetto (30.000 AE), stimabile in circa $6.000 \text{ m}^3/\text{d}$.

In Figura 5.1.2, invece, sono rappresentate la portata in ingresso all'impianto e la portata in uscita dallo stesso. In corrispondenza dei valori di punta si verifica by-pass della portata entrante al fine di non sovraccaricare idraulicamente l'impianto e di non compromettere l'efficienza dei trattamenti. Verosimilmente tali situazioni si hanno in caso di precipitazioni meteoriche significative. La portata in uscita è data dalla somma della portata in ingresso all'impianto e della portata che non subisce trattamenti.

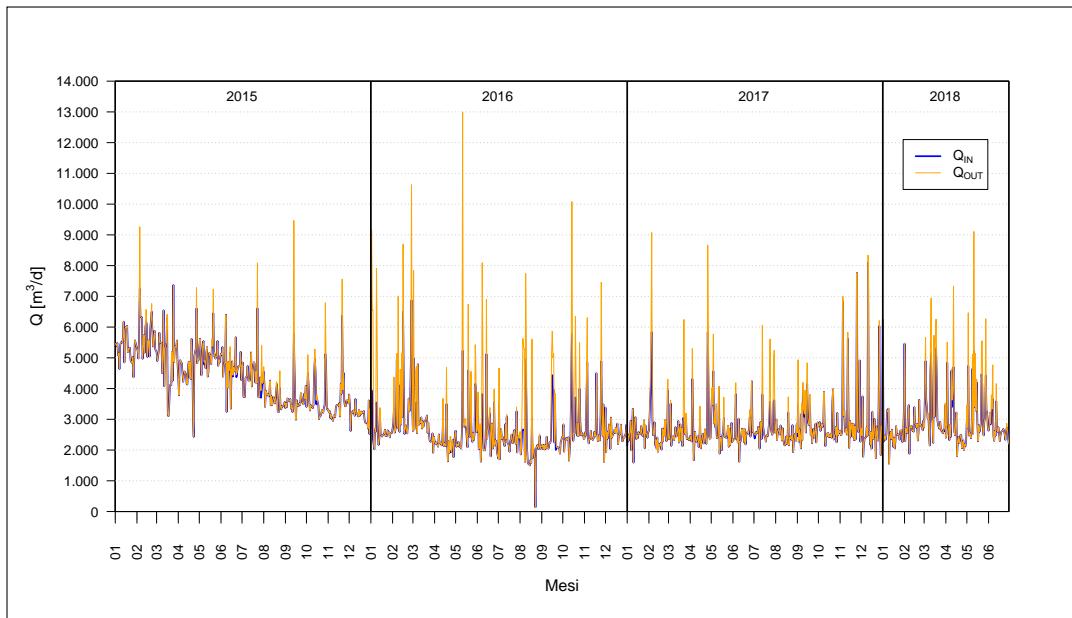


Figura 5.1.2: Andamento delle portate giornaliere in ingresso e in uscita

5.1.1.1.1 Caratteristiche qualitative L’andamento delle concentrazioni di BOD_5 e COD, ottenute attraverso il campionamento routinario, è mostrato in Figura 5.1.3. Entrambe le concentrazioni presentano una discreta variabilità. Il COD si mantiene nell’intervallo 500-1.000 mg/L (come media mobile), il BOD_5 nell’intervallo 150-500 mg/L. Questi valori sono tipici di un liquame a concentrazione media-forte (Tabella 3.1). In particolare, per quanto riguarda il COD, si nota una tendenza all’incremento tra settembre e novembre degli anni 2016 e 2017 e tra dicembre 2016 e maggio 2017. In questi periodi si raggiungono occasionalmente anche picchi oltre i 2.000 mg/L. Queste variazioni potrebbero essere causate da attività vitivinicole allacciate alla pubblica fogna-tura (è in corso un censimento da parte del gestore). BOD_5 e COD, come ci si aspetta, sono correlati (osservare la media mobile aiuta nell’individuazione di tale correlazione) anche se, in corrispondenza di importanti aumenti di COD, si verificano incrementi di BOD_5 meno accentuati.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

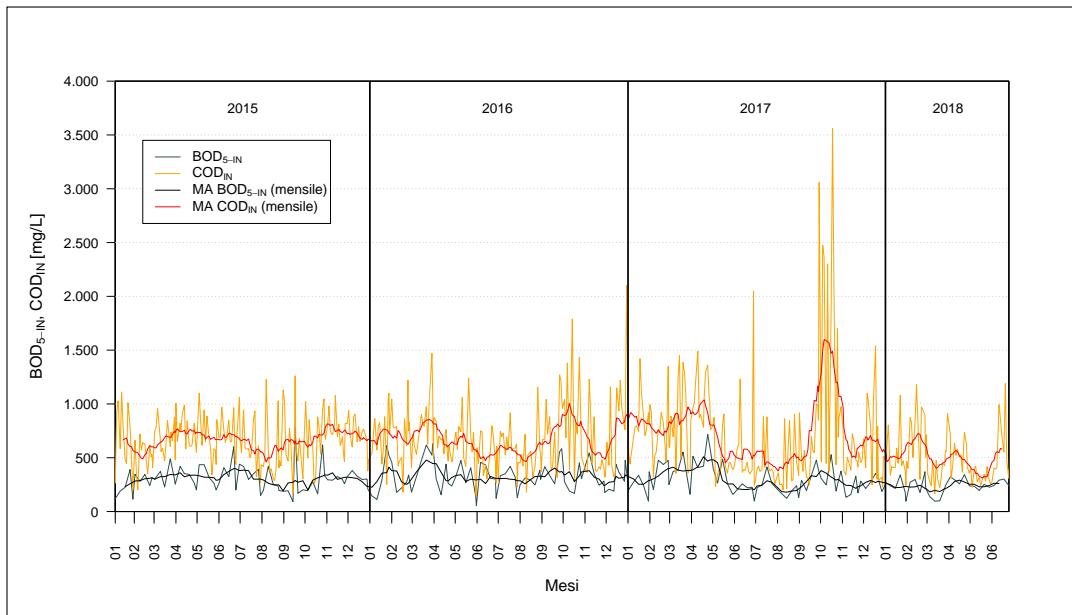


Figura 5.1.3: Andamento delle concentrazioni in ingresso di BOD_5 e COD

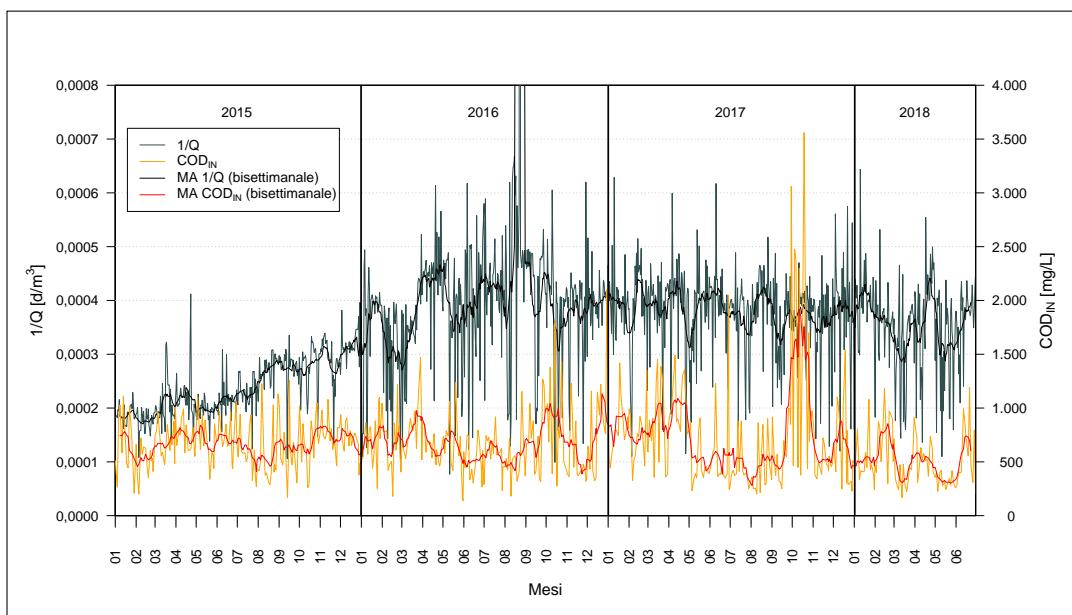


Figura 5.1.4: Andamento della concentrazione in ingresso di COD e dell'inverso della portata giornaliera

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

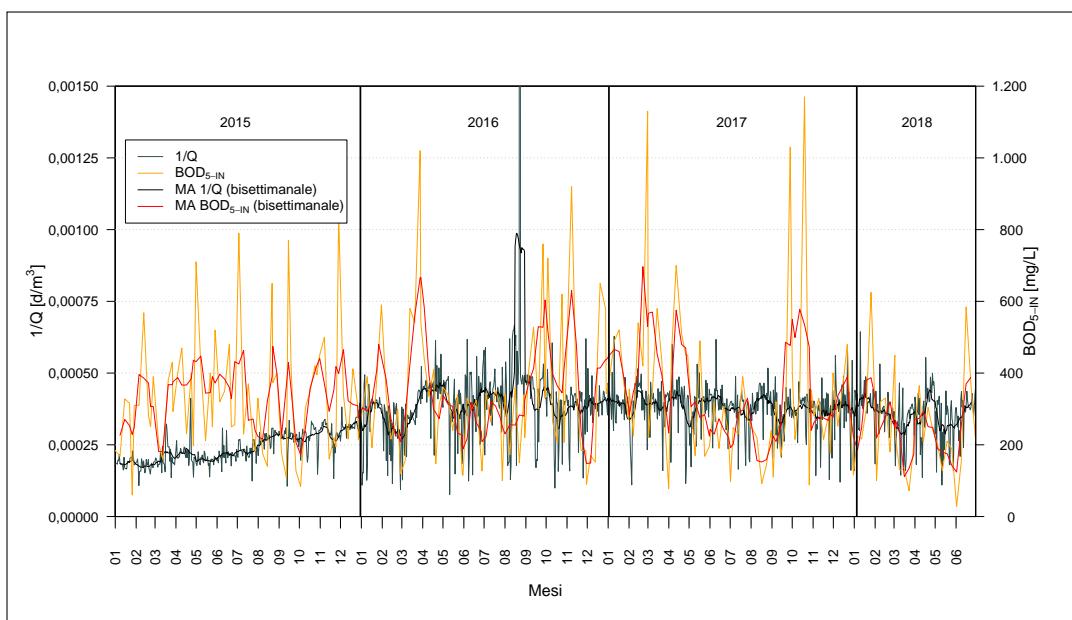
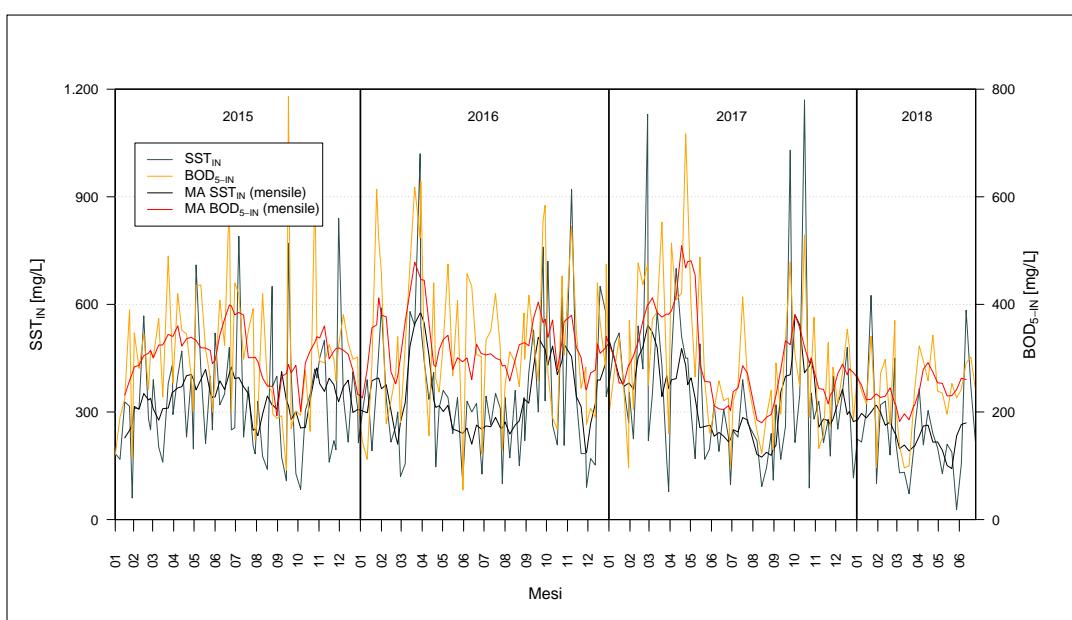
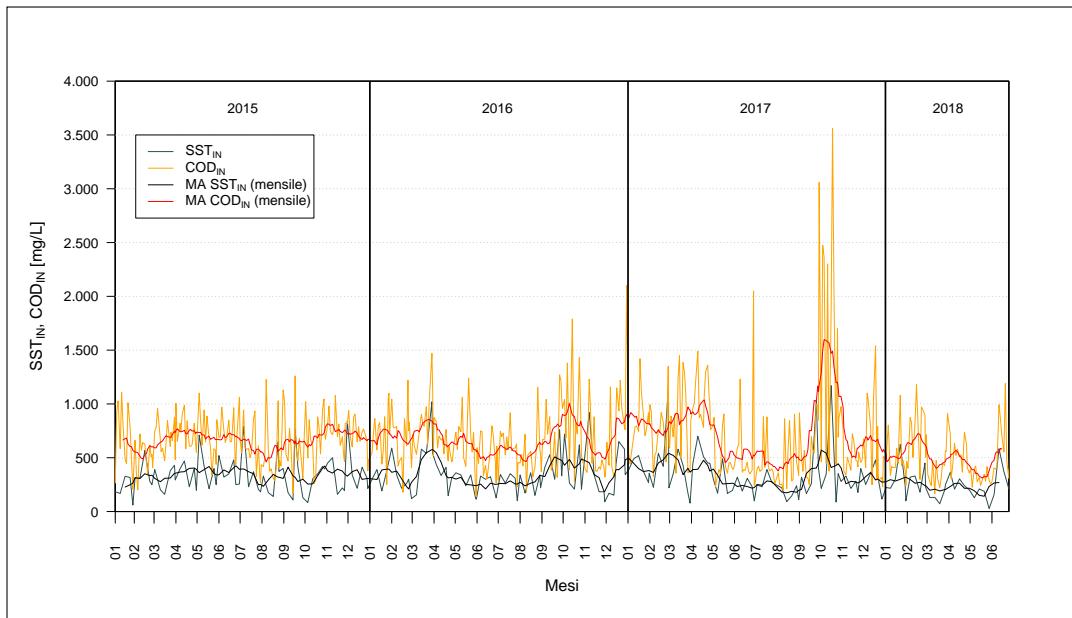


Figura 5.1.5: Andamento della concentrazione in ingresso di BOD_5 e dell'inverso della portata giornaliera

I grafici di Figura 5.1.4 e Figura 5.1.5 riportano i valori di concentrazione di COD e BOD_5 e l'inverso della portata giornaliera al fine di verificare se le variazioni di concentrazione siano correlate alla portata. Con riferimento all'anno 2015, la diminuzione di portata non ha effetti sulla concentrazione di COD che non presenta alcun tipo di trend. Anche nei periodi del 2016 e del 2017 caratterizzati da elevati valori di COD, non si individua correlazione stabile, ma solo per periodi limitati. In altre fasi temporali, anche quando la portata è piuttosto stabile, il COD presenta valori molto elevati, per cui si può affermare di avere un refluo più ricco di carico organico. Non avendo riconosciuto correlazione, si può concludere che l'andamento della concentrazione di COD non è influenzato dalla variazione della portata, ma sarà da imputare a cause esterne come, per esempio, scarichi di tipo non domestico. Osservazioni analoghe possono essere fatte relativamente al BOD_5 .

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI



Nella Figura 5.1.6 è mostrato l'andamento della concentrazione di COD e di SST e si vede chiaramente che c'è correlazione tra le due grandezze.

Nella Figura 5.1.7, invece, si ha il confronto tra BOD₅ e SST che individua ancora una buona correlazione.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

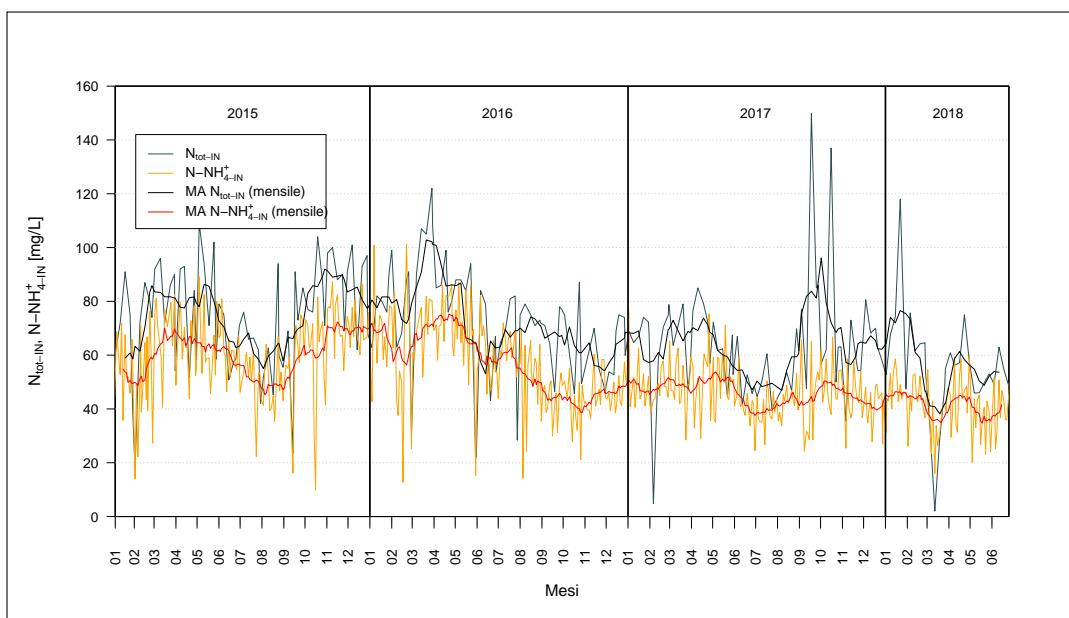


Figura 5.1.8: Andamento delle concentrazioni in ingresso di azoto totale e azoto ammoniacale

L’andamento dell’azoto totale e dell’azoto amminiacale è riportato in Figura 5.1.8. Entrambe le grandezze sono notevolmente variabili e in molti casi superano gli 85 mg/L per l’azoto totale e 50 mg/L per quello amminiacale, tipici di un liquame domestico fortemente concentrato (Tabella 3.1). Ciò potrebbe dipendere, come già visto anche per il COD, dalla presenza di scarichi di diverso tipo rispetto a quelli urbani come scarichi di allevamenti o scarichi provenienti da attività vitivinicole. Se si escludono i picchi di fine 2017 e inizio 2018, è possibile riconoscere un trend leggermente decrescente che ha inizio nella prima metà dell’anno 2016. In termini di percentuale, l’azoto amminiacale è la maggior componente dell’azoto totale, come previsto per un refluo di origine civile (mediamente rappresenta l’80%).

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

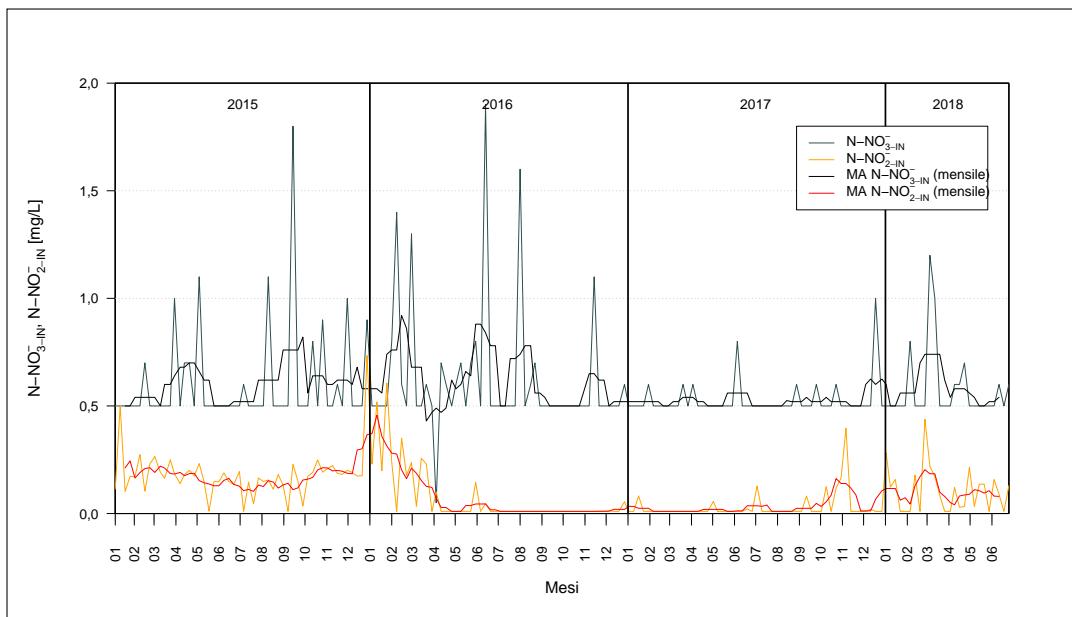


Figura 5.1.9: Andamento delle concentrazioni in ingresso di azoto nitroso e azoto nitrico

La percentuale di azoto nitroso e nitrico, invece, è irrisiona (Figura 5.1.9): le forme azotate ossidate non superano mai i 2 mg/L, mentre il valore medio della concentrazione di azoto totale è di circa 70 mg/L.

Analogamente a quanto fatto precedentemente per il COD, si sono messe a confronto le concentrazioni di azoto totale con l'inverso della portata giornaliera (Figura 5.1.10). Anche in questo caso non si manifesta alcuna correlazione e quindi non è possibile trovare corrispondenza tra la variazione di portata e di concentrazione di azoto totale.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

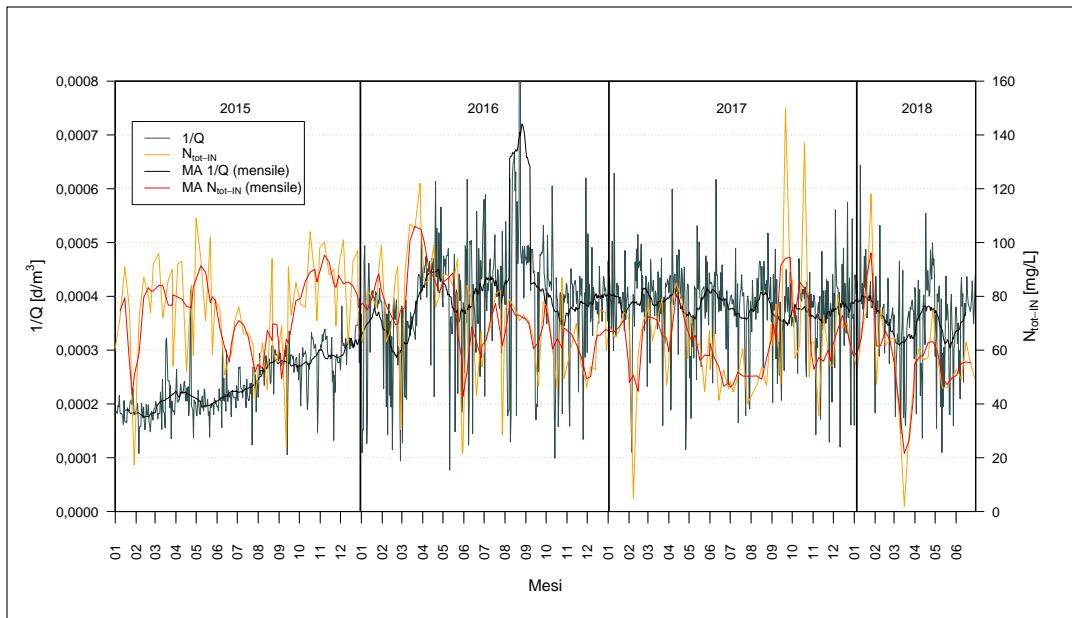


Figura 5.1.10: Andamento della concentrazione in ingresso di azoto totale e dell'inverso della portata giornaliera

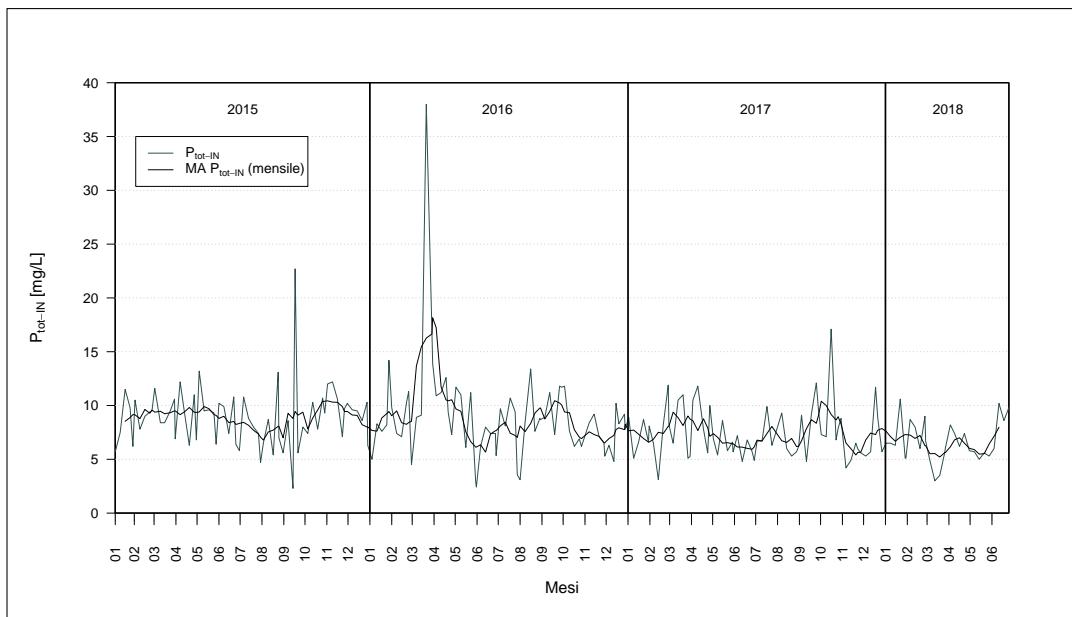


Figura 5.1.11: Andamento della concentrazione in ingresso di fosforo totale

In Figura 5.1.11 sono mostrate le oscillazioni della concentrazione di fosforo totale in ingresso all'impianto. Poiché i dati in esame frequentemente si avvicinano o superano i 10 mg/L (liquame fortemente concentrato), sempre a

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

conferma di quanto già stabilito, è probabile che il liquame in arrivo all'impianto comprenda anche reflui di provenienza diversa da quella civile. Come per l'azoto, si osserva un trend leggermente decrescente.

Di seguito sono stati analizzati i valori dei rapporti tra le concentrazioni dei diversi inquinanti e sono stati confrontati con i valori di riferimento per un liquame urbano presentati in Tabella 3.2.

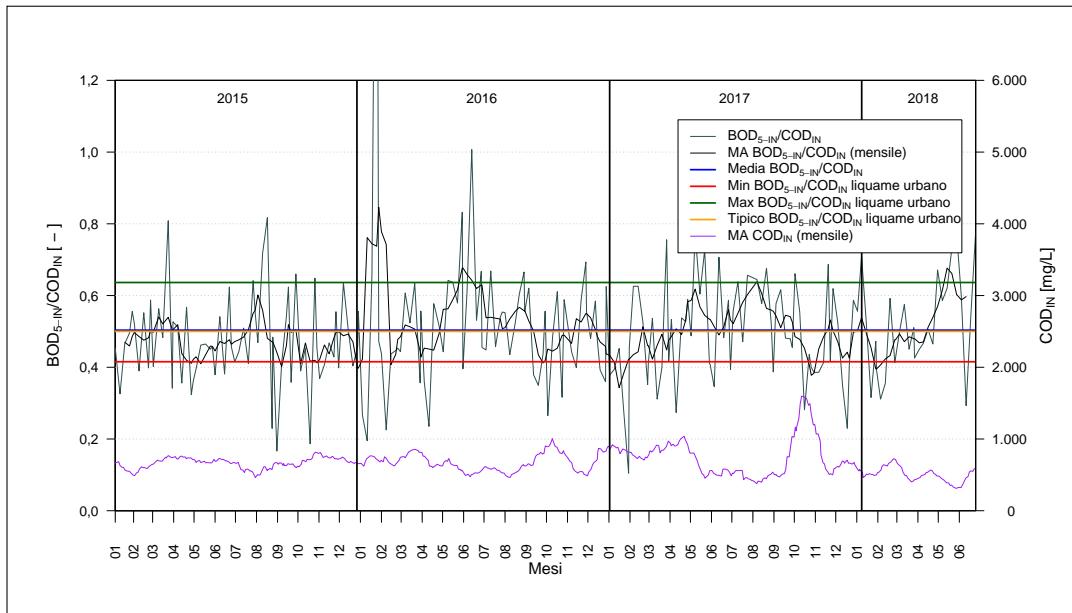


Figura 5.1.12: Andamento del rapporto tra BOD₅ e COD in ingresso

Il rapporto tra BOD₅ e COD è molto variabile anche se, confrontandolo con i valori di riferimento per un liquame urbano, si osserva che la media coincide con il valore tipico (0,5) e le oscillazioni sono, per la maggior parte, comprese tra il massimo e il minimo (Figura 5.1.12). L'andamento della media mobile permette di vedere con facilità che nei mesi estivi il rapporto aumenta e si individua quindi una periodicità. Se si osserva anche l'andamento del COD, si nota che, quando quest'ultimo cresce molto, il rapporto si abbassa. Ciò è una conferma di quanto affermato analizzando il grafico di Figura 5.1.3, ovvero che, quando il COD cresce in maniera significativa, il BOD₅ non segue tale andamento.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

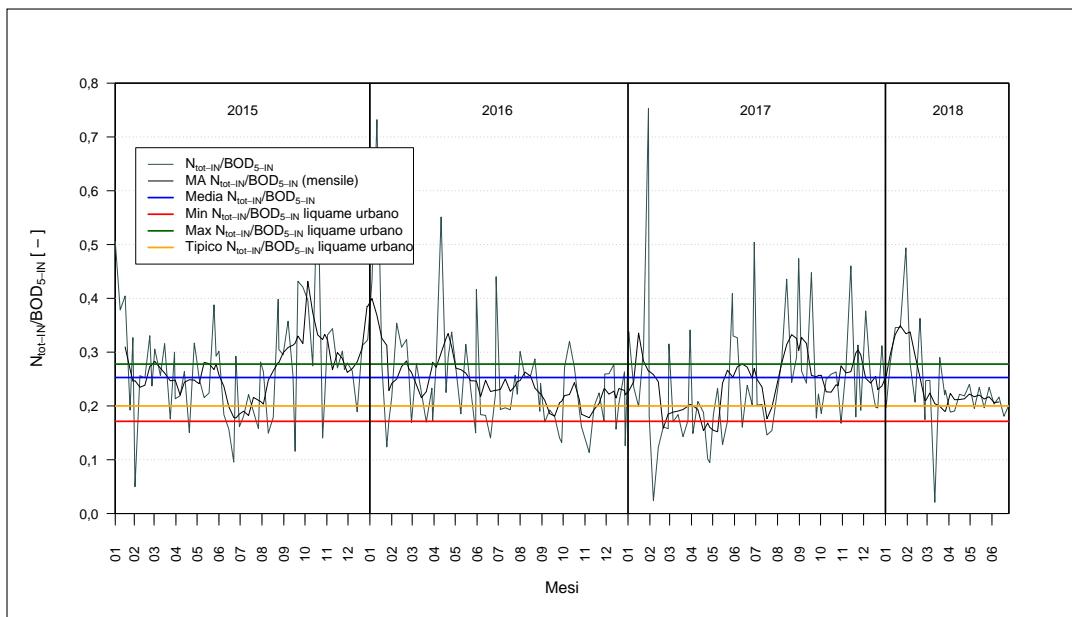
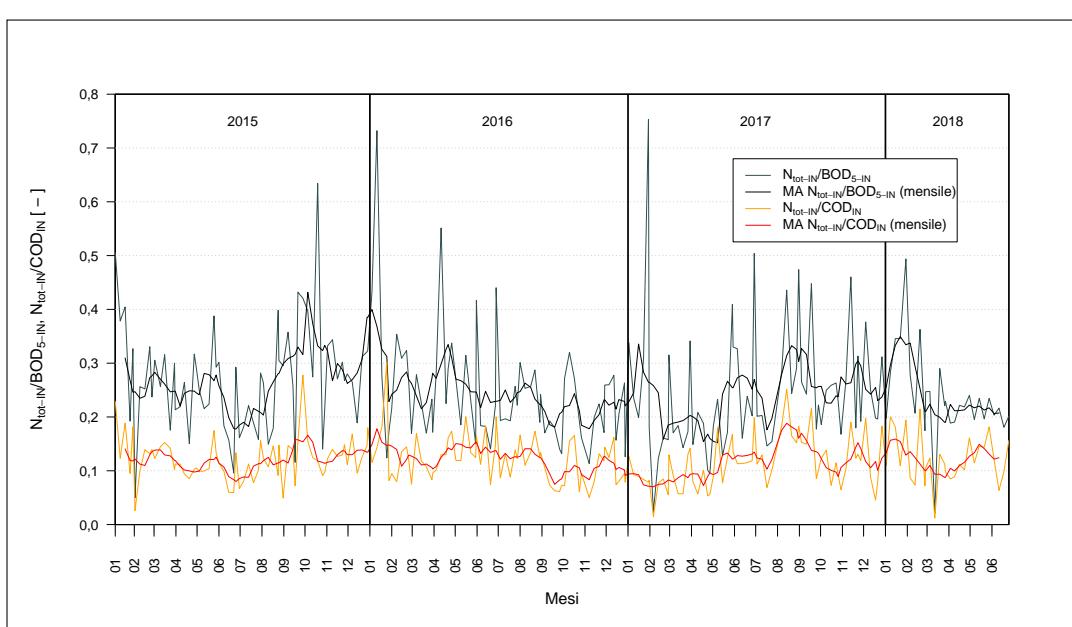
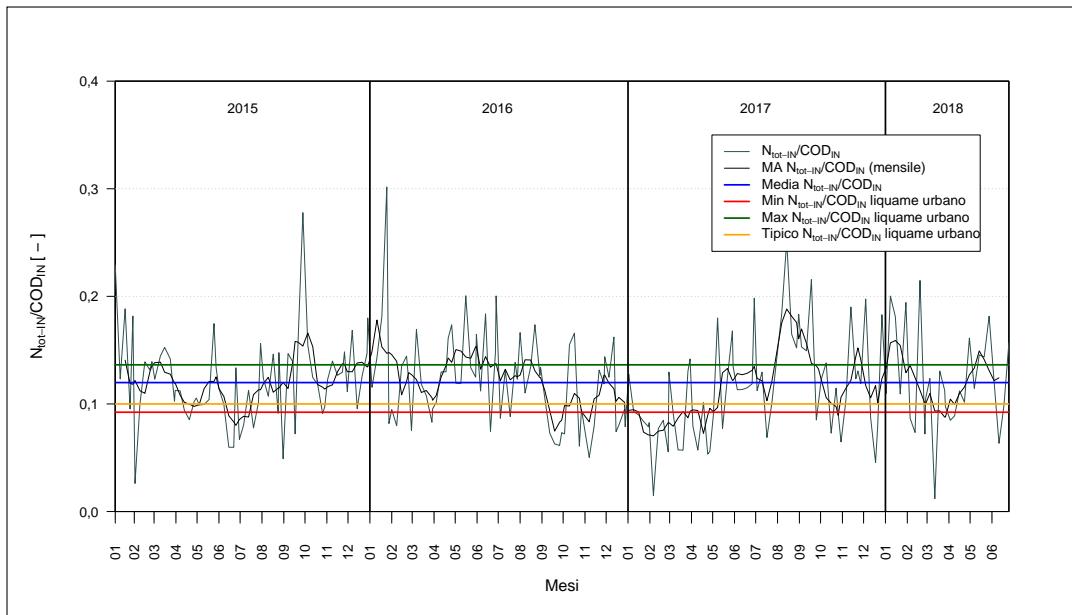


Figura 5.1.13: Andamento del rapporto tra azoto totale e BOD₅ in ingresso

Si ragioni ora sull'andamento dei rapporti tra azoto totale e BOD₅ e azoto totale e COD. Il rapporto N_{tot}/BOD₅ (Figura 5.1.13) è molto variabile e quindi non c'è correlazione tra le due grandezze. Con riferimento anche alla Figura 5.1.8 (N_{tot}) e alla Figura 5.1.3 (BOD₅), si riscontra che, essendo il BOD₅ variabile ma privo di particolari tendenze, i tratti crescenti degli anni 2015 e 2017 e il tratto decrescente del 2016 dipendono dalle variazioni di concentrazione dell'azoto totale. La media del rapporto si discosta dal valore 0,2, caratteristico di un liquame urbano, e in numerose occasioni si ha presenza di picchi che superano il valore massimo di riferimento. Ciò fa dedurre che all'impianto siano convogliati anche scarichi diversi.

Il rapporto N/COD (Figura 5.1.14) è variabile e ha un andamento affine a quello di N/BOD₅, come visibile nella Figura 5.1.15. Si verifica spesso il superamento sia del valore tipico che di quello massimo per reflui domestici e quindi, ancora una volta, si può ipotizzare la presenza di scarichi di diverso tipo.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI



CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

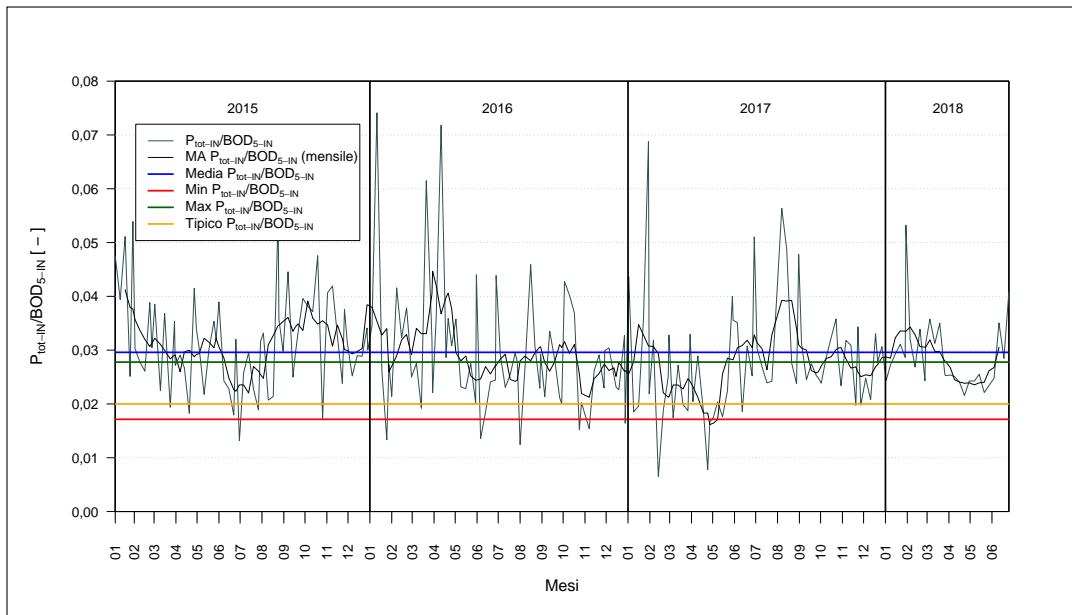


Figura 5.1.16: Andamento del rapporto tra fosforo totale e BOD_5 in ingresso

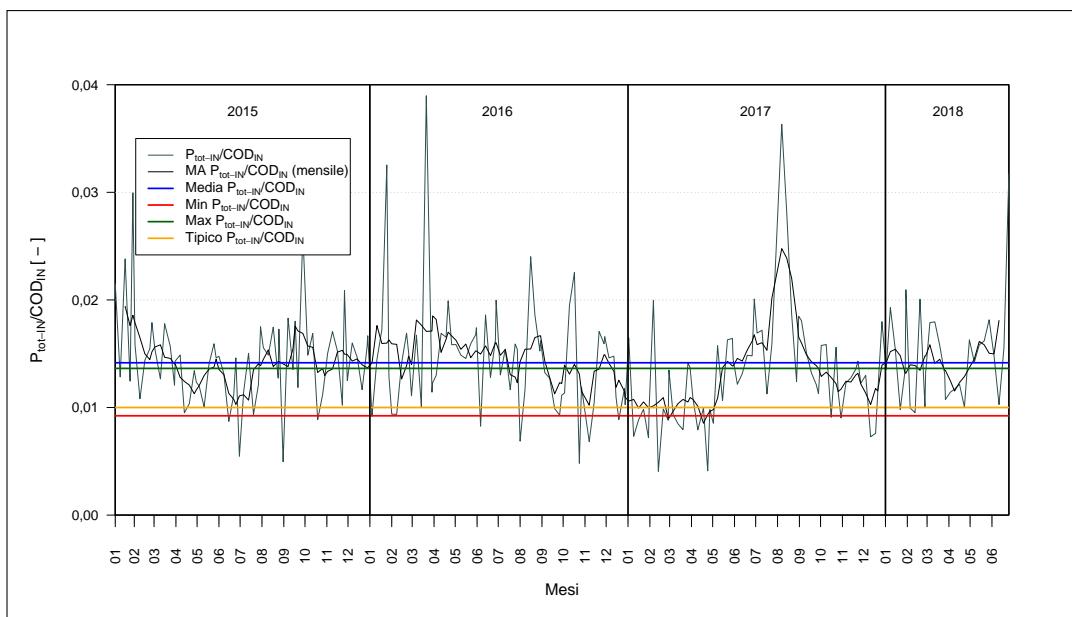


Figura 5.1.17: Andamento del rapporto tra fosforo totale e COD in ingresso

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

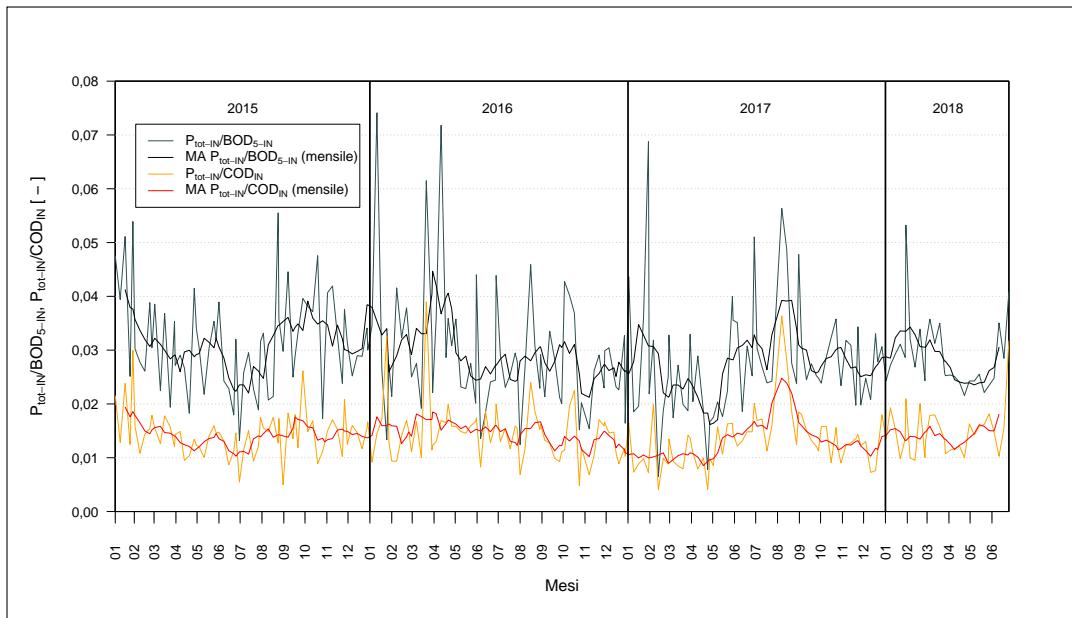


Figura 5.1.18: Andamento dei rapporti tra fosforo totale e BOD₅ e fosforo totale e COD in ingresso

Nel confronto del fosforo totale sia con il BOD₅ (Figura 5.1.16) che con il COD (Figura 5.1.17), la media del rapporto eccede il valore massimo per liquami urbani e ciò conferma quanto già osservato in precedenza relativamente alla presenza di scarichi aventi un'altra origine. Nel grafico di Figura 5.1.18 si vede che questi due rapporti sono correlati. L'andamento variabile, simile a quello osservato per i rapporti N_{tot}/BOD₅ e N_{tot}/COD (Figura 5.1.15), porta alla conclusione che non ci sia però correlazione tra la concentrazione di fosforo e quella di BOD₅ e COD.

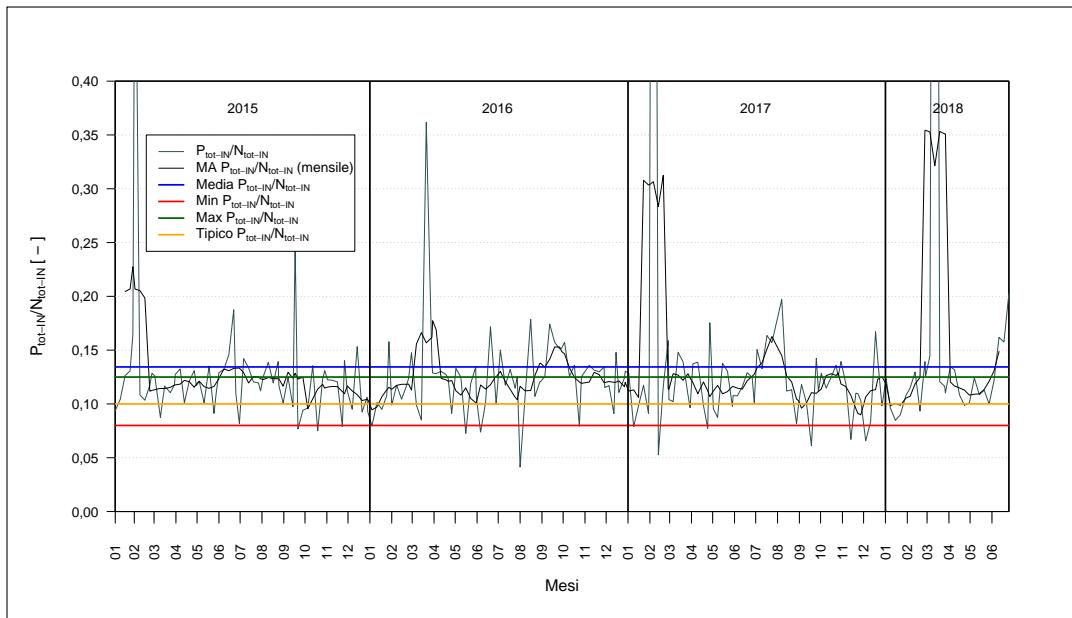


Figura 5.1.19: Andamento del rapporto tra fosforo totale e azoto totale in ingresso

L’andamento del rapporto tra fosforo totale e azoto totale in ingresso all’impianto di depurazione è riportato in Figura 5.1.19. Ad eccezione di alcuni valori estremi, tale rapporto ha un andamento pressappoco stabile, con media che supera il valore massimo atteso per un liquame urbano.

Rapporto	Media	Valore tipico
BOD ₅ /COD	0,50	0,50
N _{tot} /BOD ₅	0,25	0,20
N _{tot} /COD	0,12	0,10
P _{tot} /BOD	0,029	0,020
P _{tot} /COD	0,014	0,010
P _{tot} /N _{tot}	0,13	0,10

Tabella 5.2: Valori medi calcolati e valori tipici per un liquame urbano dei rapporti significativi tra le concentrazioni di inquinanti in ingresso

In Tabella 5.2 sono raccolti i valori medi dei rapporti calcolati e i rispettivi valori tipici per liquami urbani. Si osserva che le caratteristiche del liquame sono sbilanciate verso i nutrienti e in particolare verso il fosforo.

La concentrazione di carica batterica in termini di *Escherichia coli* è rappresentata in Figura 5.1.20. Si nota una certa variabilità e sembra si manifesti un trend leggermente crescente.

Il grafico di Figura 5.1.21 riporta l’andamento del pH del liquame in ingresso. Nel caso in esame, il valore medio è pari a 7,7 e, in alcuni periodi,

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

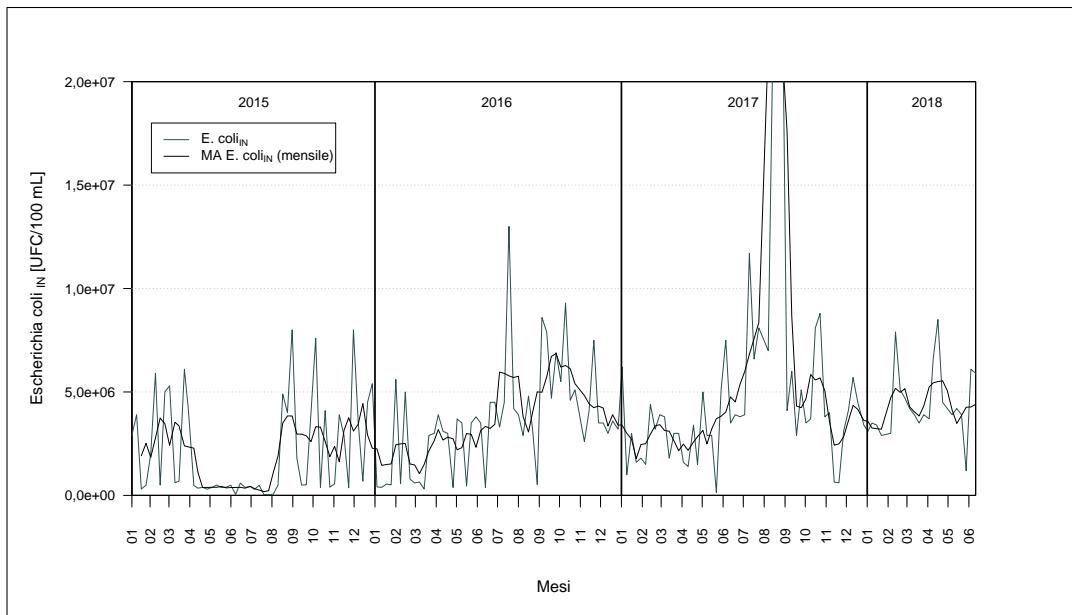


Figura 5.1.20: Andamento della concentrazione in ingresso di *Escherichia coli*

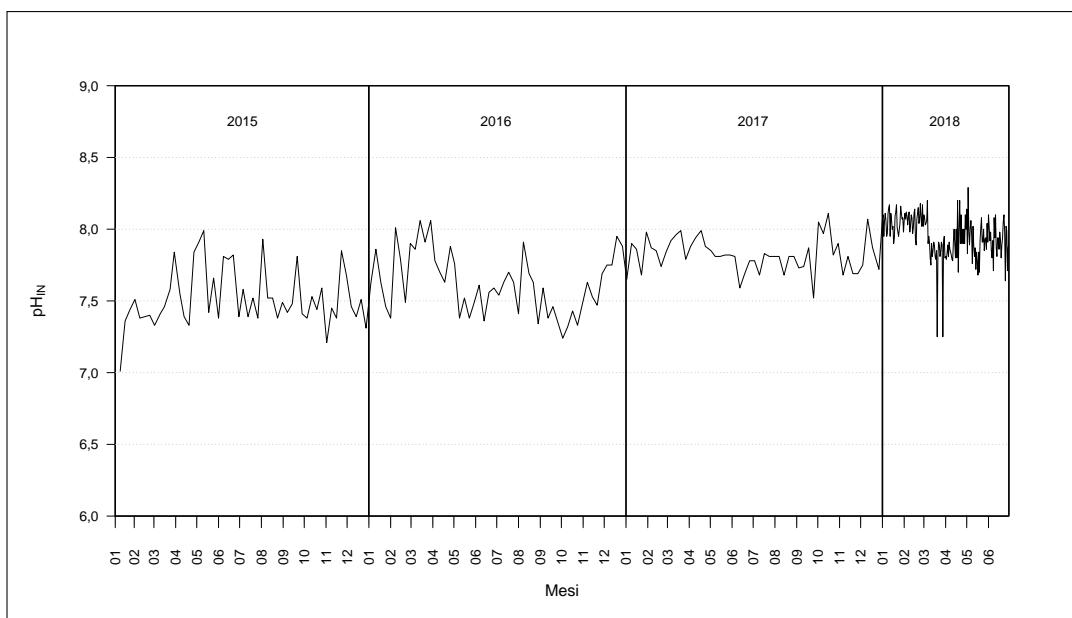


Figura 5.1.21: Andamento del pH del liquame in ingresso

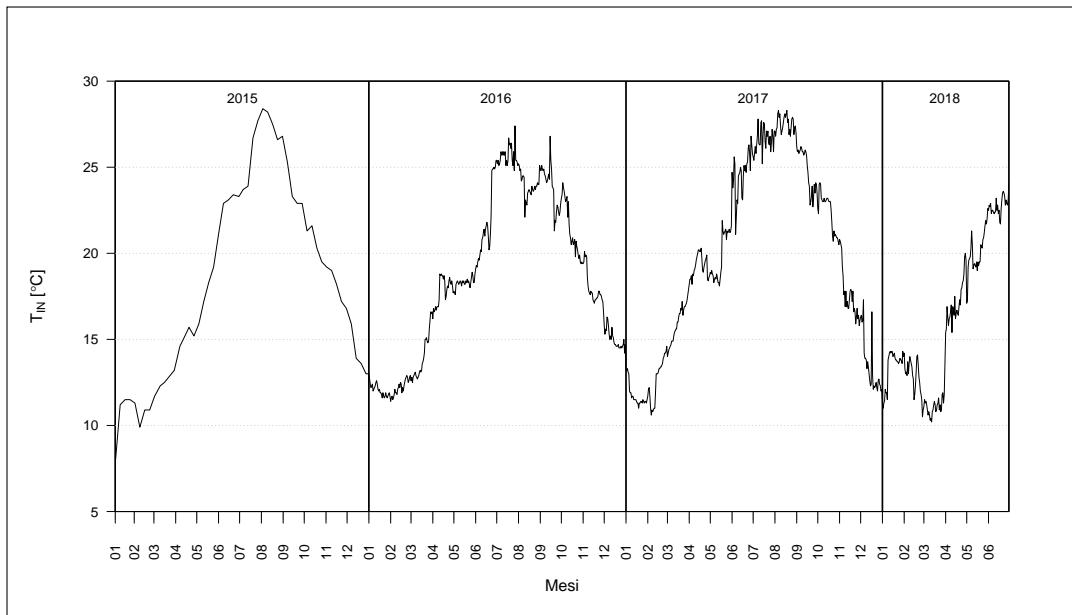


Figura 5.1.22: Andamento della temperatura del liquame in ingresso

si supera il valore 8. Questo comportamento potrebbe derivare da variazioni delle caratteristiche degli scarichi non domestici in fognatura. A partire dalla seconda metà del 2016, si nota un trend crescente.

Le oscillazioni della temperatura del refluo in ingresso ricalcano l'andamento previsto dall'alternarsi delle stagioni dell'anno (Figura 5.1.22). Si osservano valori minimi di poco superiori ai 10°C e valori massimi attorno ai 26-28°C.

5.1.1.1.2 Carichi inquinanti A partire dai dati di concentrazione e da quelli di portata è stato possibile calcolare i carichi degli inquinanti in ingresso all'impianto (per il calcolo, si veda la sottosezione 3.2.3).

L'andamento dei carichi di BOD_5 e di COD (Figura 5.1.23 e Figura 5.1.24) presenta un tratto decrescente in corrispondenza dell'anno 2015, come si osservava anche per la portata, ma attenuato dall'assenza di trend per le concentrazioni di BOD_5 e COD. Risulta esserci, inoltre, una certa corrispondenza tra picchi di concentrazione e picchi di carico. Si nota che i carichi di COD e di BOD_5 assumono valori più bassi nei periodi estivi, ovvero quando le temperature sono più alte, e aumentano, invece, quando le temperature si abbassano.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

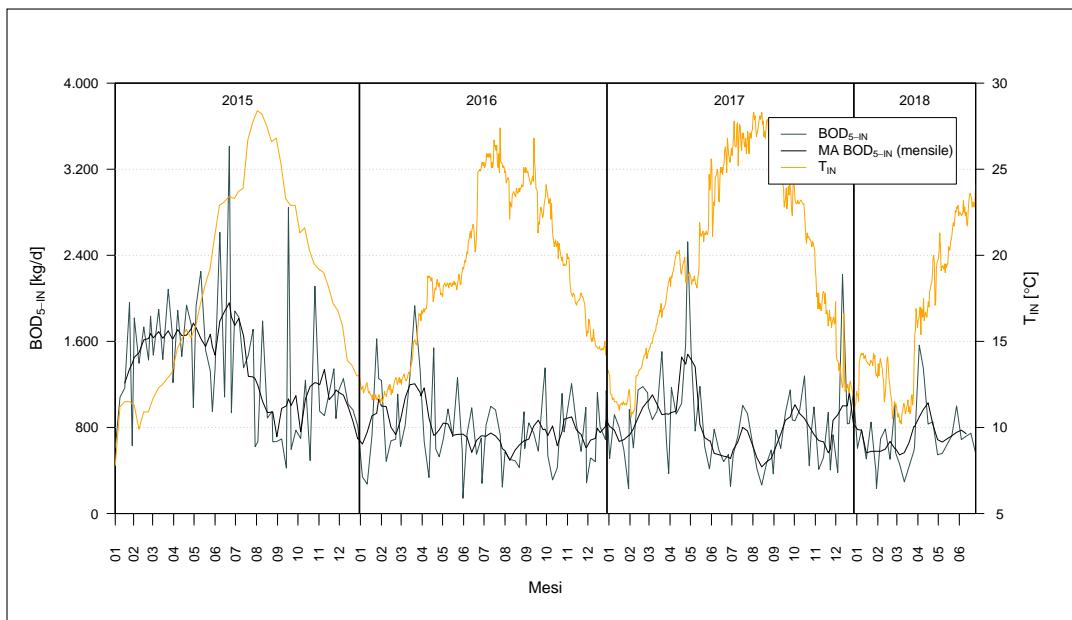


Figura 5.1.23: Andamento del carico in ingresso di BOD_5 e della temperatura del liquame in ingresso

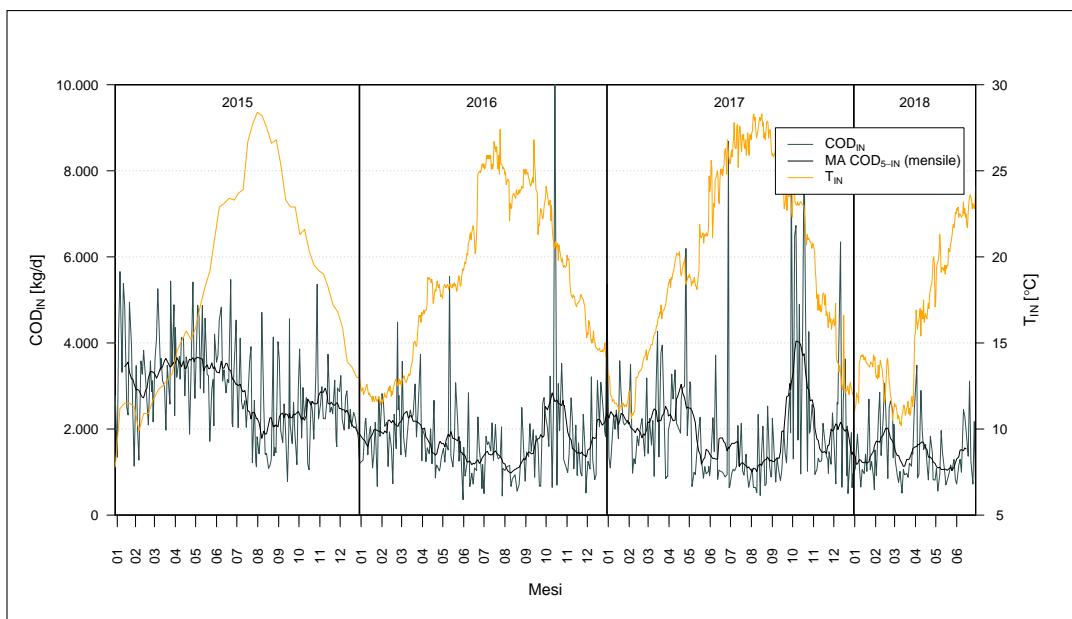


Figura 5.1.24: Andamento del carico in ingresso di COD e della temperatura del liquame in ingresso

La Figura 5.1.25 mostra la distribuzione di frequenza dei carichi di COD e di BOD_5 e i percentili 90°, 75° e 50° considerando il periodo complessivo

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

2015 - 2018. Se, invece, si esclude l'anno 2015 (poiché, come già spiegato, ha un comportamento anomalo), la distribuzione di frequenza diventa quella di Figura 5.1.26.

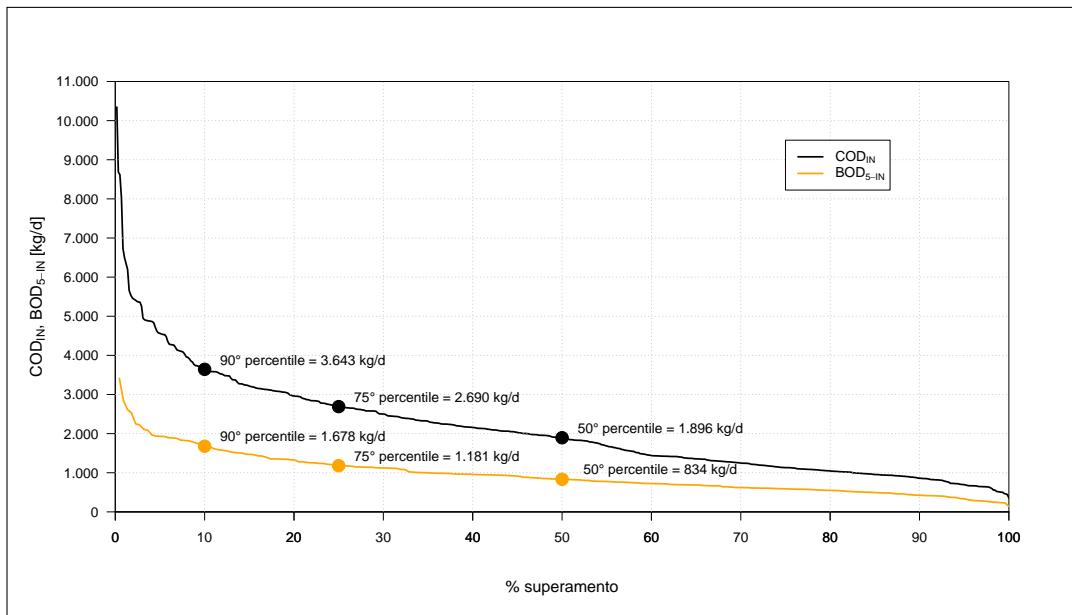


Figura 5.1.25: Distribuzione di frequenza dei carichi giornalieri in ingresso di COD e di BOD₅, periodo 2015 - 2018

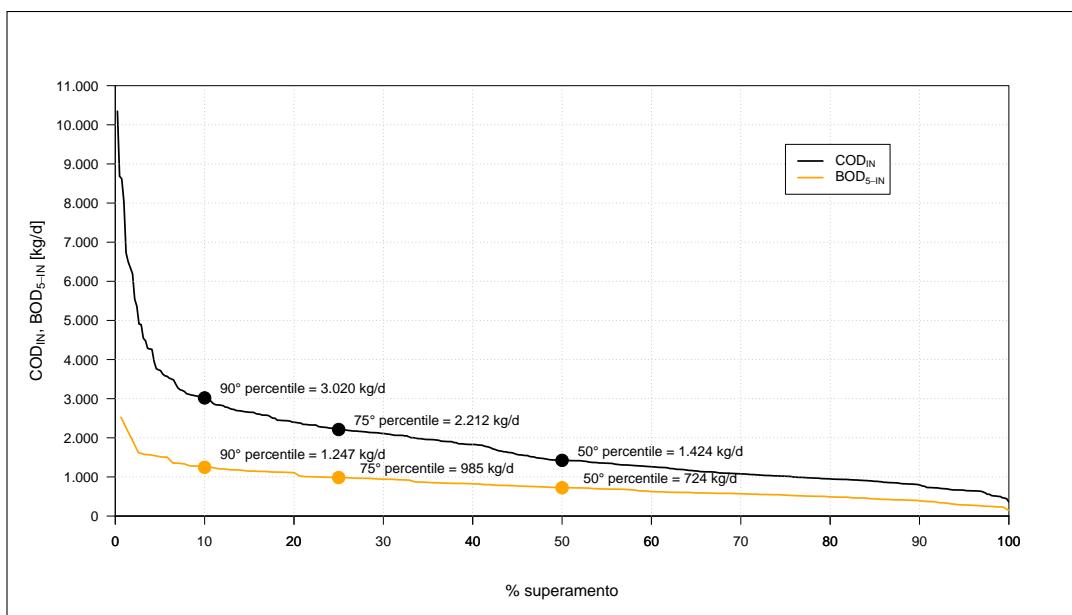


Figura 5.1.26: Distribuzione di frequenza dei carichi giornalieri in ingresso di COD e di BOD₅, periodo 2016 - 2018

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

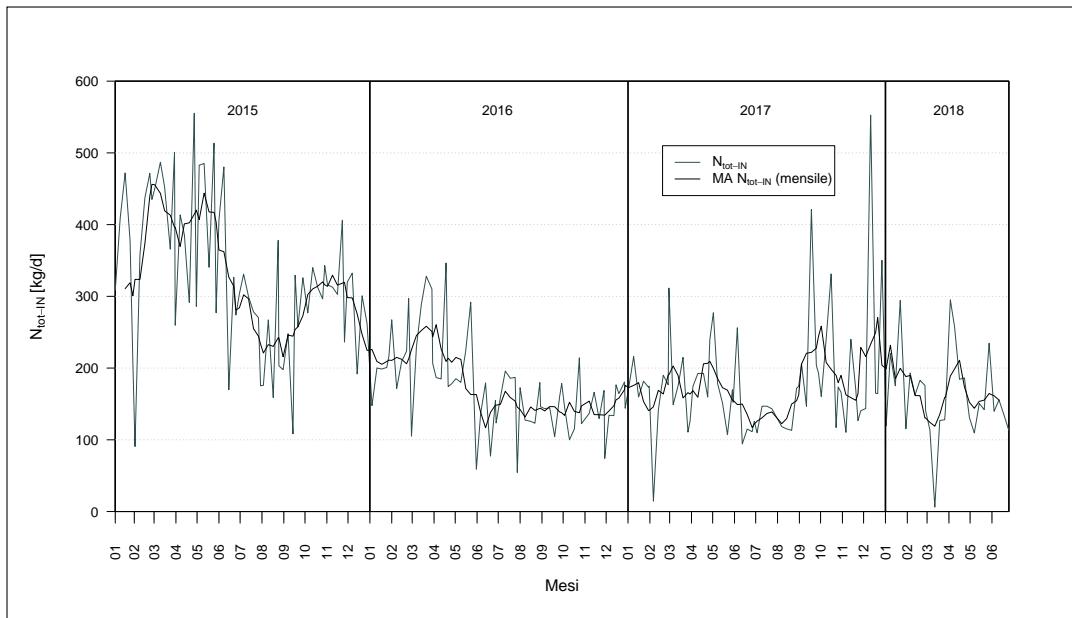


Figura 5.1.27: Andamento del carico in ingresso di azoto totale

Il carico di azoto totale e quello di fosforo totale esibiscono un andamento marcatamente decrescente fino a metà 2016 mentre, successivamente, si assestano (Figura 5.1.27 e Figura 5.1.28).

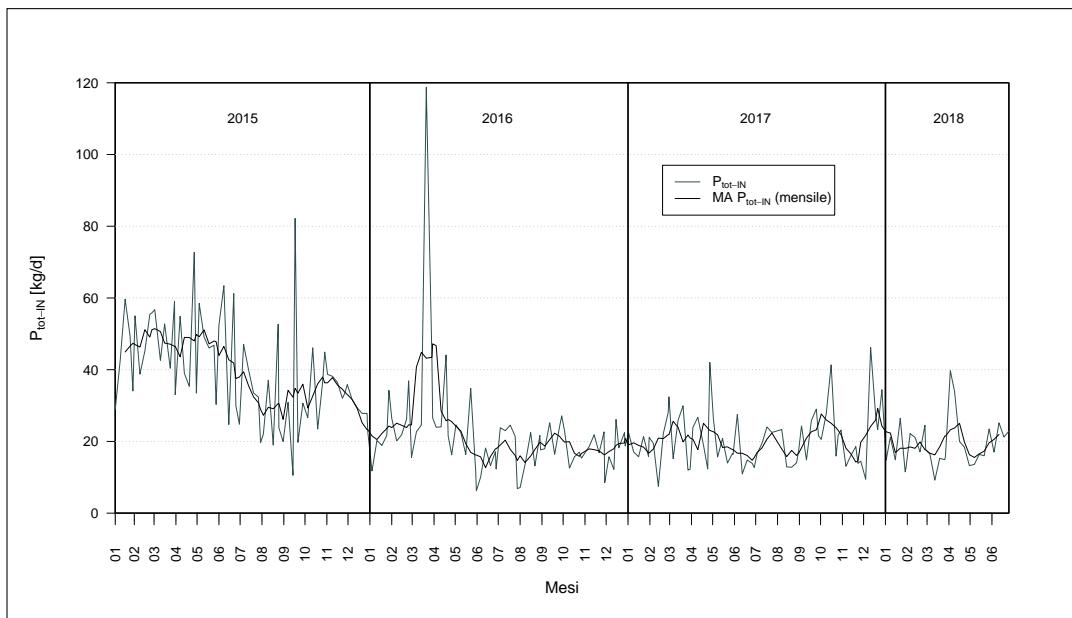


Figura 5.1.28: Andamento del carico in ingresso di fosforo totale

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

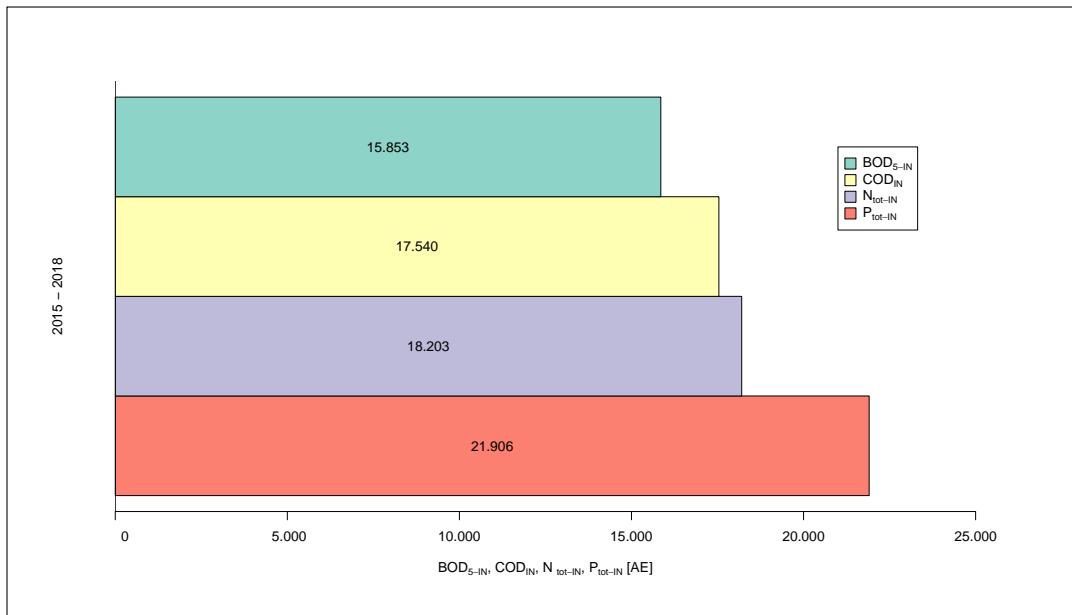


Figura 5.1.29: Carichi medi in ingresso di BOD₅ (60 g ab⁻¹ d⁻¹), COD (120 g ab⁻¹ d⁻¹), azoto totale (12 g ab⁻¹ d⁻¹) e fosforo totale (1,2 g ab⁻¹ d⁻¹), espressi in abitanti equivalenti, calcolati sull'intero periodo 2015 - 2018

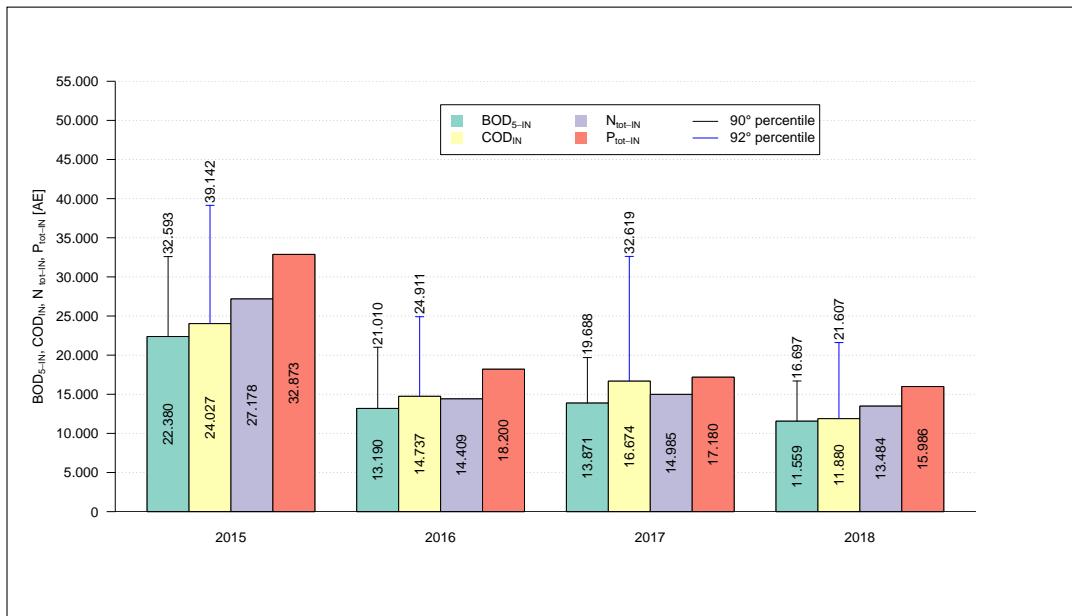


Figura 5.1.30: Carichi medi annui in ingresso di BOD₅ (60 g ab⁻¹ d⁻¹), COD (120 g ab⁻¹ d⁻¹), azoto totale (12 g ab⁻¹ d⁻¹) e fosforo totale (1,2 g ab⁻¹ d⁻¹), espressi in abitanti equivalenti, calcolati per ciascun anno

Per l'intero periodo considerato e per ciascun anno, secondo quanto indicato nella sottosezione 3.2.3, sono stati calcolati i carichi medi annui di BOD_5 , COD, azoto totale e fosforo totale espressi in abitanti equivalenti (Figura 5.1.29 e Figura 5.1.30). I carichi medi annui sono ben al di sotto della potenzialità di progetto (30.000 AE), che risulta anche quasi sempre compatibile con i valori del 90° percentile per il BOD_5 e del 92° percentile per il COD (non si considera l'anno 2015 perché la sua portata esibisce un comportamento anomalo). Si sono considerati proprio questi due percentili perché, in base a quanto spiegato nella sezione 3.4, è consentito eccedere la potenzialità di progetto nel 10% dei giorni per il BOD_5 e nell'8% per il COD².

5.1.1.2 Caratteristiche dell'effluente

I limiti di legge che devono essere rispettati dall'effluente sono stati indicati in Tabella 1.1.

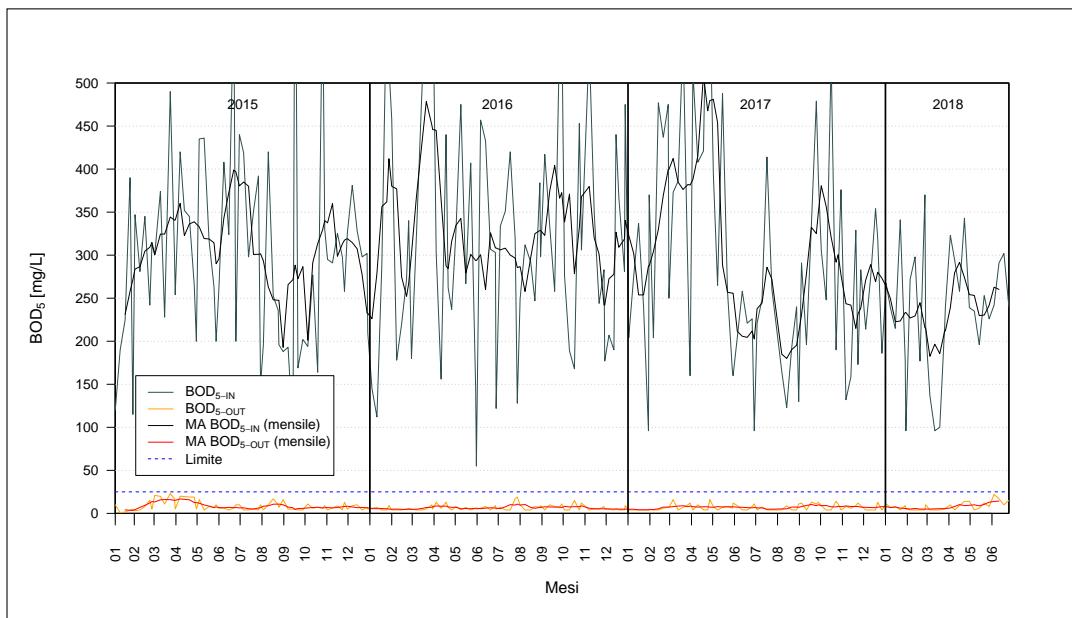


Figura 5.1.31: Andamento delle concentrazioni di BOD_5 in ingresso e in uscita

5.1.1.2.1 Caratteristiche qualitative La Figura 5.1.31 rappresenta i valori di concentrazione di BOD_5 in ingresso e in uscita. Per tutto l'arco temporale esaminato, la concentrazione di BOD_5 in uscita rispetta il limite di 25

²Per l'anno 2018 si è stimato che, a fine anno, si avrà un numero di misurazioni doppio rispetto a quello conteggiato a fine giugno, assumendo che la media dei carichi sul primo semestre sia rappresentativa di quella annuale. Ovviamente questa analisi andrà ripetuta a fine anno, quando si sarà in possesso di tutti i dati.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

mg/L con ampio margine. Essa è pressoché costante (attorno a un valore medio di 6,9 mg/L), ad eccezione di alcuni picchi che si mantengono comunque al di sotto del limite.

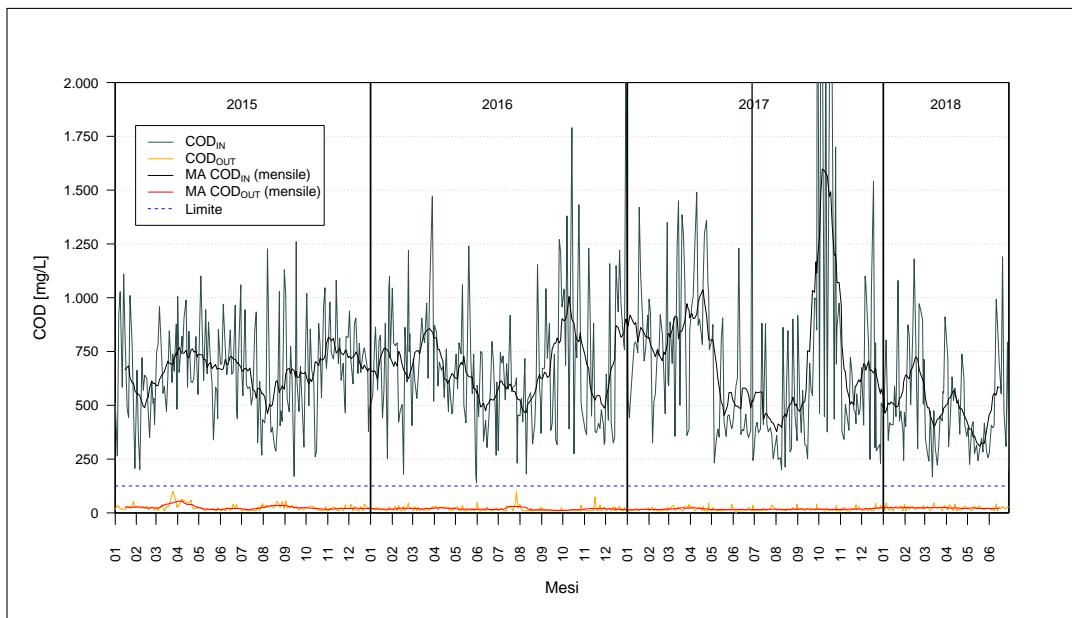


Figura 5.1.32: Andamento delle concentrazioni di COD in ingresso e in uscita

I valori di COD in ingresso e in uscita, invece, sono rappresentati in Figura 5.1.32. Per tutto il periodo esaminato, la concentrazione di COD in uscita rispetta il limite di 125 mg/L con ampio margine. Essa è pressoché costante (in media pari a 19,6 mg/L), soprattutto nel 2017 e nel 2018, nonostante ci sia un valore di COD in ingresso particolarmente elevato a fine 2017. Di conseguenza non si ha correlazione tra concentrazione in ingresso e concentrazione in uscita.

Durante l'intero arco temporale considerato, la concentrazione di SST in uscita rispetta il limite di 35 mg/L con ampio margine, ad eccezione di alcuni picchi che si mantengono comunque al di sotto del limite. Tale concentrazione è pressoché costante, in media circa 7,7 mg/L (Figura 5.1.33).

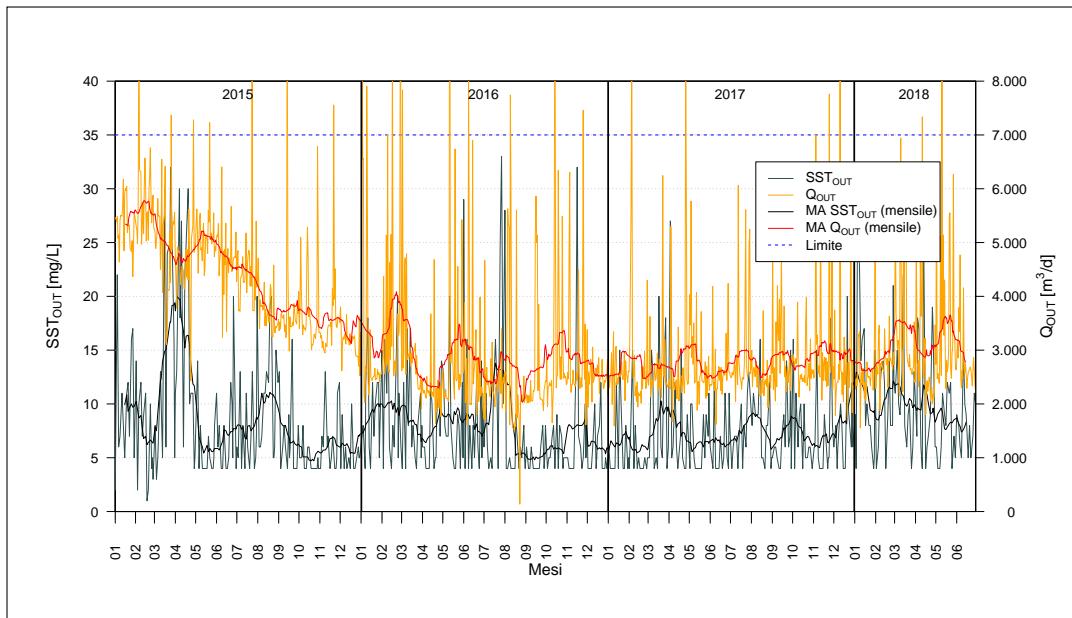


Figura 5.1.33: Andamento della concentrazione in uscita di SST e della portata effluente

L’andamento della concentrazione in uscita di SST può essere confrontato con la portata effluente al fine di valutare l’efficienza della sedimentazione finale. In alcuni intervalli temporali si riesce ad associare un incremento di concentrazione di SST a un aumento di portata. In ogni caso, la concentrazione di SST in uscita è sempre notevolmente inferiore al limite di legge e quindi l’eventuale effetto di trascinamento dei solidi sospesi, dovuto all’aumento della portata, non compromette la qualità dell’effluente.

Nel grafico di Figura 5.1.34 sono rappresentate le concentrazioni in ingresso e in uscita di azoto totale. Da questa rappresentazione si ricava un’idea generale dell’efficacia di rimozione complessiva dell’azoto che si può ritenere soddisfacente.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

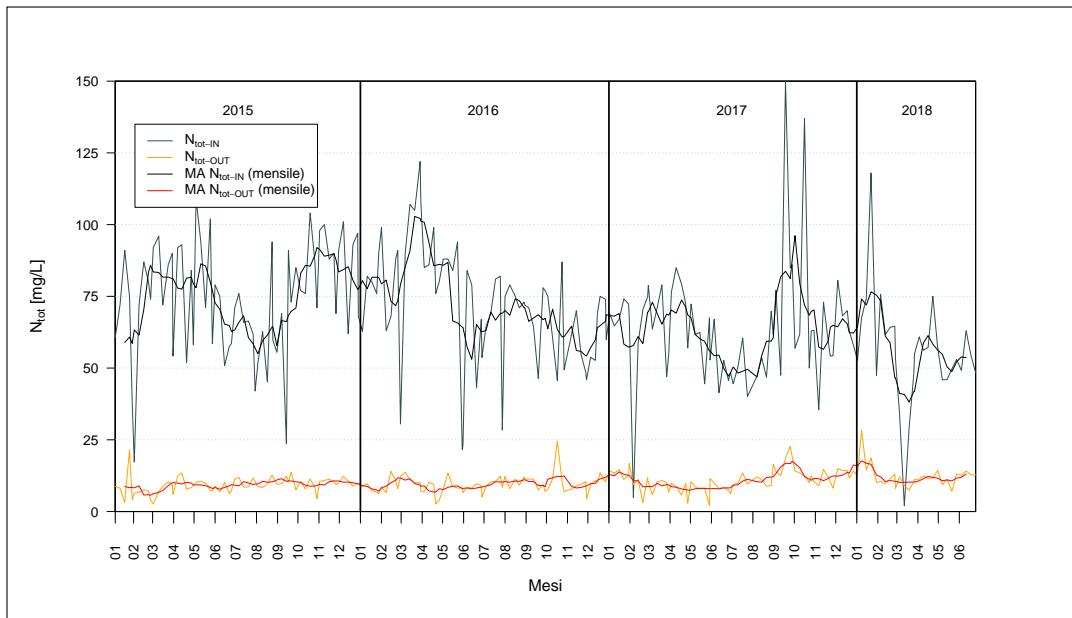


Figura 5.1.34: Andamento delle concentrazioni di azoto totale in ingresso e in uscita

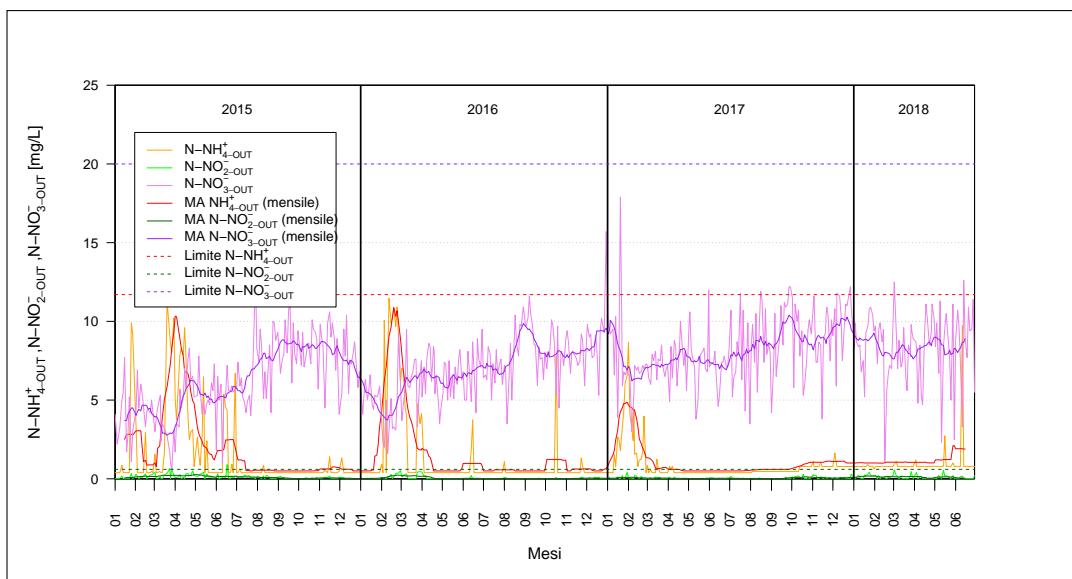


Figura 5.1.35: Andamento delle concentrazioni in uscita di azoto ammoniacale, azoto nitroso e azoto nitrico

Le concentrazioni in uscita di azoto ammoniacale ($N-NH_4^+$), azoto nitroso ($N-NO_2^-$) e azoto nitrico ($N-NO_3^-$), durante il periodo considerato, si mantengono al di sotto del proprio limite allo scarico (Figura 5.1.35). Si nota che, in

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

corrispondenza dei picchi di N-NH_4^+ , si hanno anche picchi di N-NO_2^- . Molto evidente è il drastico calo del rendimento di nitrificazione in alcuni periodi con bassa temperatura (si vedano i picchi di marzo-aprile 2015, febbraio 2016, febbraio 2017 e giugno 2018).

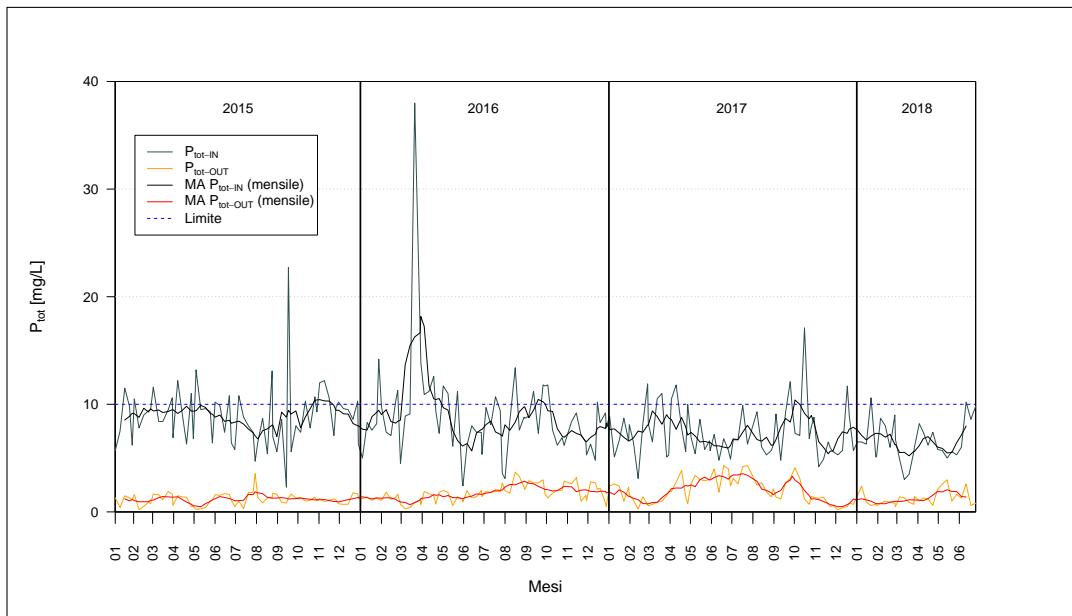


Figura 5.1.36: Andamento delle concentrazioni di fosforo totale in ingresso e in uscita

Nel grafico di Figura 5.1.36 sono rappresentate le concentrazioni di fosforo totale in ingresso e in uscita. Spesso la concentrazione di fosforo totale in ingresso è inferiore al limite allo scarico (10 mg/L) e, per l'intero arco temporale esaminato, la concentrazione in uscita rispetta tale limite con ampio margine.

Relativamente alla concentrazione in uscita di *Escherichia coli*, ad eccezione di pochi casi isolati, il limite di 5.000 UFC/100 mL, imposto per i periodi compresi tra aprile e settembre, è rispettato (Figura 5.1.37).

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

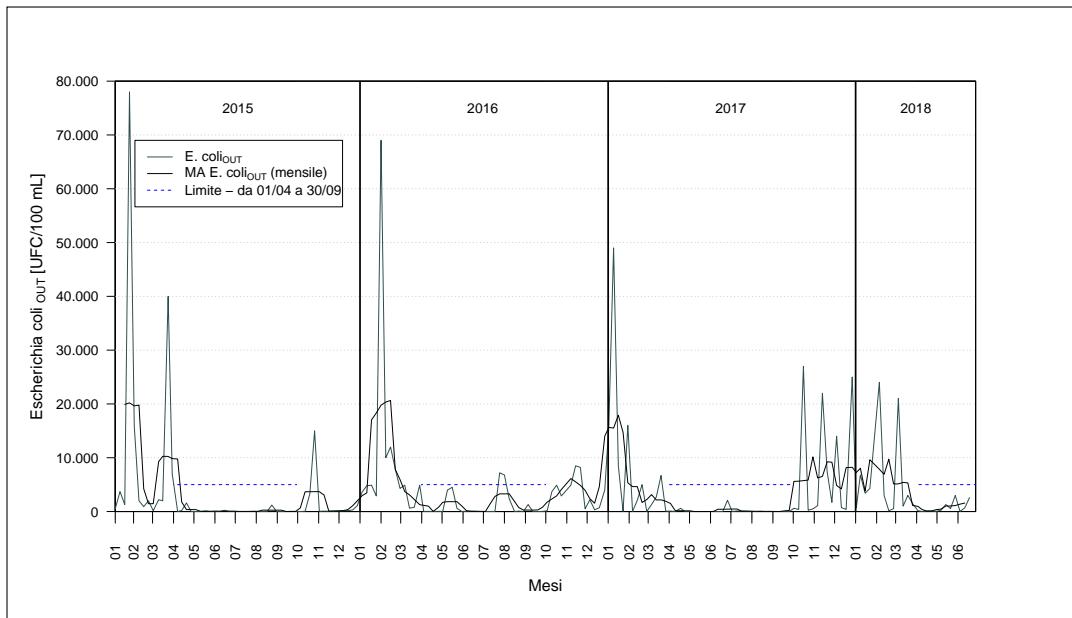


Figura 5.1.37: Andamento della concentrazione in uscita di *Escherichia coli*

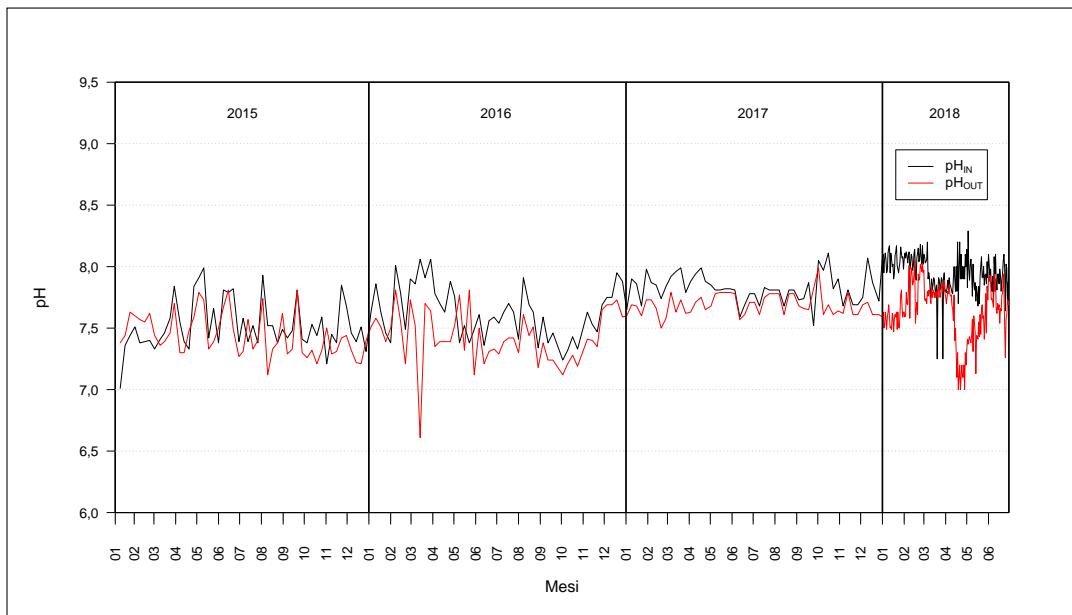


Figura 5.1.38: Andamento del pH del liquame in ingresso e in uscita

Successivamente si sono confrontati i valori di pH in ingresso e in uscita (Figura 5.1.38). Si nota che il pH in uscita è quasi sempre leggermente inferiore rispetto a quello in entrata. Esso tendenzialmente segue l'andamento dell'ingresso tranne a marzo 2017, da ottobre 2017 a febbraio 2018 (si ricorda

che attorno al mese di ottobre 2017 si era individuato un picco di COD che dipende da un probabile ingresso di un refluo di origine industriale) e tra aprile e maggio 2018.

La temperatura in uscita, invece, è praticamente invariata rispetto a quella in ingresso (Figura 5.1.39).

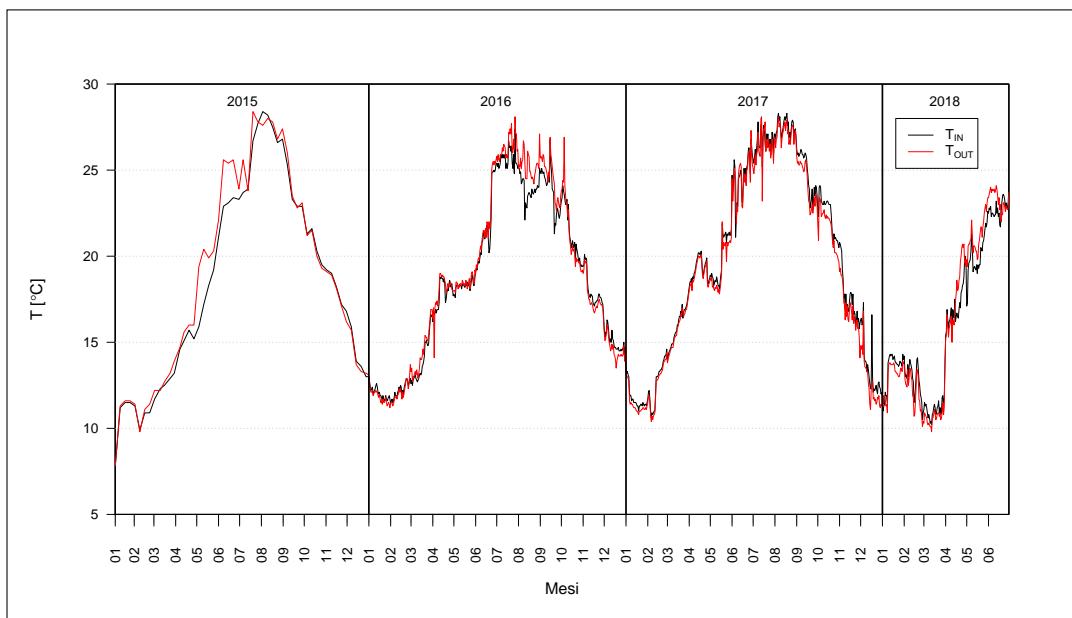


Figura 5.1.39: Andamento della temperatura del liquame in ingresso e in uscita

5.1.1.3 Prestazioni

I rendimenti di rimozione dei carichi inquinanti sono stati calcolati come spiegato nella sezione 3.3. Essi sono stati determinati per ciascun anno (Figura 5.1.40) e per il periodo complessivo in esame (Figura 5.1.41).

Al passare del tempo, i rendimenti di rimozione di BOD_5 e COD rimangono stabili e superiori al 95%. Nel caso dell'azoto, invece, la percentuale è in continua diminuzione. Il fosforo presenta un andamento simile ad esclusione dell'anno 2018, in cui si registra un miglioramento del rendimento che però non torna ad essere quello del 2015. L'efficacia dei processi di nitrificazione non manifesta grandi variazioni, ma si è già evidenziato che si presentano, occasionalmente, importanti episodi di mancata nitrificazione. Il rendimento dei processi di denitrificazione, invece, peggiora nel tempo.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

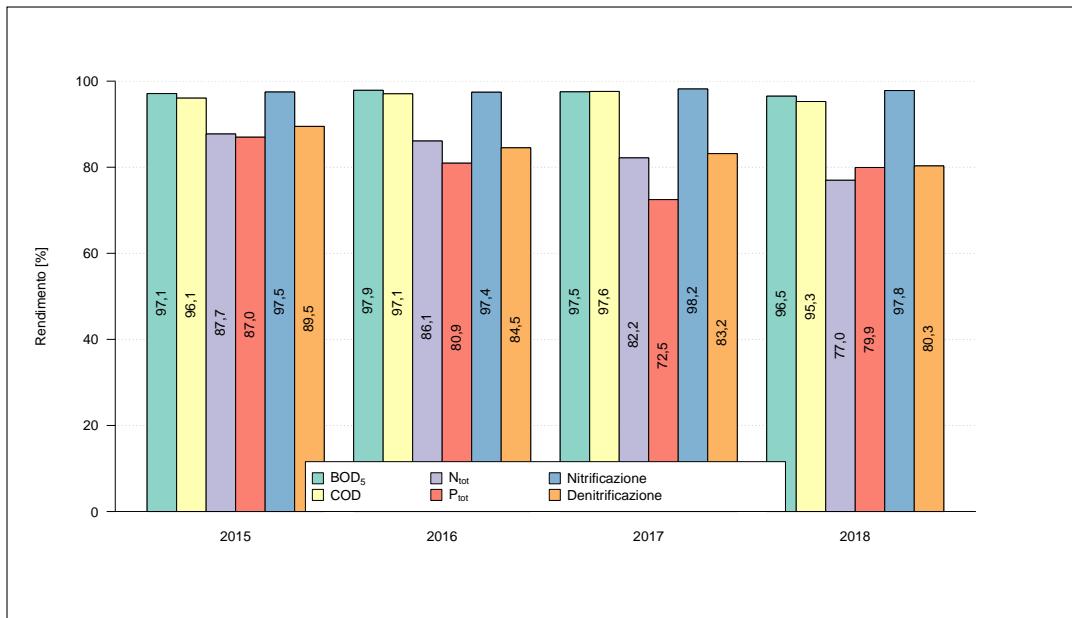


Figura 5.1.40: Rendimenti di rimozione su base annua

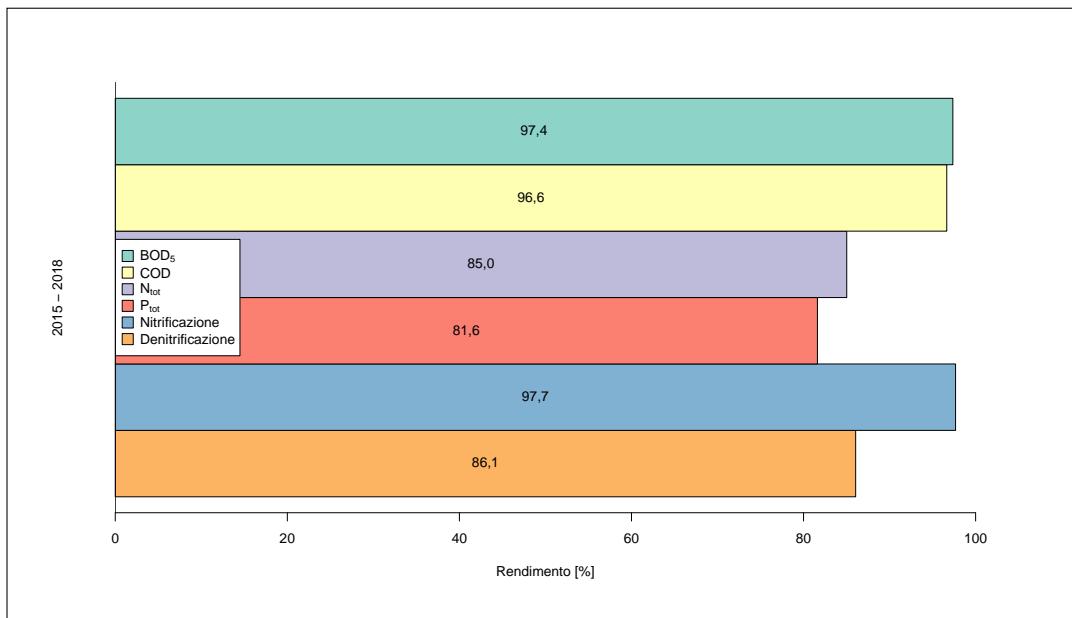


Figura 5.1.41: Rendimenti di rimozione complessivi per il periodo 2015 - 2018

5.1.1.4 Parametri operativi

La variabilità di concentrazione di SST nelle vasche di ossidazione è principalmente compresa tra 2 e 6 g/L, come mostrato in Figura 5.1.42. Le linee

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

1 e 2 sono caratterizzate da valori simili, mentre la linea 3 è maggiormente concentrata. Fatta eccezione per un periodo a cavallo degli anni 2017 e 2018, gli aumenti e le diminuzioni di concentrazione sono contemporanei in tutte le linee. Non sembra esserci, invece, correlazione con il carico in ingresso di COD. Si può scorgere inoltre, soprattutto per le linee 1 e 2, una periodicità.

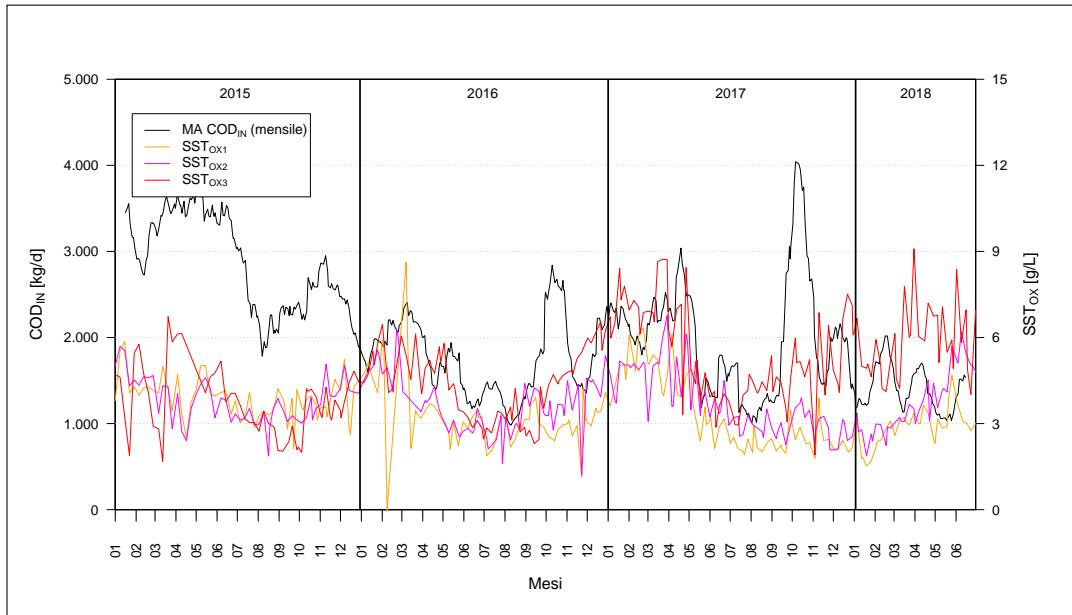


Figura 5.1.42: Andamento della concentrazione di SST nelle vasche di ossidazione e del carico in ingresso di COD

Anche nel caso del fango di ricircolo la concentrazione di SST è piuttosto oscillante (Figura 5.1.43). I tre andamenti sono perlopiù correlati e sono compresi tra 2 e 8 g/L. Se si confrontano tali valori con quelli delle vasche di ossidazione, si osserva che sono abbastanza bassi (generalmente le concentrazioni nel ricircolo sono circa il doppio di quelle nel comparto biologico).

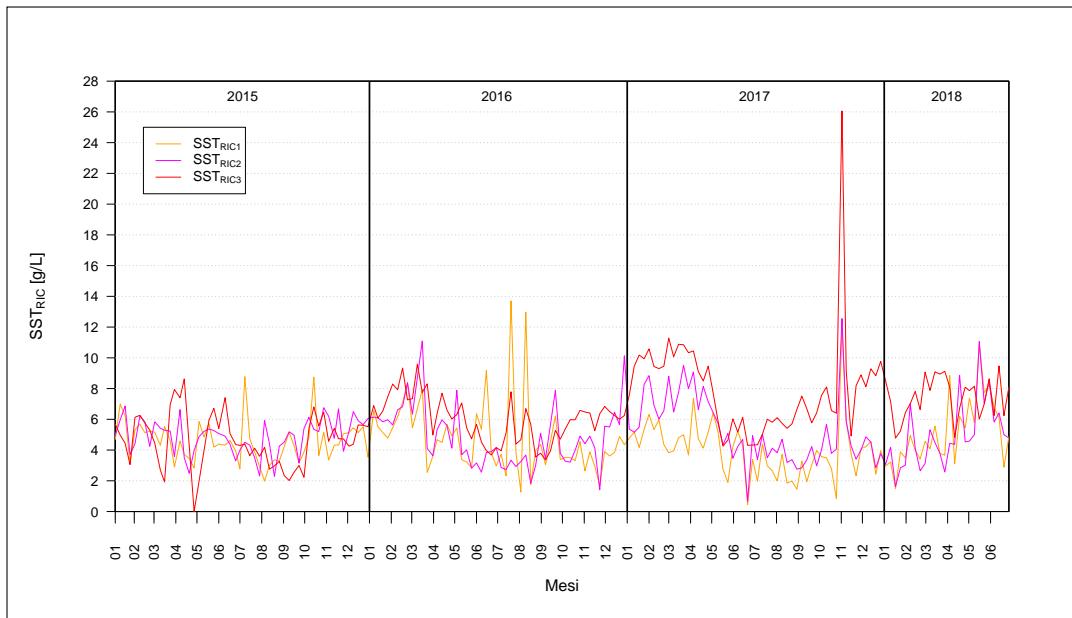


Figura 5.1.43: Andamento della concentrazione di SST nel fango di ricircolo

Relativamente al volume del fango, tutte le linee sono caratterizzate da un andamento simile e presentano una grande variabilità nel tempo da cui sembra essere individuabile una certa periodicità (Figura 5.1.44, Figura 5.1.45 e Figura 5.1.46), correlabile, come noto, alle condizioni di carico e temperatura. Nelle medesime figure, è rappresentato lo SVI che, nelle prime due linee, segue l'andamento dei SSS, mentre nella terza non segue le oscillazioni ma si mantiene abbastanza stabile. In tutte le linee, molto frequentemente, viene superato il valore di 150 mL/g, soglia indicativa per stabilire se le caratteristiche di sedimentabilità del fango sono accettabili. In realtà, il valore dello SVI potrebbe essere fortemente influenzato dal fatto che è stato calcolato a partire da un fango molto voluminoso e quindi i valori ottenuti non sono particolarmente significativi (sarebbe stato meglio determinarli tramite diluizione).

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

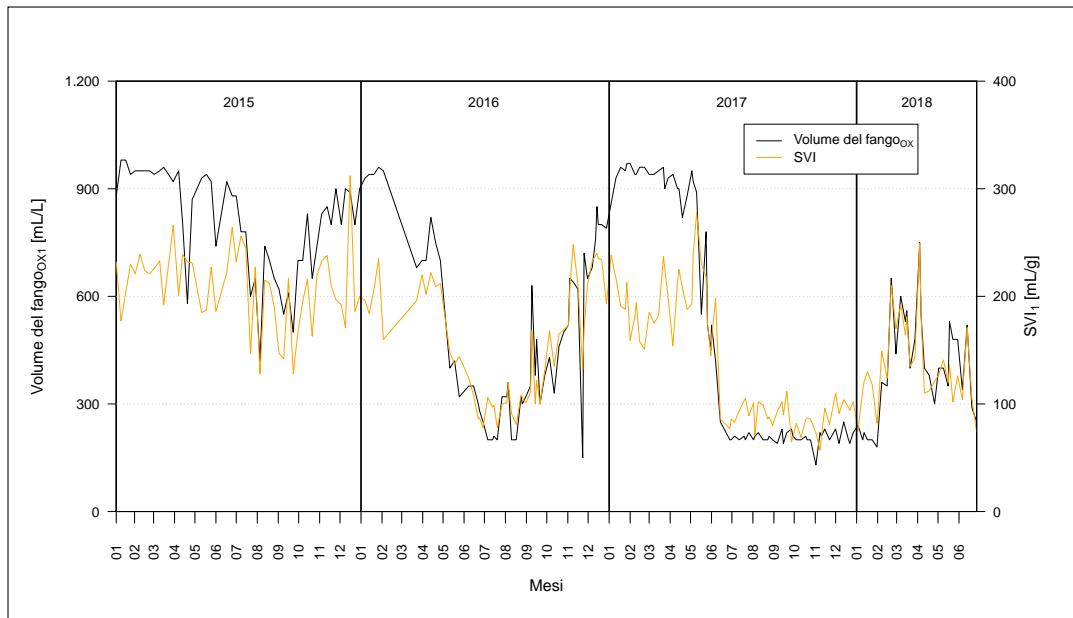


Figura 5.1.44: Andamento del volume del fango e dello SVI nella vasca di ossidazione della linea 1

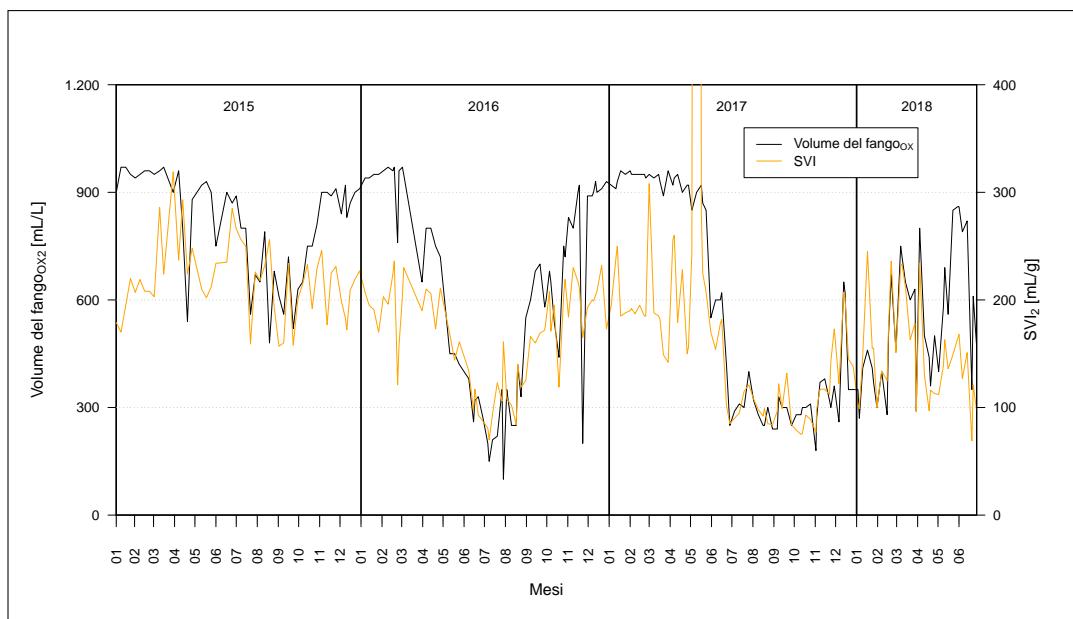


Figura 5.1.45: Andamento del volume del fango e dello SVI nella vasca di ossidazione della linea 2

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

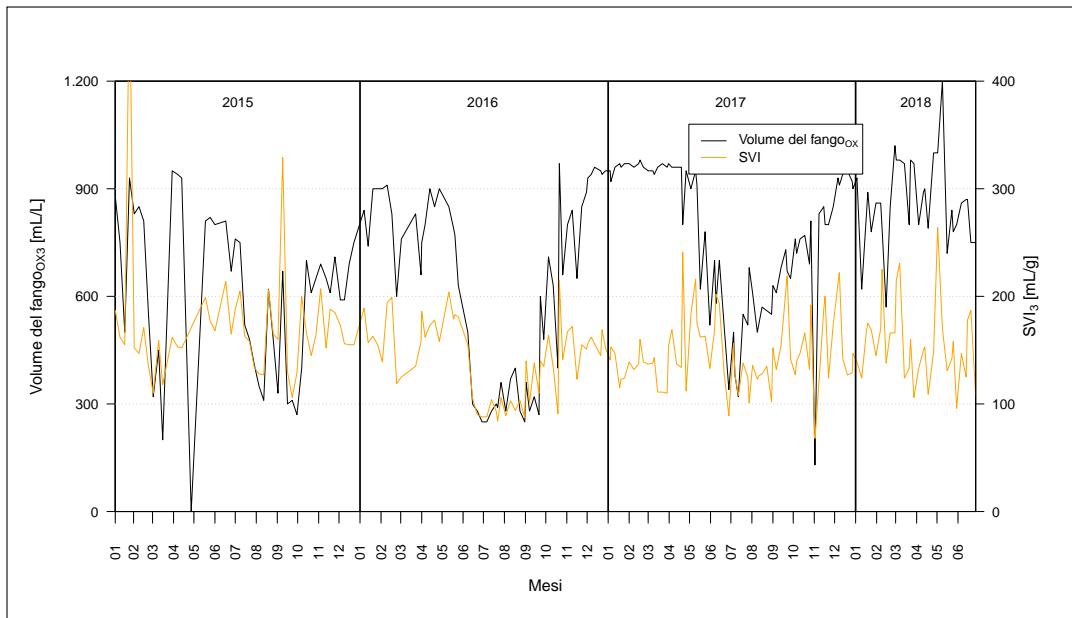


Figura 5.1.46: Andamento del volume del fango e dello SVI nella vasca di ossidazione della linea 3

La portata del fango di supero, rappresentata in Figura 5.1.47, è variabile e ha una tendenza decrescente nel tempo. Si precisa che i numerosi valori pari a 0 m³/d si hanno in corrispondenza di quei giorni in cui non si ha estrazione del fango di supero dal fondo del sedimentatore. In questo impianto non c'è un sistema di misurazione della portata di supero ma i valori derivano da una stima basata sul volume di riempimento della vasca e, quindi, sono affetti da notevole incertezza. Essa si propaga all'età del fango, per il calcolo della quale serve conoscere la portata del fango di supero.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

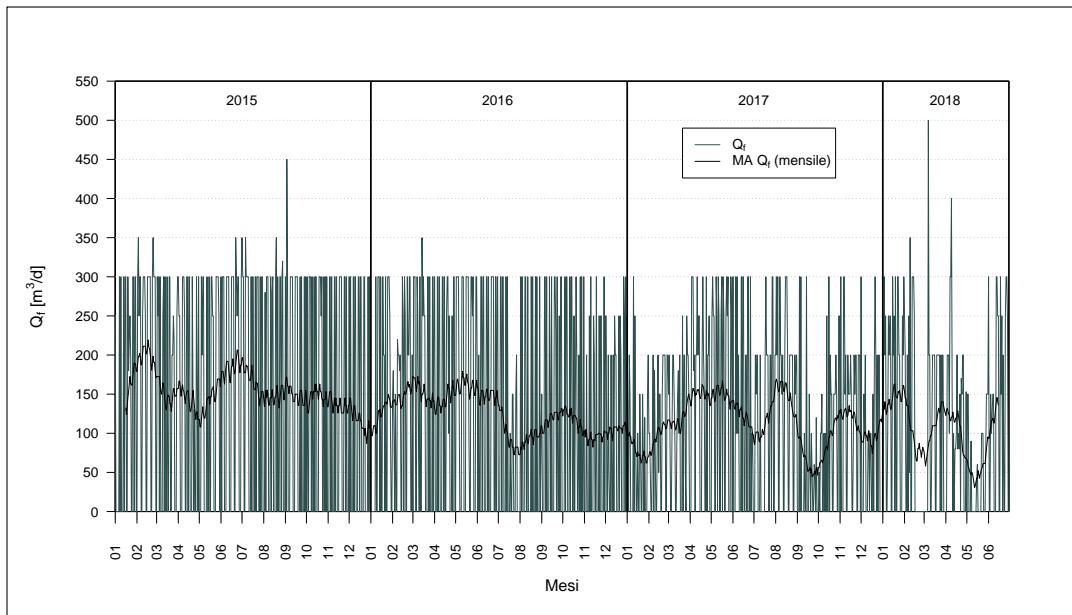


Figura 5.1.47: Andamento della portata del fango di supero

Il carico del fango è generalmente basso (con media pari a $0,09 \text{ d}^{-1}$) ed è quindi favorita la nitrificazione (Figura 5.1.48).

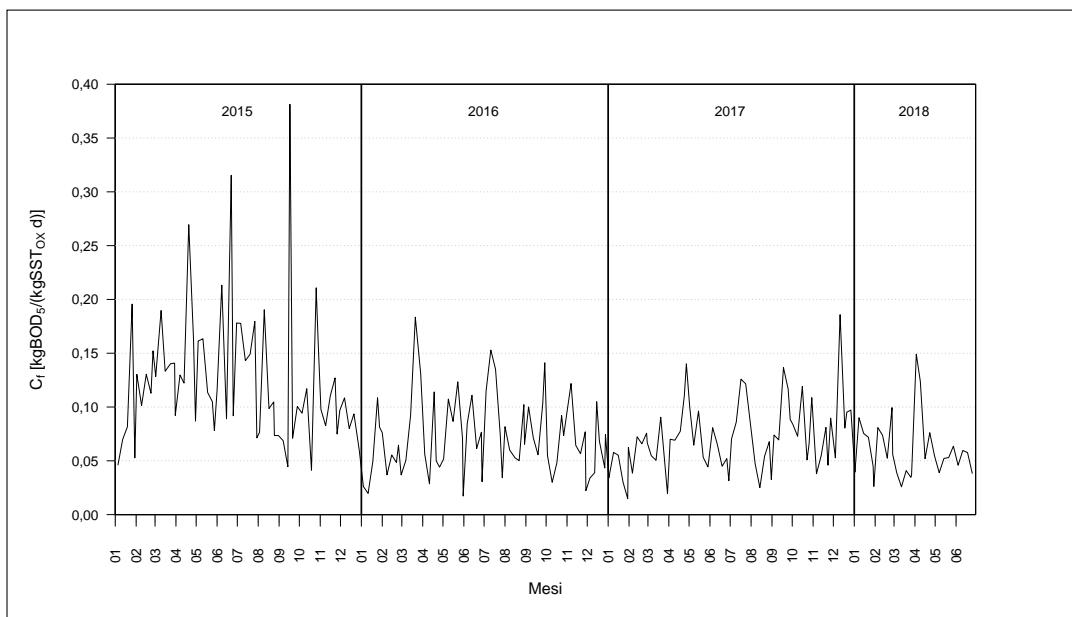


Figura 5.1.48: Andamento del carico del fango

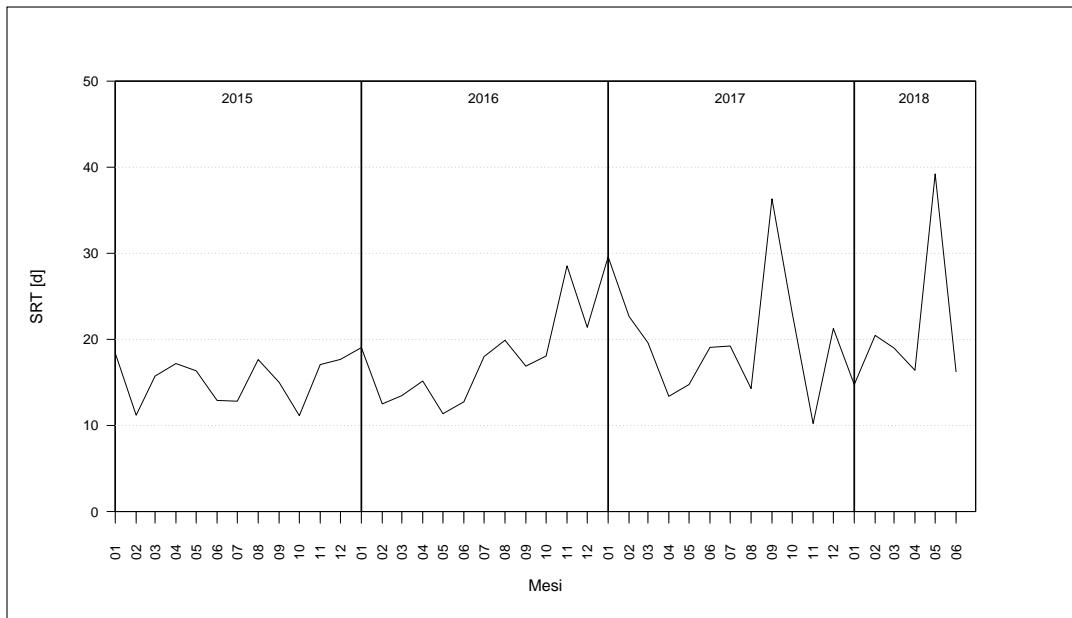


Figura 5.1.49: Andamento dell'età del fango (SRT)

L'età del fango, mostrata in Figura 5.1.49, è variabile attorno a un valore medio di circa 18 giorni e quindi è possibile ottenere la completa rimozione dell'azoto per mezzo dei processi di nitrificazione e denitrificazione. Si può osservare un andamento crescente nel tempo.

La concentrazione di ossigeno dissolto nelle vasche di ossidazione delle linee 1 e 2 è piuttosto variabile da valori molto prossimi allo 0 fino a valori di saturazione (Figura 5.1.50). Da ottobre 2017 a giugno 2018 l'andamento è quello atteso in relazione alla temperatura, ovvero cresce nei mesi invernali e decresce via via che le temperature aumentano in primavera ed estate. Nel resto del 2017, invece, non si individua questo tipo di corrispondenza (ad esempio, a luglio e agosto si hanno concentrazioni maggiori di quelle di febbraio).

Nella linea 3, invece, la concentrazione di ossigeno dissolto in vasca di ossidazione è meno variabile, seppur in maniera ancora importante, ed è principalmente compresa tra 2,5 e 7,5 mg/L, senza mostrare un andamento dipendente dalla temperatura. A maggio e giugno 2018 si evidenzia un trend marcatoamente crescente (Figura 5.1.51). Il set point di 2 mg/L si tiene in poche casi poiché i compressori sono sovradimensionati e, di conseguenza, anche quando sono regolati al minimo, insufflano più aria del necessario.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

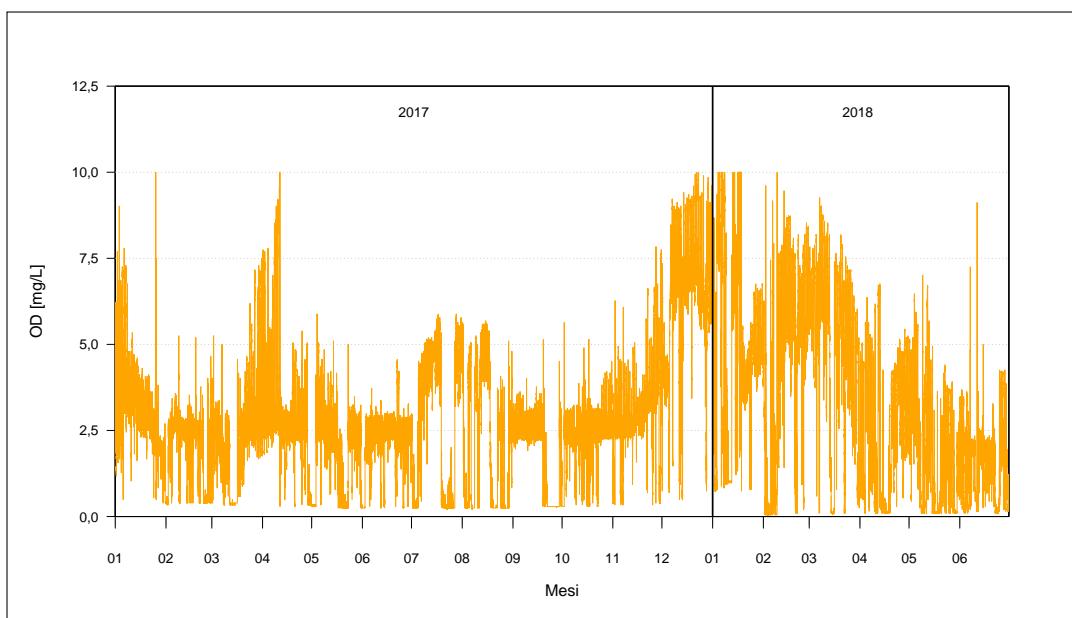


Figura 5.1.50: Andamento della concentrazione di ossigeno dissolto in vasca di ossidazione - linee 1 e 2

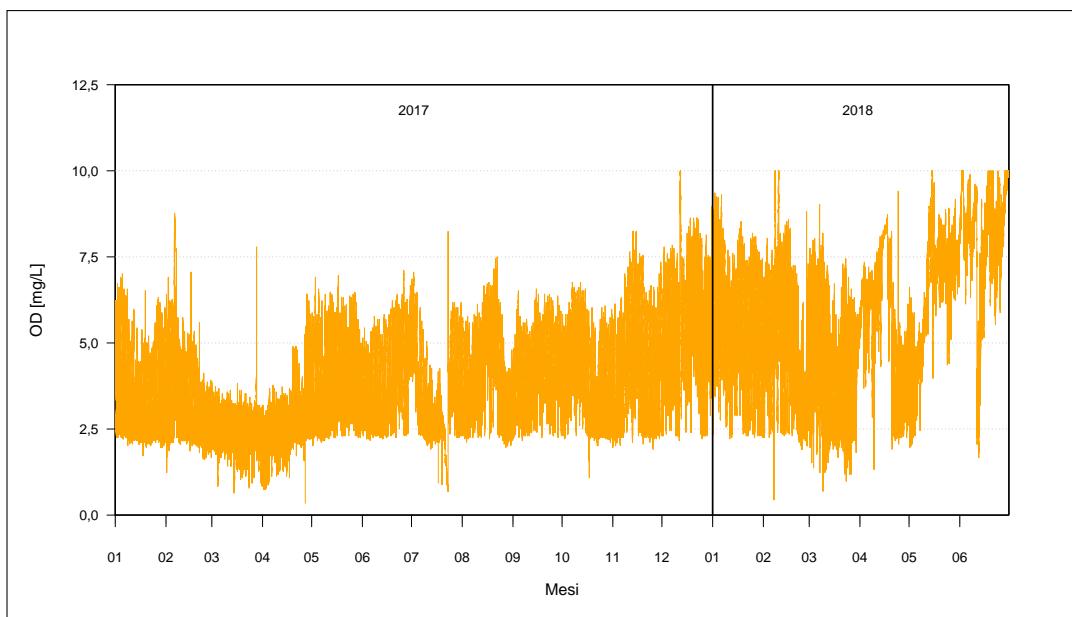


Figura 5.1.51: Andamento della concentrazione di ossigeno dissolto in vasca di ossidazione - linea 3

5.1.2 Impianto B

5.1.2.1 Caratteristiche del liquame in ingresso

Il grafico di Figura 5.1.52 riporta l'andamento delle portate giornaliere in ingresso all'impianto e le precipitazioni mensili. I valori di portata risultano piuttosto stabili ad esclusione dell'anno 2017, in cui la portata decresce rapidamente a inizio anno. Essa assume valori per lo più inferiori rispetto agli anni precedenti. Tra febbraio e marzo 2018, la portata aumenta e il suo valore medio si riavvicina a quello degli anni 2015 e 2016 (Tabella 5.3). Le precipitazioni mensili sono variabili e non sono correlate alla portata, che non sembra esserne influenzata. Nel 2017, periodo in cui la portata ha valore medio minore, le precipitazioni sono generalmente più abbondanti di quelle del 2015 e confrontabili (ad esclusione di alcuni mesi) con quelle del 2016. Pertanto, non si è in grado di indicare con esattezza le cause che inducono le variazioni di portata. Come valore di riferimento per la portata in tempo asciutto, si considera la mediana calcolata sull'intero arco temporale considerato, arrotondata al valore di 1.600 m^3/d . Tale valore rispetta la potenzialità di progetto di 2.000 m^3/d .

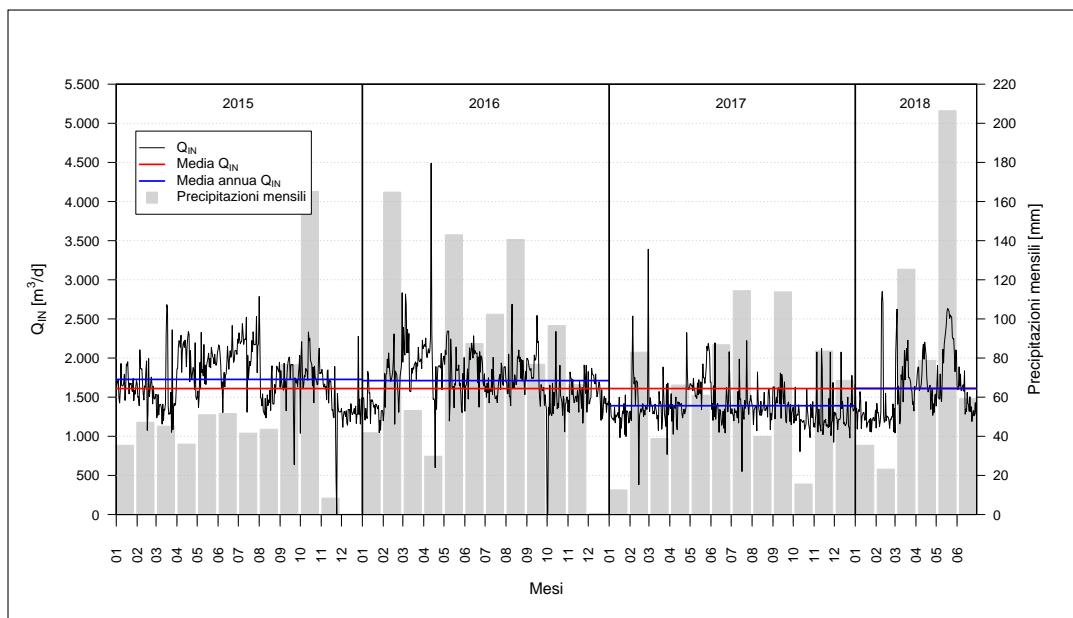


Figura 5.1.52: Andamento della portata giornaliera in ingresso e precipitazioni mensili

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

Periodo	Media Q_{IN} [m^3/d]	Mediana Q_{IN} [m^3/d]	Media/Mediana [-]
2015	1.727	1.710	1,01
2016	1.712	1.685	1,02
2017	1.391	1.347	1,03
2018	1.612	1.525	1,06
2015 - 2018	1.610	1.567	1,03

Tabella 5.3: Media, mediana e rapporto media/mediana delle portate in ingresso

5.1.2.1.1 Caratteristiche qualitative L'andamento delle concentrazioni di BOD_5 e COD ottenute attraverso il campionamento routinario è mostrato in Figura 5.1.53. Entrambe le concentrazioni sono molto variabili, in particolar modo per quanto riguarda il COD. Il COD si mantiene, principalmente, nell'intervallo 500-1.500 mg/L (come media mobile), mentre il BOD_5 sta nell'intervallo 130-850 mg/L. Questi valori sono tipici di un liquame a concentrazione media-forte (Tabella 3.1). Sia BOD_5 che COD manifestano un trend decrescente al passare del tempo. In generale si individua una certa correlazione tra le due grandezze. Tuttavia, ad aumenti notevoli di concentrazione di COD non sempre corrispondono aumenti equivalenti di BOD_5 . A partire dal 2016 sembra esserci una certa periodicità che potrebbe essere legata a scarichi di allevamenti (sono in corso delle verifiche).

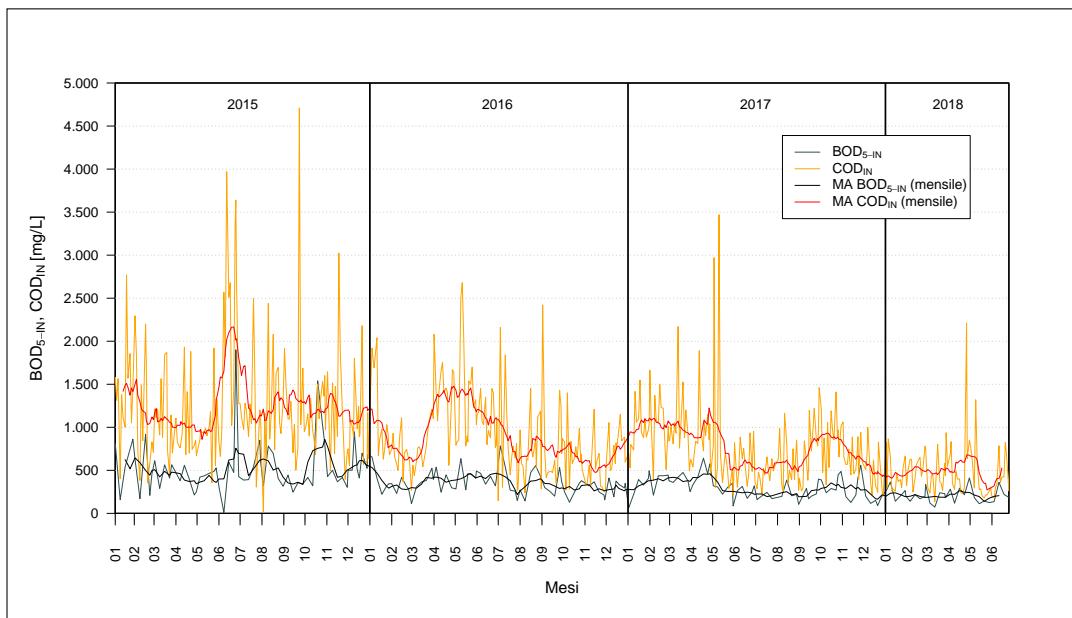


Figura 5.1.53: Andamento delle concentrazioni in ingresso di BOD_5 e COD

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

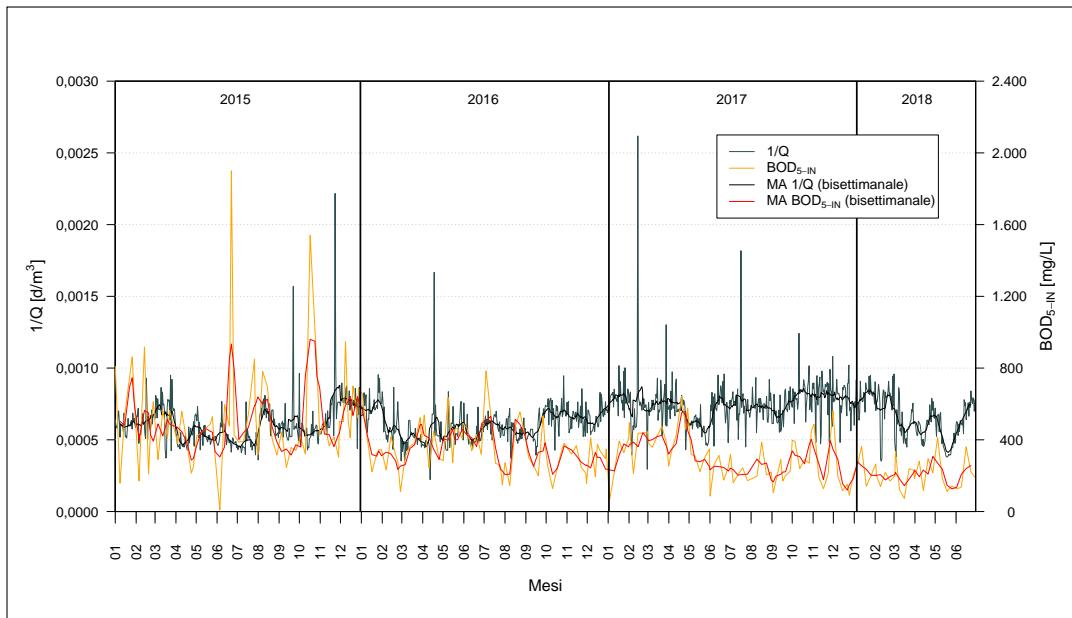


Figura 5.1.54: Andamento della concentrazione in ingresso di BOD_5 e dell'inverso della portata giornaliera

I grafici di Figura 5.1.55 e Figura 5.1.54 riportano i valori di concentrazione di COD e BOD_5 rispetto all'inverso della portata giornaliera al fine di verificare se le variazioni di concentrazione siano correlate alla portata. In entrambi i casi non si individua correlazione tra concentrazione e portata. Infatti, spesso, negli intervalli in cui la portata diminuisce (e quindi $1/Q$ aumenta), la concentrazione diminuisce e viceversa.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

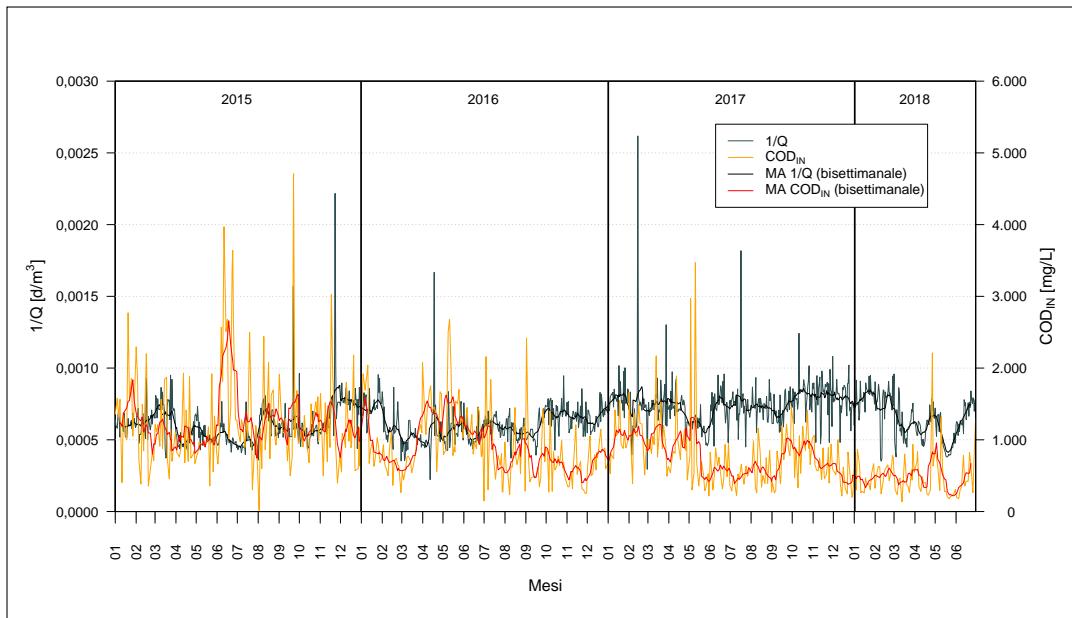


Figura 5.1.55: Andamento della concentrazione in ingresso di COD e dell'inverso della portata giornaliera

In Figura 5.1.56 è mostrato l'andamento della concentrazione di COD e di SST e si vede chiaramente che c'è correlazione tra le due grandezze (a inizio 2017 non è molto marcata).

Nel grafico di Figura 5.1.57, invece, si ha il confronto tra BOD₅ e SST che individua ancora correlazione, anche se non così buona come per il COD. Di conseguenza, poiché nell'analisi del grafico di Figura 5.1.53 si era individuata una tendenza alla diminuzione delle concentrazioni di COD e BOD₅, essendo essi correlati ai SST, anche questi ultimi hanno un trend decrescente, come è ben visibile nella rappresentazione grafica.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

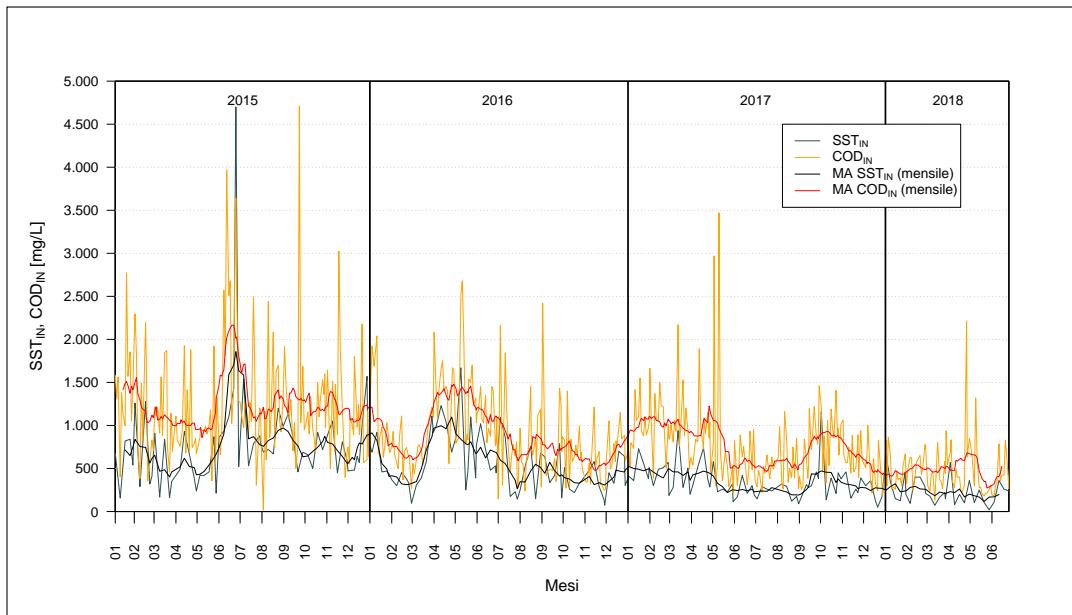


Figura 5.1.56: Andamento delle concentrazioni in ingresso di COD e SST

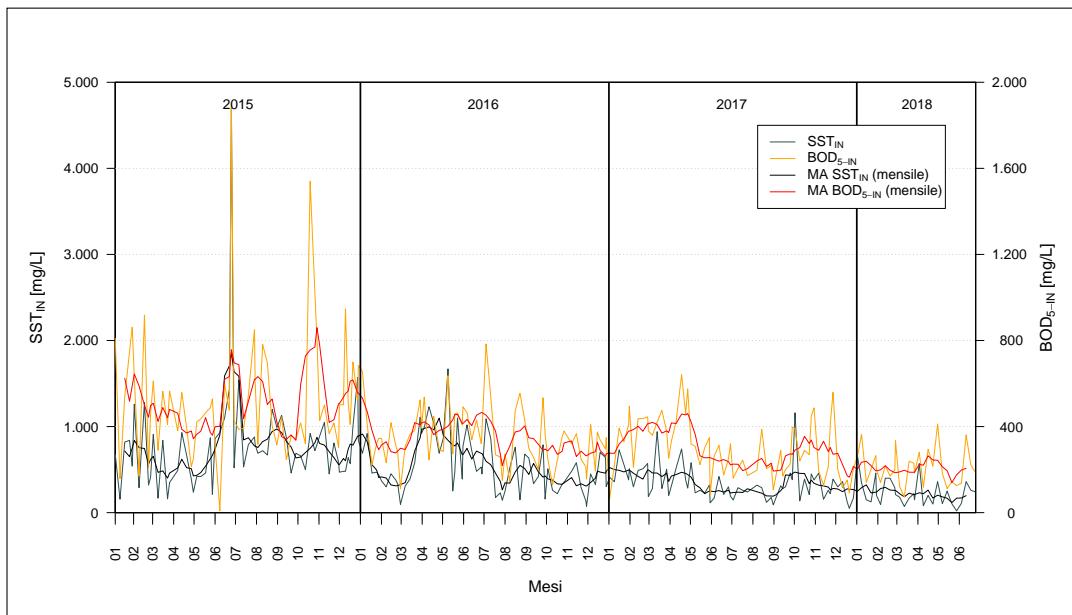


Figura 5.1.57: Andamento delle concentrazioni in ingresso di BOD₅ e di SST

Si riporta ora l'andamento dell'azoto totale e dell'azoto ammoniacale (Figura 5.1.58). Entrambe le grandezze sono notevolmente variabili e in alcuni casi superano i valori di 85 mg/L per l'azoto totale e 50 mg/L per quello ammoniacale, tipici di un liquame domestico fortemente concentrato (Tabella 3.1).

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

Ciò potrebbe dipendere, come già visto anche per il COD, dalla presenza di scarichi di diverso tipo rispetto a quelli urbani. L'azoto totale è prevalentemente costituito da azoto ammoniacale (mediamente il 67%), come previsto per un refluo di origine civile, anche se in alcuni mesi del 2015 e del 2016 la sua percentuale rispetto al totale diminuisce. L'azoto totale sembra avere un trend leggermente decrescente, mentre l'azoto ammominacale non esibisce particolari tendenze.

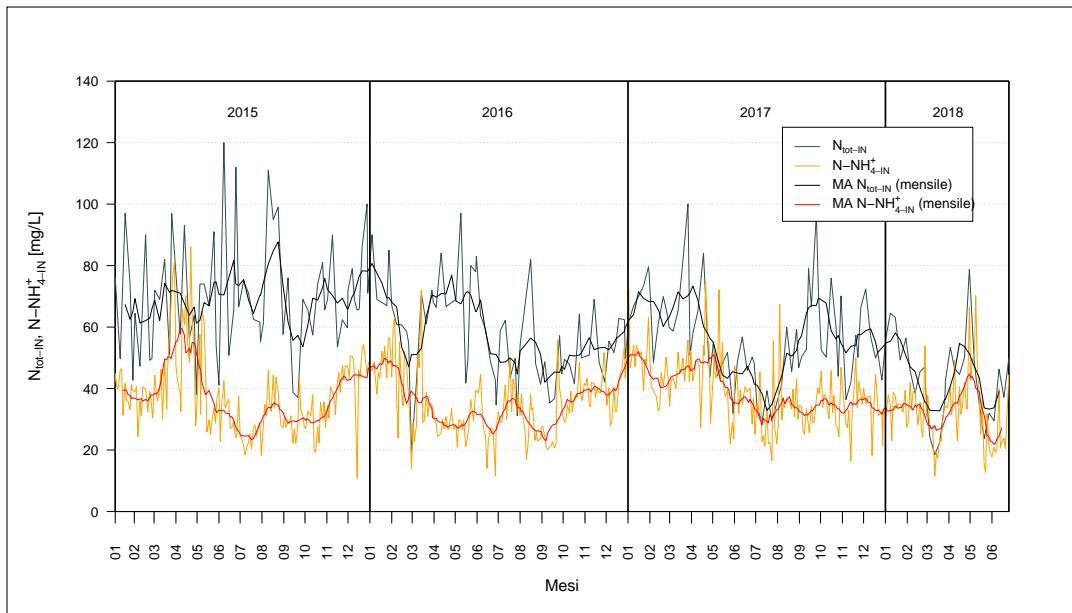


Figura 5.1.58: Andamento delle concentrazioni in ingresso di azoto totale e azoto amminiacale

Le concentrazioni dell'azoto nitroso e dell'azoto nitrico (Figura 5.1.59) sono irrisorie, come ci si aspetta per liquami di origine domestica. Infatti, le forme azotate ossidate non superano mai i 2,5 mg/L, mentre il valore medio della concentrazione di azoto totale è di circa 60 mg/L.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

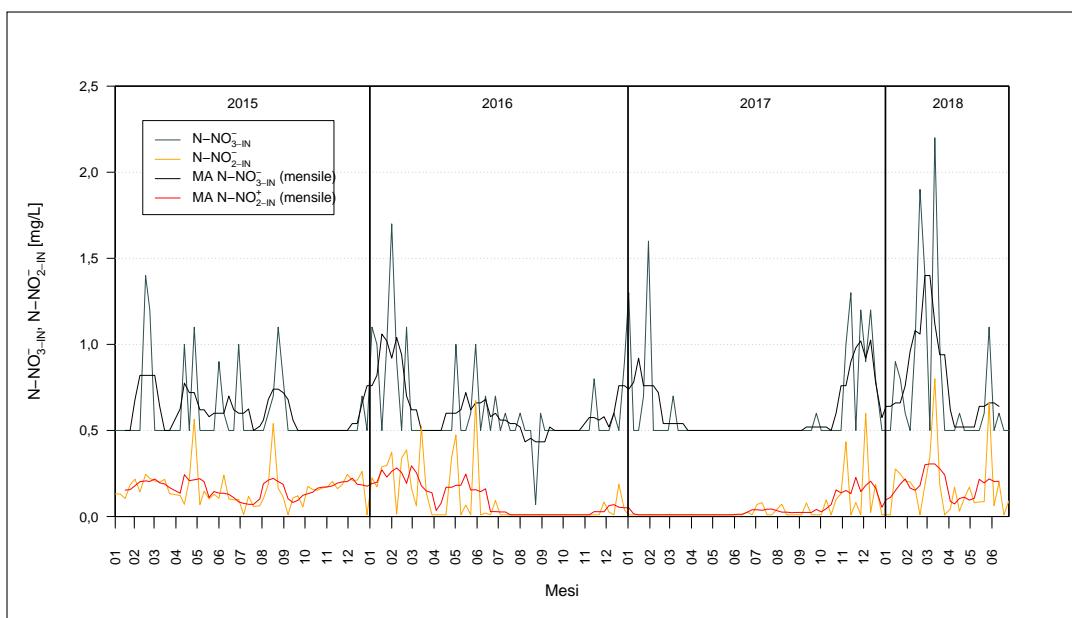


Figura 5.1.59: Andamento delle concentrazioni in ingresso di azoto nitroso e azoto nitrico

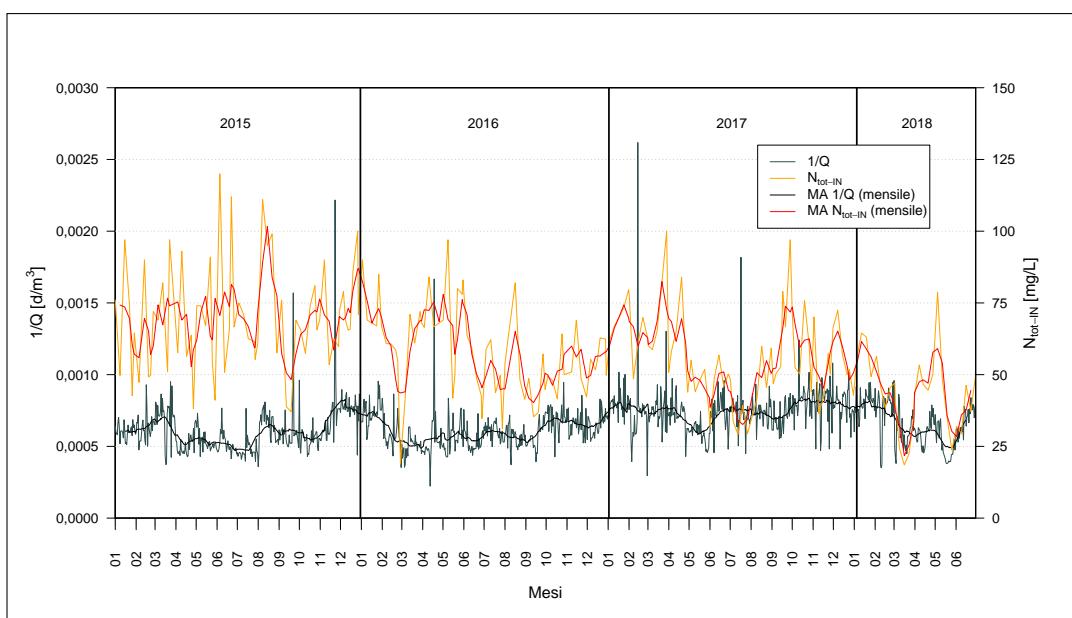


Figura 5.1.60: Andamento delle concentrazioni in ingresso di azoto totale e dell'inverso della portata giornaliera

Come per il COD, anche nel caso delle concentrazioni di azoto totale non si manifesta alcuna correlazione con l'inverso della portata giornaliera e quin-

di non è possibile trovare corrispondenza tra la variazione di portata e di concentrazione di azoto totale (Figura 5.1.60).

Il grafico di Figura 5.1.61 mostra le oscillazioni della concentrazione di fosforo totale in ingresso all'impianto. In più occasioni, la concentrazione supera i 10 mg/L (valore di riferimento per un refluo di origine civile fortemente concentrato, si veda la Tabella 3.1) e quindi è ancora valida l'ipotesi di scarichi di tipo diverso. Nel corso del tempo, si individua un andamento decrescente.

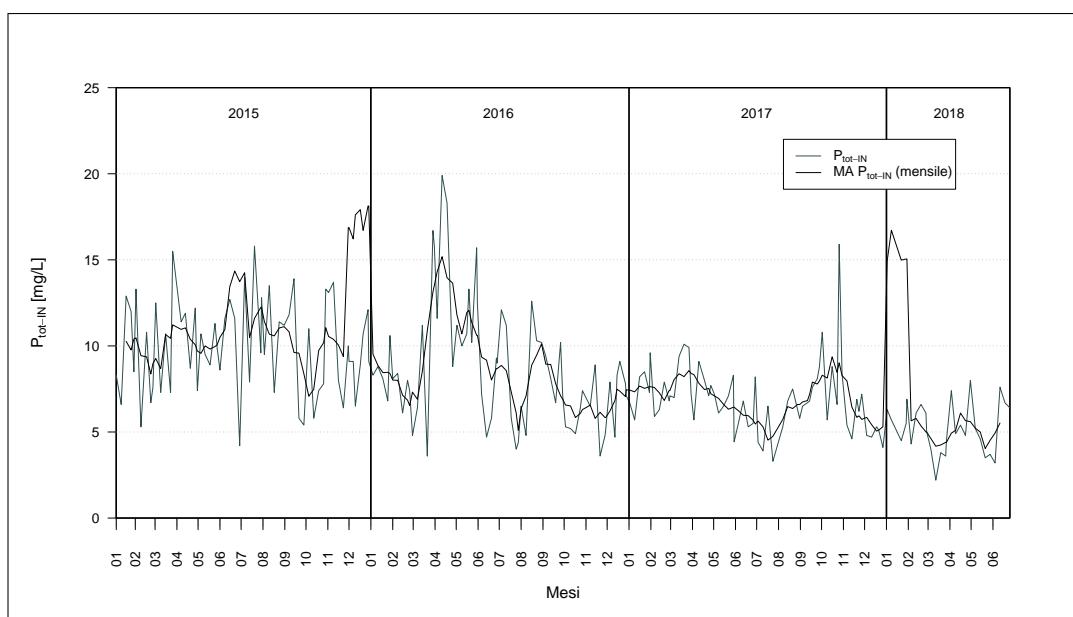


Figura 5.1.61: Andamento della concentrazione in ingresso di fosforo totale

Di seguito sono stati analizzati i valori dei rapporti tra le concentrazioni dei diversi inquinanti e sono stati confrontati con i valori di riferimento per un liquame urbano presentati in Tabella 3.2.

Il rapporto tra BOD₅ e COD è mostrato in Figura 5.1.62. Tale rapporto è molto variabile e, nonostante abbia media pari a 0,44, spesso è al di sotto del valore minimo per un liquame urbano. Una possibile spiegazione è data dalla presenza di scarichi industriali o di allevamenti. Facendo un confronto con l'andamento del COD, si nota che, in coincidenza dei picchi di quest'ultimo, il rapporto assume valori minimi. Questo conferma quanto constatato per il grafico di Figura 5.1.53, ovvero che, quando il COD cresce particolarmente, il BOD₅ non asseconde l'andamento.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

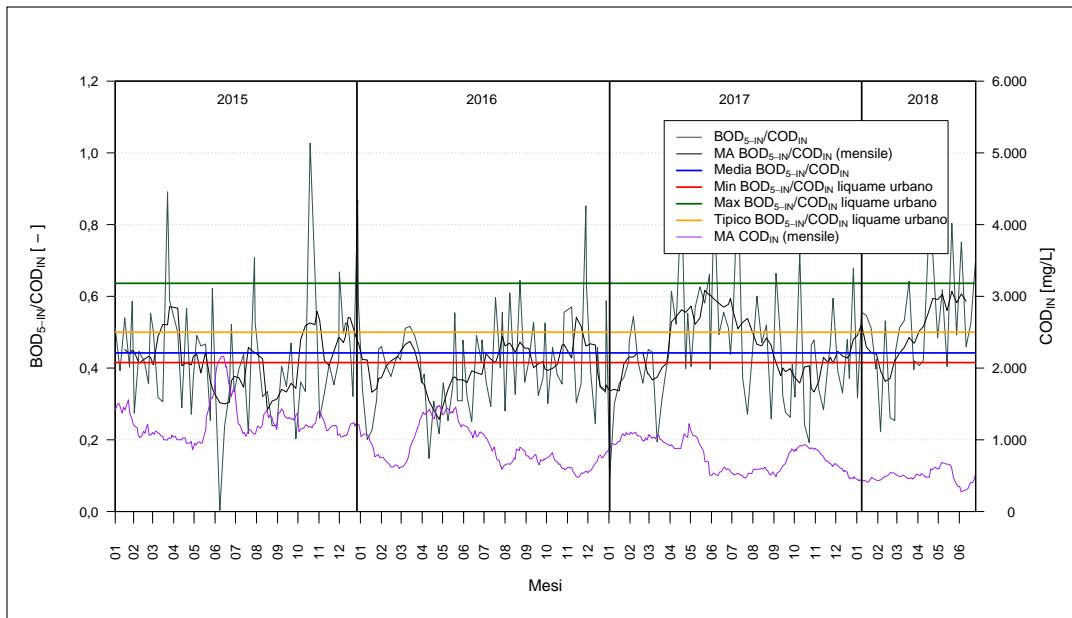


Figura 5.1.62: Andamento del rapporto tra BOD_5 e COD in ingresso

La Figura 5.1.63 mostra gli andamenti dei rapporti tra azoto totale e BOD_5 e azoto totale e COD, che sono abbastanza simili. Il rapporto N_{tot}/BOD_5 (Figura 5.1.64) è molto variabile e quindi non c'è correlazione tra le due grandezze. Esso risente principalmente del trend decrescente osservato per il BOD_5 (Figura 5.1.53) mentre è meno influenzato dall'andamento decrescente dell'azoto totale (Figura 5.1.58). Come conseguenza, il rapporto tende ad aumentare. Nonostante la maggior parte delle misurazioni si trovi al di sotto del valore minimo tipico di un liquame urbano, la media risulta al di sopra di tale valore, spostata verso il valore tipico. Il rapporto N_{tot}/COD assume valori variabili e, per le medesime considerazioni fatte per il rapporto N_{tot}/BOD_5 , si osserva un trend crescente (Figura 5.1.65). Quasi tutti i dati giacciono al di sotto del valore minimo caratteristico di un liquame urbano e, di conseguenza, anche la media è posizionata al di sotto di tale valore.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

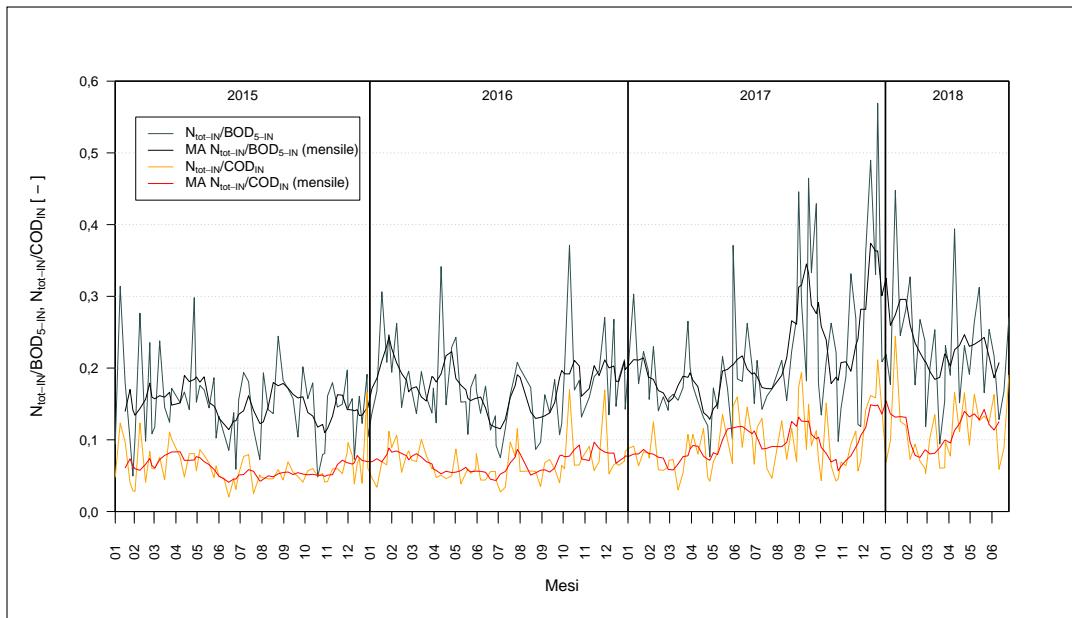
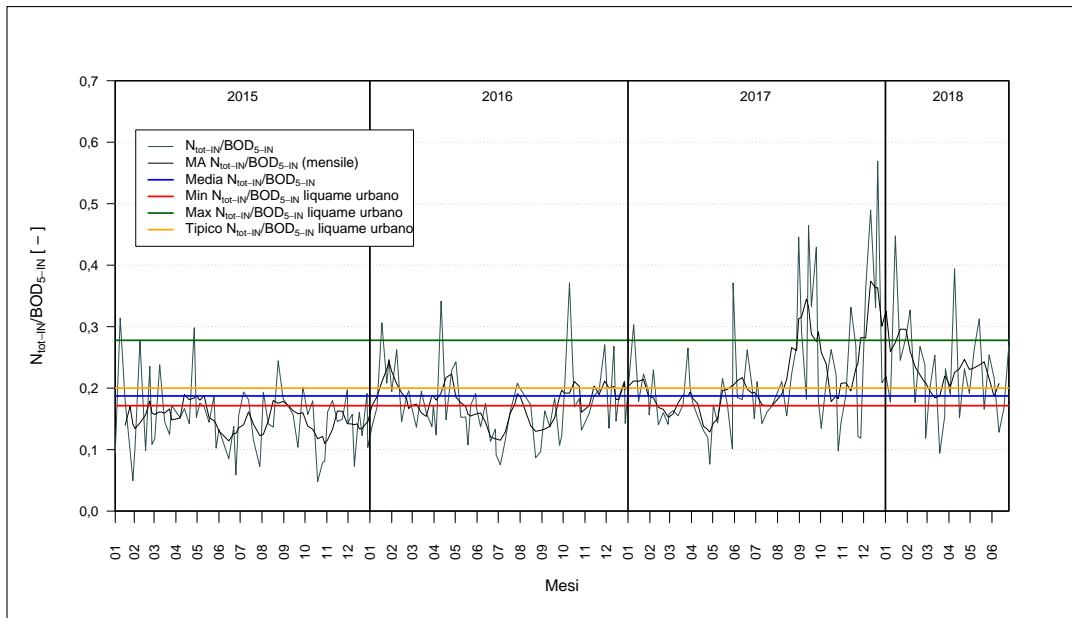


Figura 5.1.63: Andamento dei rapporti tra azoto totale e BOD_5 e azoto totale e COD in ingresso



CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

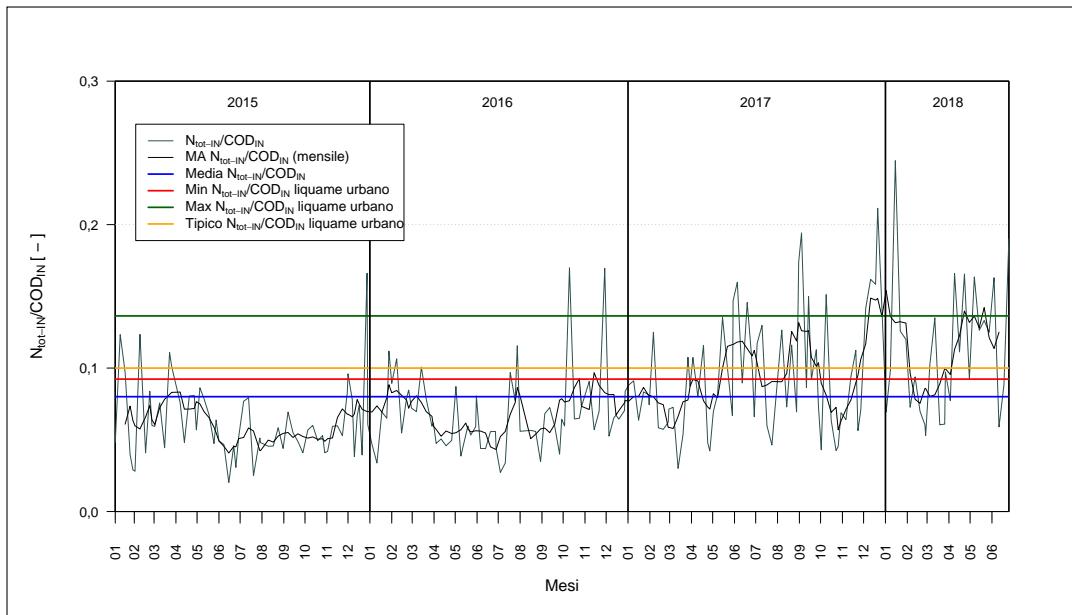


Figura 5.1.65: Andamento del rapporto tra azoto totale e COD in ingresso

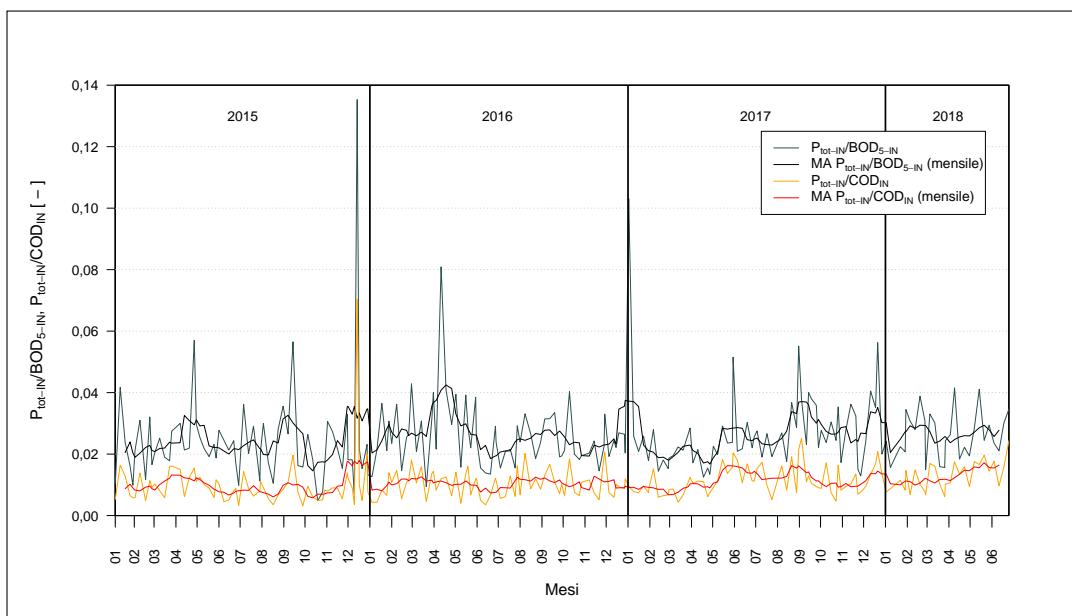


Figura 5.1.66: Andamento dei rapporti tra fosforo totale e BOD₅ e fosforo totale e COD in ingresso

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

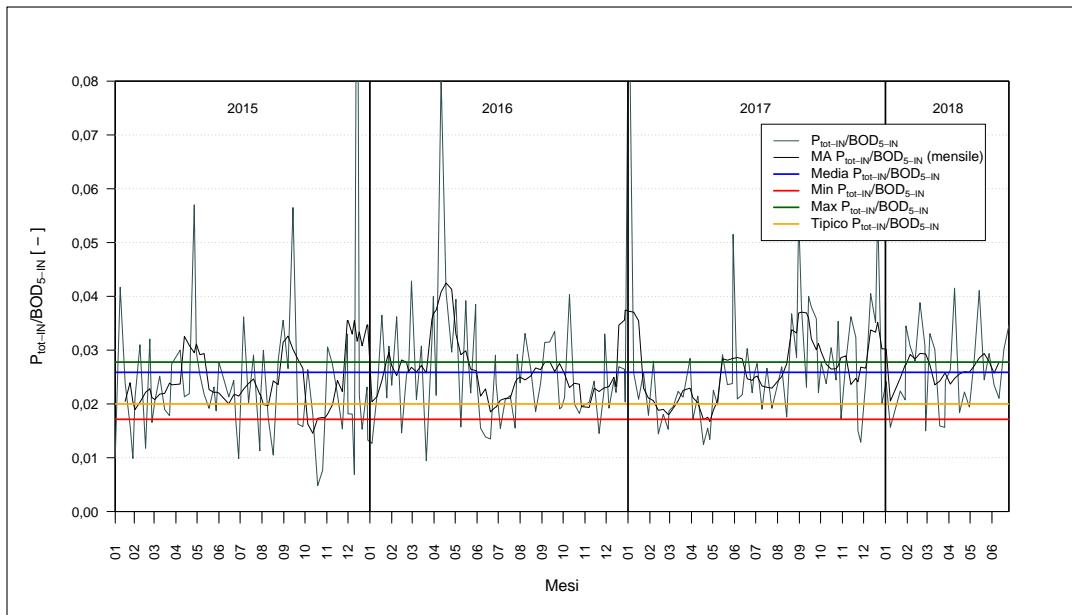


Figura 5.1.67: Andamento del rapporto tra fosforo totale e BOD_5 in ingresso

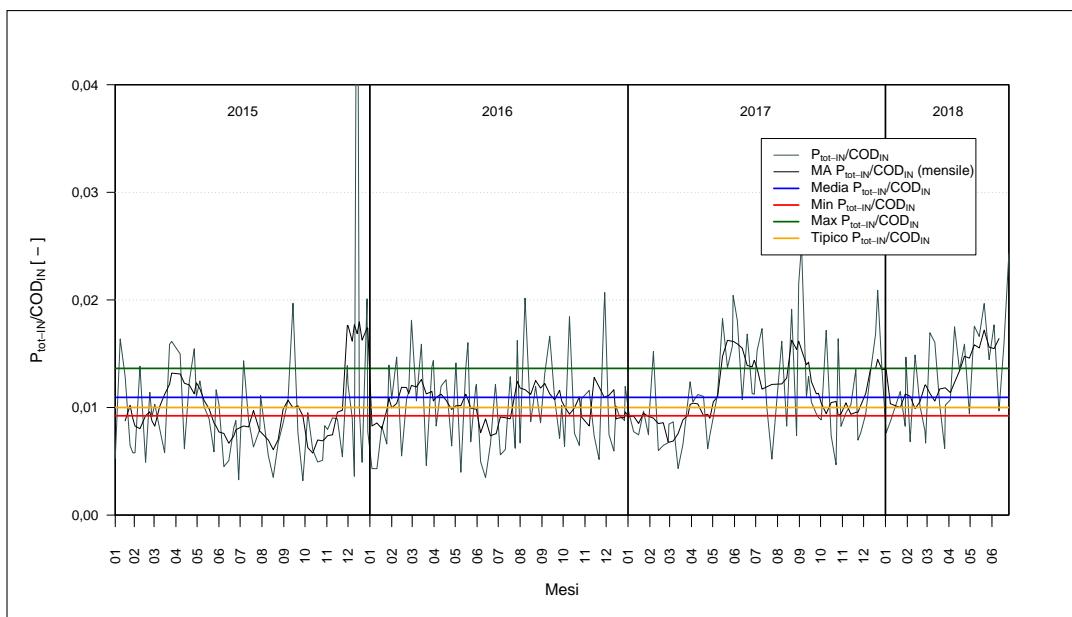


Figura 5.1.68: Andamento del rapporto tra fosforo totale e COD in ingresso

Nel grafico di Figura 5.1.66 sono rappresentati i rapporti tra fosforo e BOD_5 e fosforo e COD e si osserva correlazione. L'andamento variabile porta alla conclusione che non ci sia correlazione tra la concentrazione di fosforo e quella

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

di BOD_5 e COD. Nel caso del rapporto tra fosforo totale e BOD_5 , si nota che la media è sbilanciata verso il valore massimo atteso per liquami urbani (Figura 5.1.67). Nel caso del rapporto tra fosforo totale e COD, invece, la media è di poco superiore al valore tipico per liquami urbani (Figura 5.1.68).

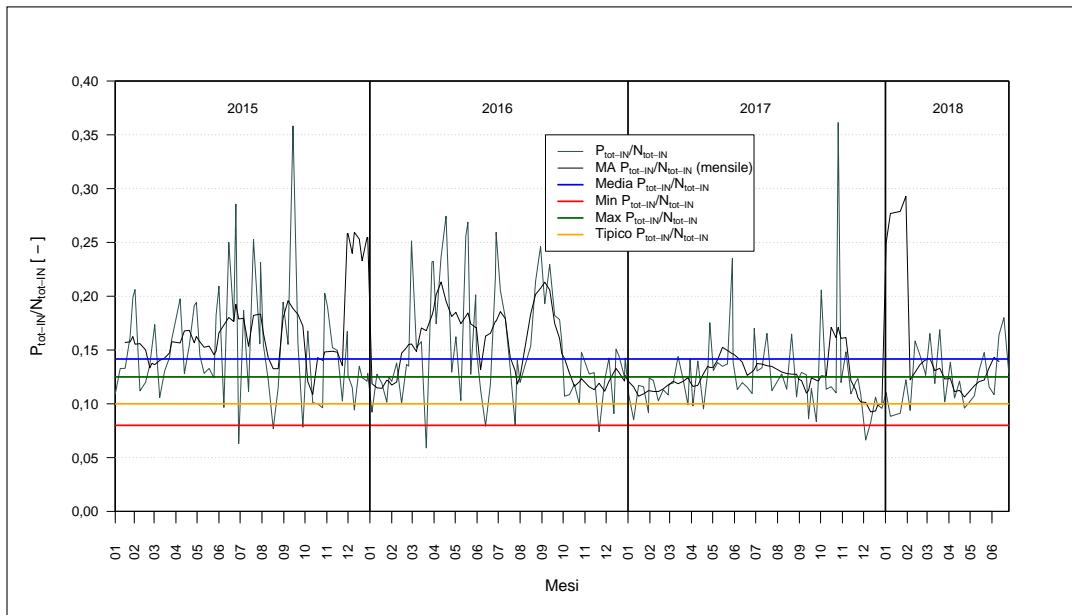


Figura 5.1.69: Andamento del rapporto tra fosforo totale e azoto totale in ingresso

Il rapporto tra fosforo totale e azoto totale è molto variabile e la sua media supera il valore massimo per un liquame urbano (Figura 5.1.69).

In Tabella 5.4 sono raccolti i valori medi dei rapporti calcolati e i rispettivi valori tipici per liquami urbani. Si osserva che le caratteristiche del liquame sono sbilanciate verso il fosforo.

Rapporto	Media	Valore tipico
BOD_5/COD	0,44	0,50
N_{tot}/BOD_5	0,19	0,20
N_{tot}/COD	0,08	0,10
P_{tot}/BOD_5	0,026	0,020
P_{tot}/COD	0,011	0,010
P_{tot}/N_{tot}	0,14	0,10

Tabella 5.4: Valori medi calcolati e valori tipici per un liquame urbano dei rapporti significativi tra le concentrazioni di inquinanti in ingresso

La concentrazione di carica batterica in termini di *Escherichia coli* è rappresentata in Figura 5.1.70 dove è evidente un trend crescente.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

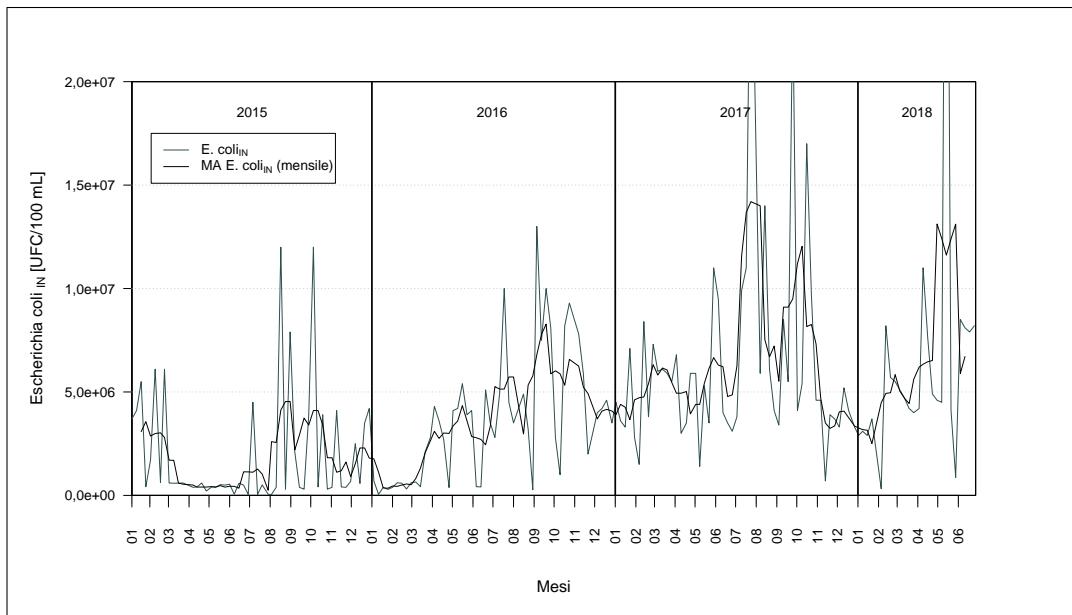


Figura 5.1.70: Andamento della concentrazione in ingresso di *Escherichia coli*

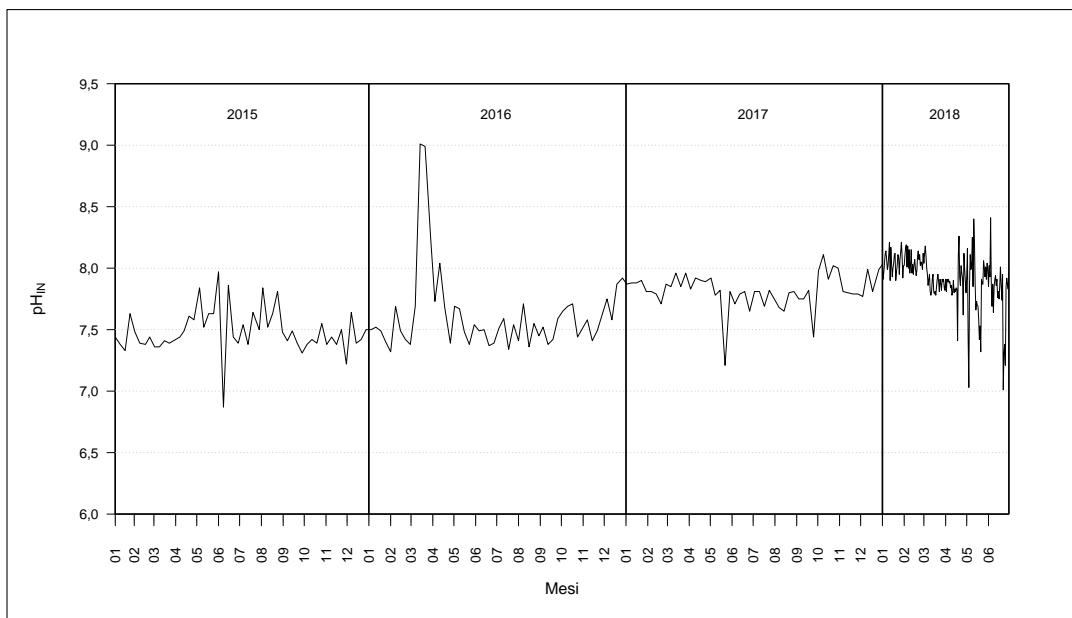


Figura 5.1.71: Andamento del pH del liquame in ingresso

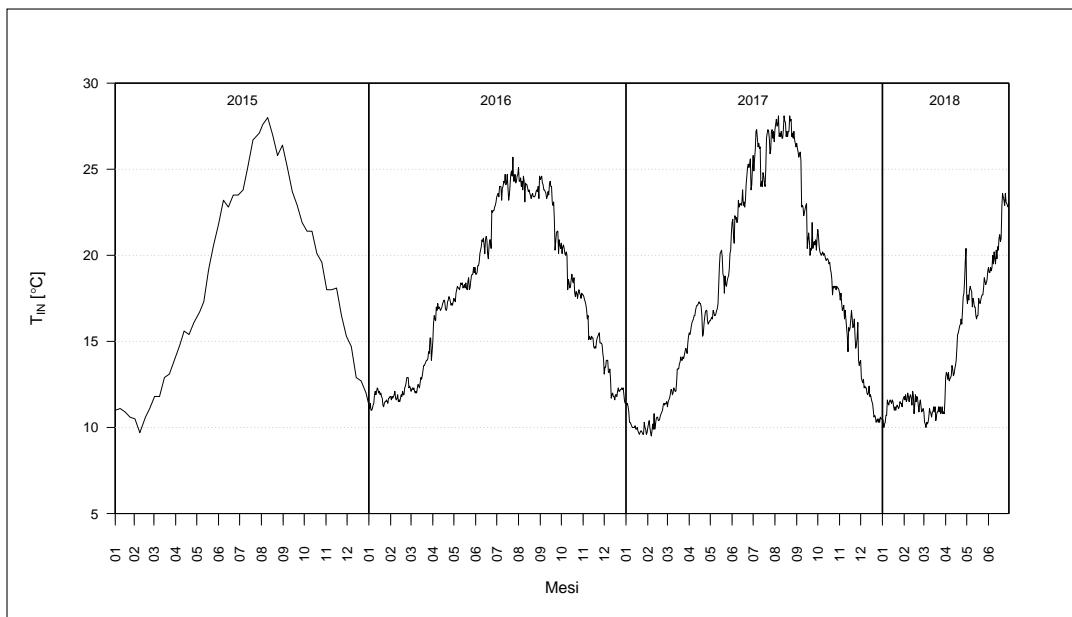


Figura 5.1.72: Andamento della temperatura del liquame in ingresso

Le misurazioni di pH hanno valore medio 7,7 e, in alcuni periodi del 2018, superano il valore 8 (Figura 5.1.71). In un caso isolato nel 2016 si raggiunge anche il valore 9. Si può osservare un trend crescente.

La temperatura del refluo in ingresso presenta le classiche variazioni stagionali (Figura 5.1.72). Si osservano valori minimi di circa 10°C e valori massimi compresi tra 25 e 28°C.

5.1.2.1.2 Carichi inquinanti Come per l'impianto A, a partire dai dati di concentrazione e da quelli di portata, è stato possibile calcolare i carichi degli inquinanti in ingresso all'impianto.

I carichi di BOD_5 (Figura 5.1.73) e di COD (Figura 5.1.74) ricalcano l'andamento decrescente delle loro rispettive concentrazioni. Per il calcolo dei carichi, infatti, si moltiplicano le concentrazioni per il valore di portata che, in questo caso, è piuttosto stabile. Negli anni 2015 e 2016, questi carichi aumentano e diminuiscono in accordo con la temperatura del liquame in ingresso. Nel 2017, invece, essi assumono valori bassi nei mesi più caldi dell'anno.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

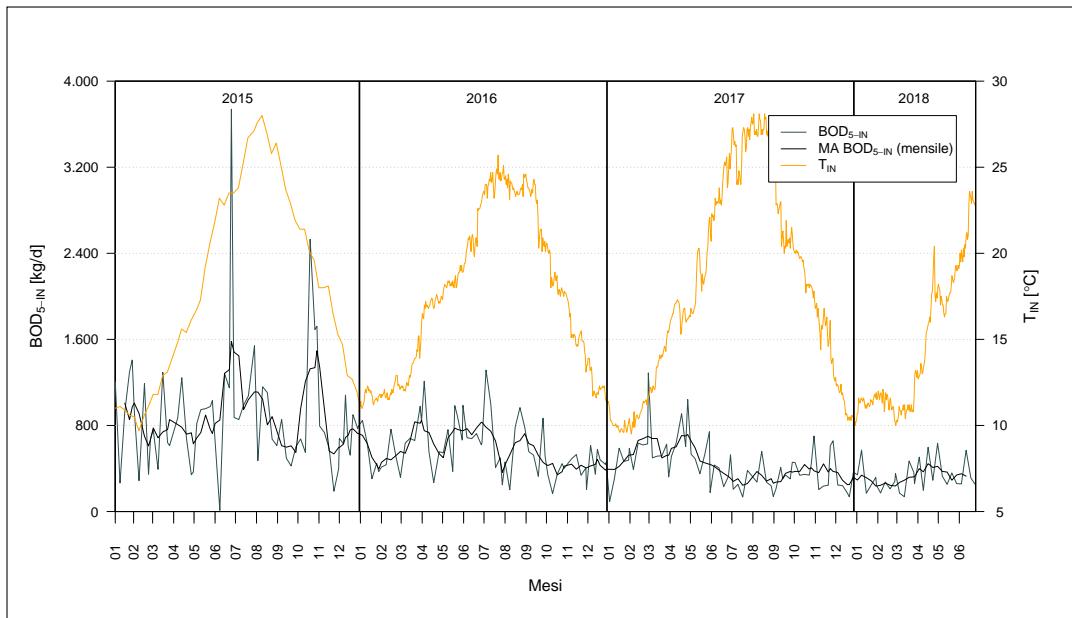


Figura 5.1.73: Andamento del carico in ingresso di BOD_5 e della temperatura del liquame in ingresso

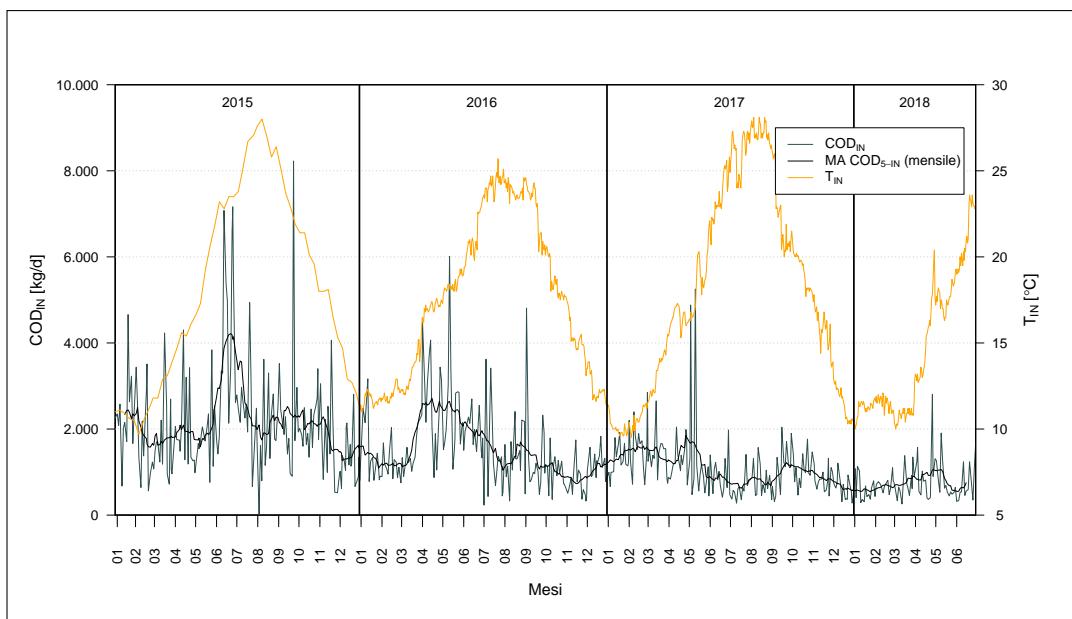


Figura 5.1.74: Andamento del carico in ingresso di COD e della temperatura del liquame in ingresso

La Figura 5.1.75 mostra la distribuzione di frequenza dei carichi di COD e di BOD_5 e i percentili 90°, 75° e 50°.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

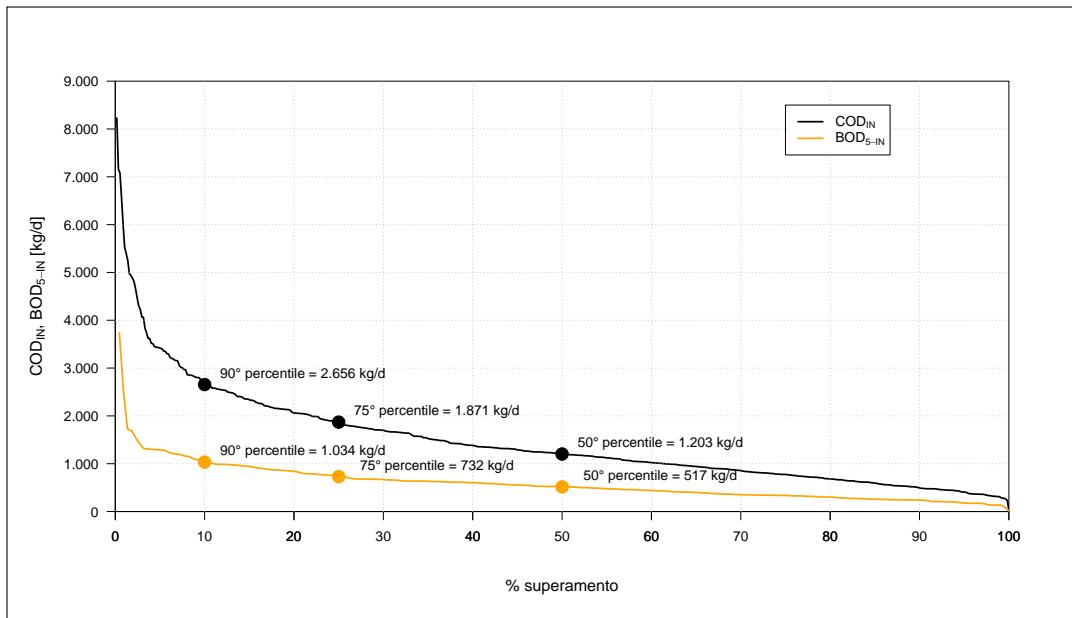


Figura 5.1.75: Distribuzione di frequenza dei carichi giornalieri in ingresso di COD e di BOD₅

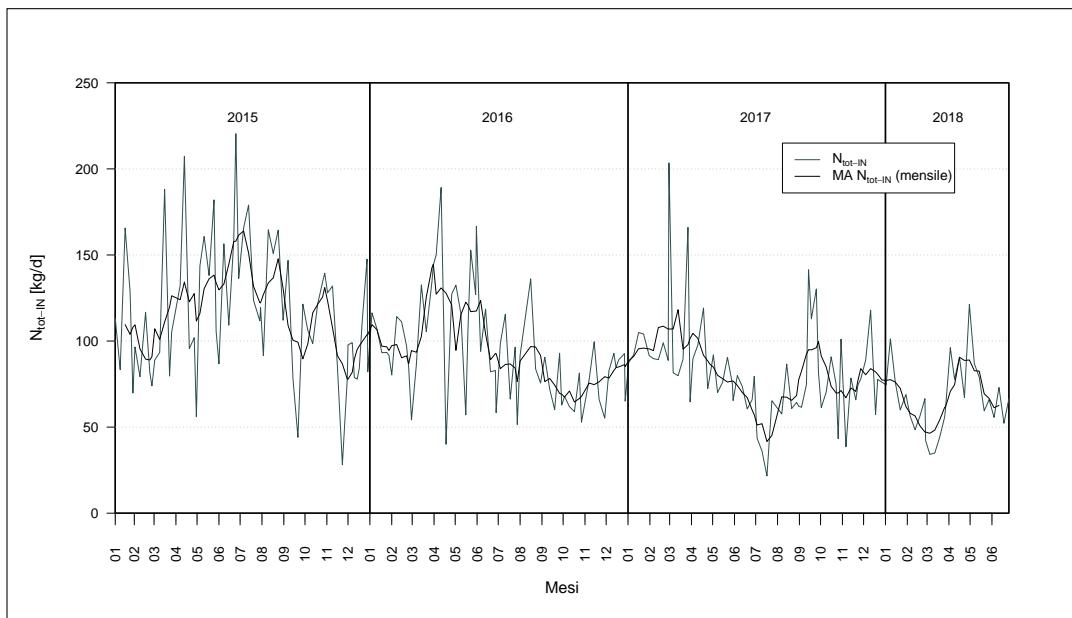


Figura 5.1.76: Andamento del carico in ingresso di azoto totale

Il carico di azoto totale (Figura 5.1.76) e quello di fosforo totale (Figura 5.1.77) hanno un andamento che rispecchia quello delle concentrazioni piuttosto che quello delle portate. In entrambi i casi si nota un trend leggermente decrescente.

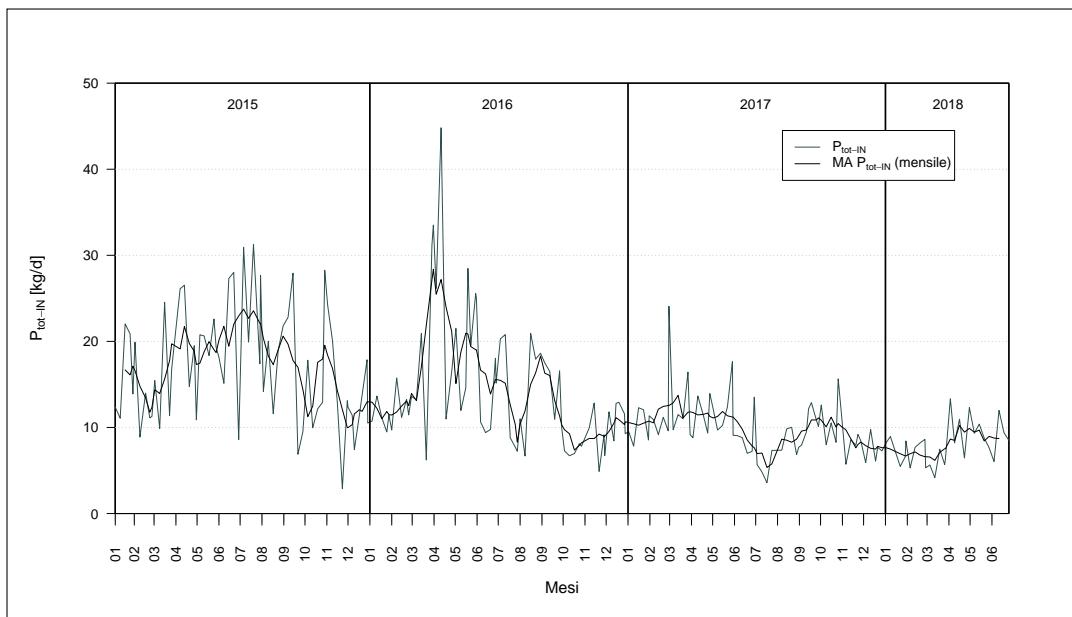


Figura 5.1.77: Andamento del carico in ingresso di fosforo totale

Per completare l'analisi dei carichi, sono stati calcolati i carichi medi di BOD_5 , COD, azoto totale e fosforo totale, espressi in abitanti equivalenti (sottosezione 3.2.3). I risultati per l'intero periodo 2015 - 2018 e quelli su base annua sono rappresentati rispettivamente in Figura 5.1.78 e Figura 5.1.79. L'analisi sull'intero periodo evidenzia che la potenzialità di progetto di 10.000 abitanti equivalenti è sufficiente per il BOD_5 e l'azoto totale, mentre risulta leggermente superata dai carichi, in abitanti equivalenti, di COD e fosforo totale. Dalla valutazione condotta sulla media annua si osserva una progressiva decrescita nel tempo. Il 2015 presenta, per tutti gli inquinanti, valori significativamente eccedenti la potenzialità di progetto mentre nel 2016 tale condizione si verifica solo per COD e fosforo totale. Negli anni successivi, invece, tutti i parametri risultano essere compatibili con la potenzialità dell'impianto. Anche osservando il 90° percentile per il BOD_5 e il 92° percentile per il COD, i valori ottenuti sono sempre al di sopra della potenzialità di progetto (ad eccezione del BOD_5 nell'anno 2018). Come per l'impianto A, si sono valutati proprio questi due percentili perché, secondo quanto spiegato nella sezione 3.4, è consentito eccedere la potenzialità di progetto nel 10% dei giorni per il BOD_5 e nell'8% per il COD³.

³Per l'anno 2018 si è stimato che, a fine anno, si avrà un numero di misurazioni doppio rispetto a quello conteggiato a fine giugno, assumendo che la media dei carichi sul primo semestre sia rappresentativa di quella annuale. Ovviamente questa analisi andrà ripetuta a fine anno, quando si sarà in possesso di tutti i dati.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

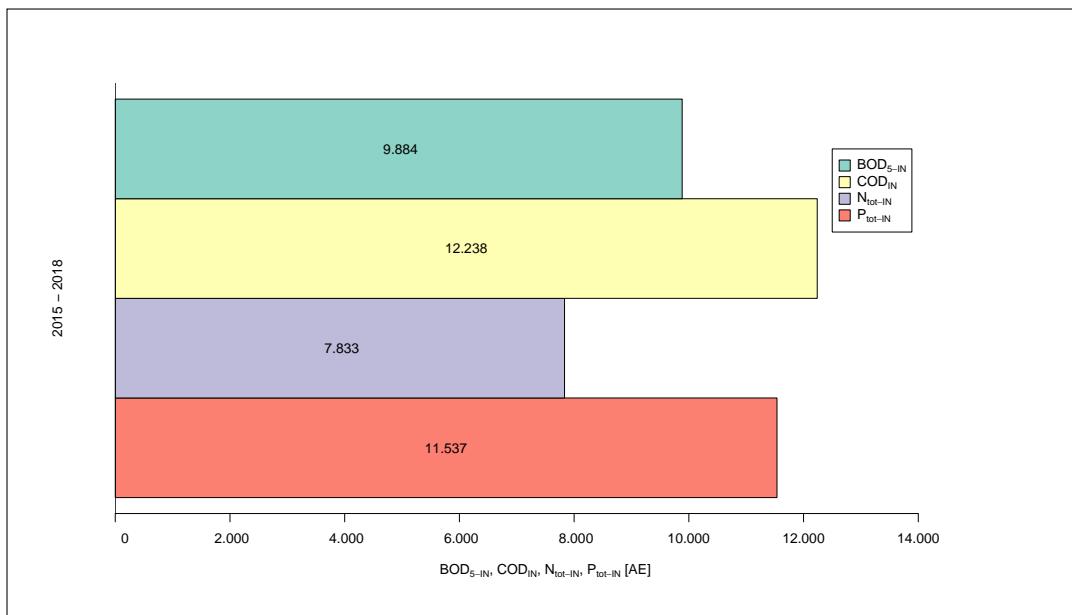


Figura 5.1.78: Carichi medi in ingresso di BOD₅ (60 g ab⁻¹ d⁻¹), COD (120 g ab⁻¹ d⁻¹), azoto totale (12 g ab⁻¹ d⁻¹) e fosforo totale (1,2 g ab⁻¹ d⁻¹), espressi in abitanti equivalenti, calcolati sull'intero periodo 2015 - 2018

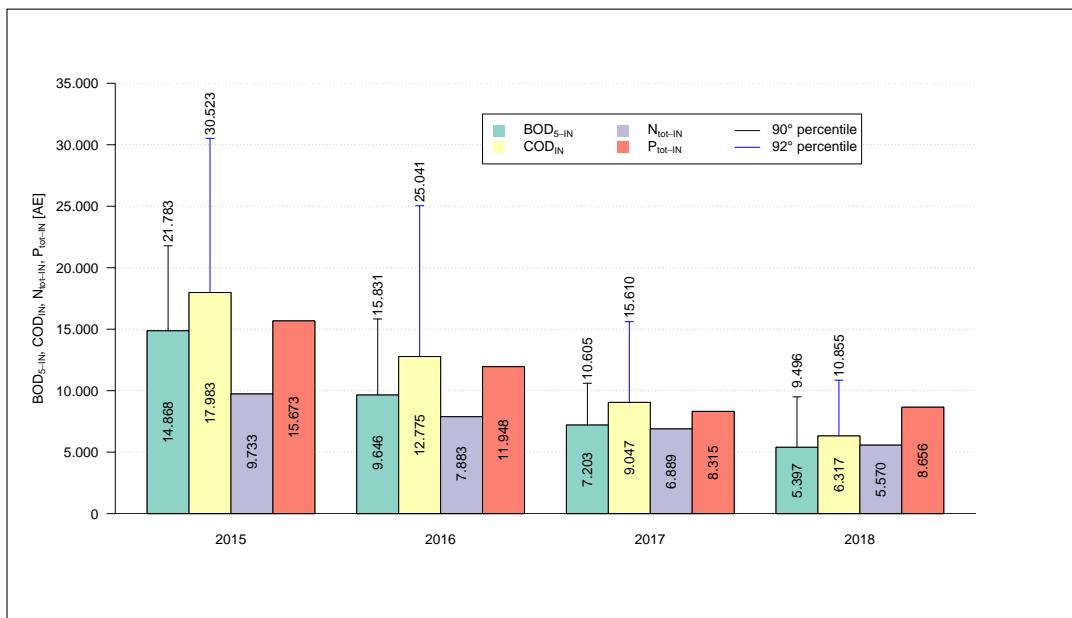


Figura 5.1.79: Carichi medi in ingresso di BOD₅ (60 g ab⁻¹ d⁻¹), COD (120 g ab⁻¹ d⁻¹), azoto totale (12 g ab⁻¹ d⁻¹) e fosforo totale (1,2 g ab⁻¹ d⁻¹), espressi in abitanti equivalenti, calcolati per ciascun anno

5.1.2.2 Caratteristiche dell'effluente

Le caratteristiche dell'effluente devono rispettare i limiti allo scarico elencati in Tabella 1.5.

5.1.2.2.1 Caratteristiche qualitative Il grafico di Figura 5.1.80 rappresenta i valori di BOD_5 in ingresso e in uscita. Per tutto il periodo considerato, la concentrazione di BOD_5 in uscita rispetta il limite di 20 mg/L. Essa è pressoché costante (attorno a un valore medio di 7,6 mg/L), ad eccezione di alcuni picchi che si mantengono comunque al di sotto del limite. Non si osserva correlazione tra la concentrazione in ingresso e quella in uscita.

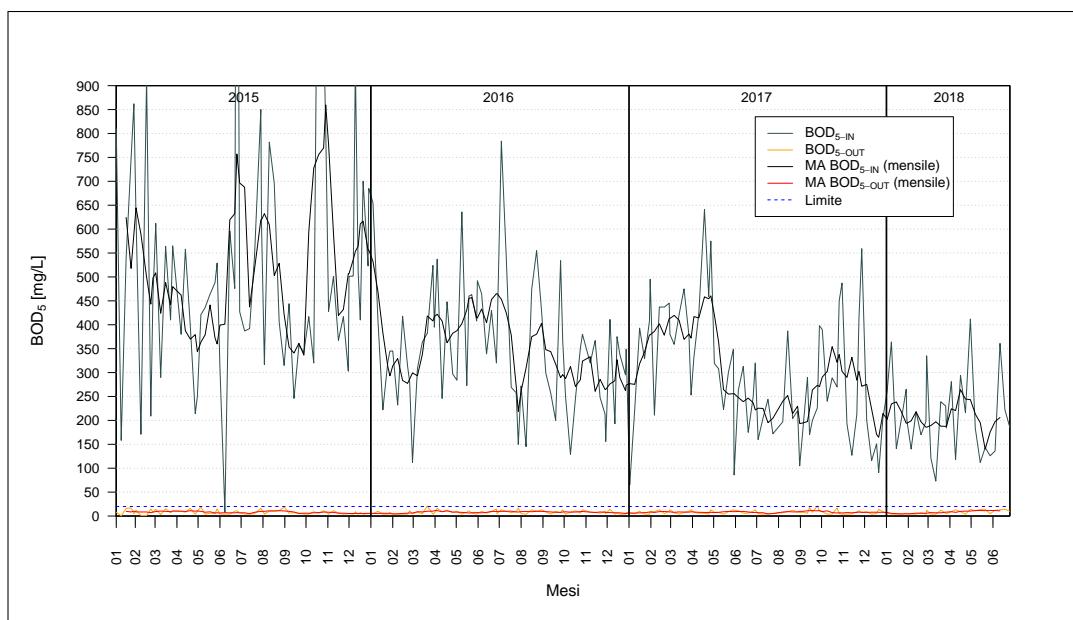


Figura 5.1.80: Andamento delle concentrazioni di BOD_5 in ingresso e in uscita

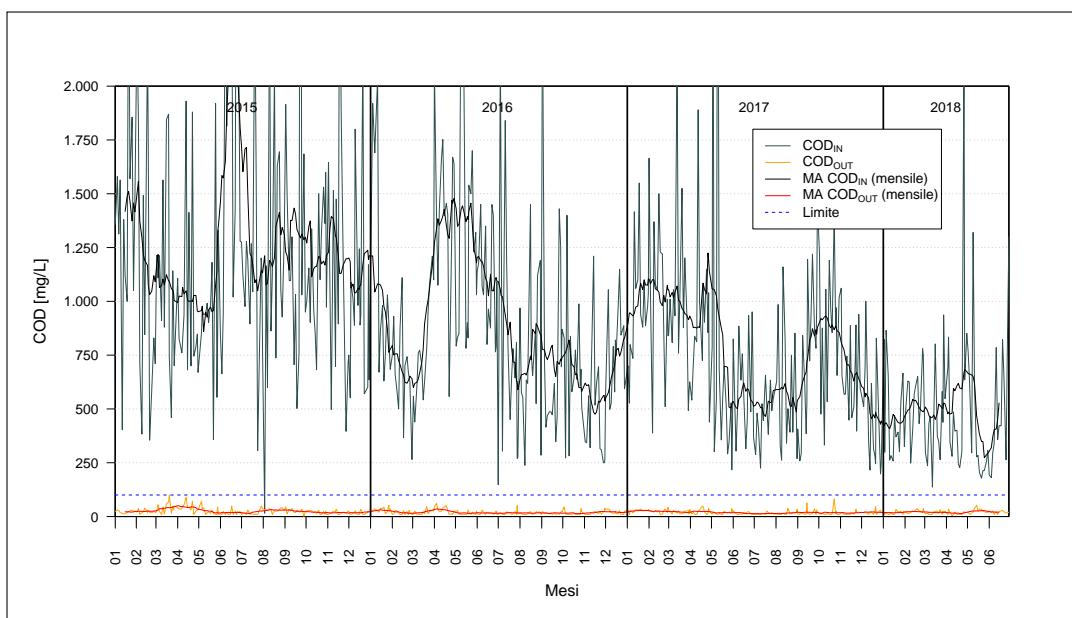


Figura 5.1.81: Andamento delle concentrazioni di COD in ingresso e in uscita

I valori di COD in ingresso e in uscita sono rappresentati in Figura 5.1.81. Per tutto il periodo esaminato, la concentrazione di COD in uscita rispetta il limite di 100 mg/L con ampio margine ed è pressoché costante (in media pari a 20 mg/L). Non si evidenzia correlazione tra concentrazione in ingresso e concentrazione in uscita.

Per quanto riguarda i SST, durante l'intero arco temporale considerato, la concentrazione in uscita rispetta il limite di 35 mg/L con ampio margine, ad eccezione di alcuni picchi che si mantengono comunque al di sotto del limite. Tale concentrazione è pressoché costante, in media 7,7 mg/L (Figura 5.1.82).

Confrontando l'andamento della concentrazione di SST con la portata effluente, sembrerebbe che, esclusivamente in alcuni intervalli, la concentrazione di SST in uscita segua l'andamento della portata in uscita. In ogni caso, anche se ci fosse effetto di trascinamento, la concentrazione di inquinante in uscita si mantiene sempre al di sotto del limite allo scarico.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

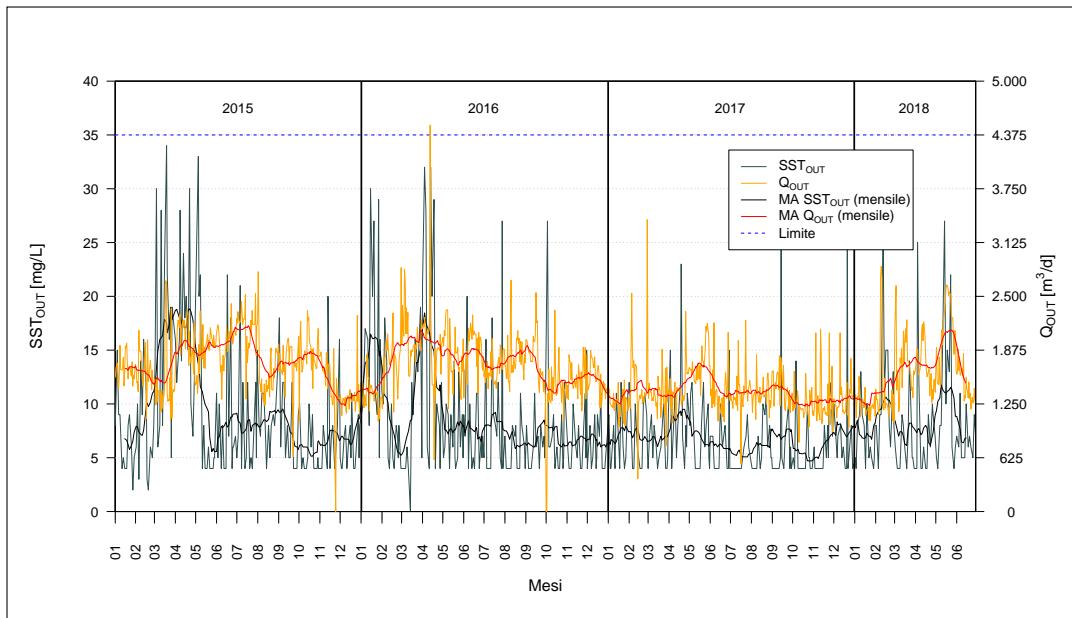


Figura 5.1.82: Andamento della concentrazione di SST in uscita e della portata effluente

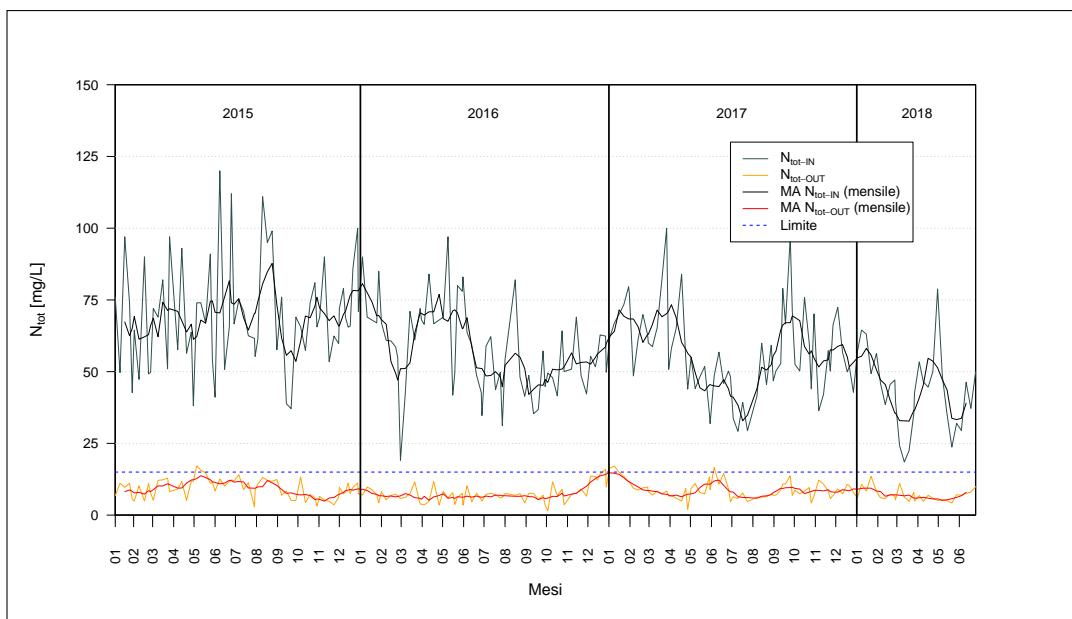


Figura 5.1.83: Andamento delle concentrazioni di azoto totale in ingresso e in uscita

Dalla rappresentazione delle concentrazioni in ingresso e in uscita, si ricava un'idea generale dell'efficacia di rimozione complessiva di azoto totale,

che si può ritenere soddisfacente (Figura 5.1.83). Infatti, ad eccezione di rari casi, il limite di 15 mg/L è sempre rispettato. Non c'è correlazione tra la concentrazione in ingresso e quella in uscita.

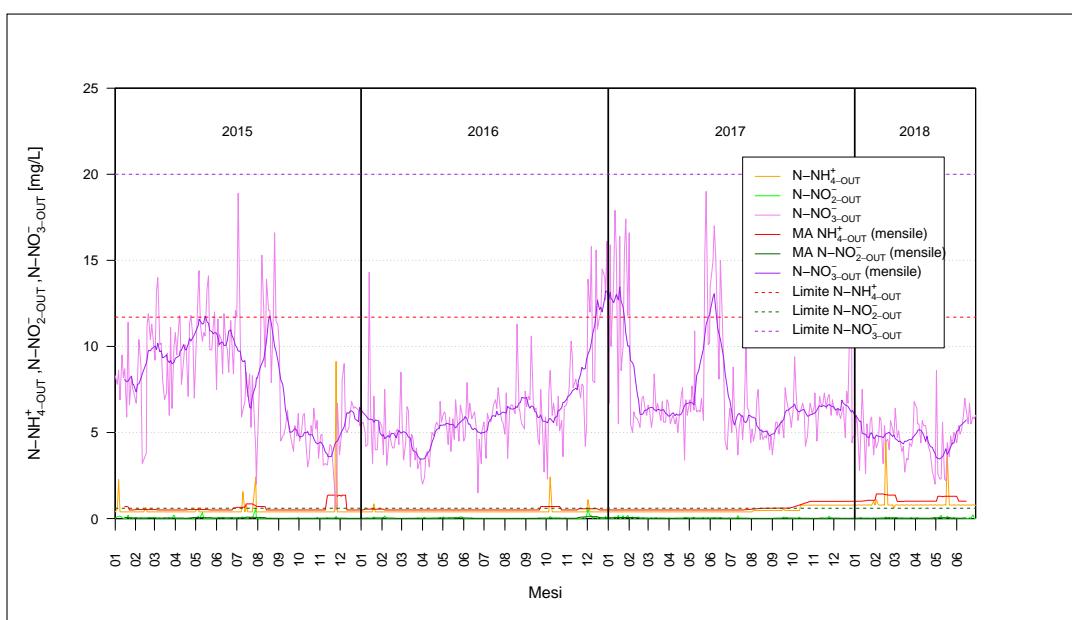


Figura 5.1.84: Andamento delle concentrazioni in uscita di azoto ammoniacale, azoto nitroso e azoto nitrico

Nella Figura 5.1.84 sono rappresentati gli andamenti delle concentrazioni in uscita di azoto ammoniacale (N-NH_4^+), azoto nitroso (N-NO_2^-) e azoto nitrico (N-NO_3^-). Durante il periodo considerato, la concentrazione di ogni forma azotata si mantiene al di sotto del proprio limite allo scarico.

La concentrazione di fosforo totale in uscita è sempre ampiamente inferiore al limite allo scarico (10 mg/L) (Figura 5.1.85). La concentrazione in uscita si mantiene stabile attorno al valore medio di 1,28 mg/L e quindi non è correlata alla concentrazione in ingresso che manifesta un trend decrescente.

La concentrazione di *Escherichia coli* in uscita è generalmente molto bassa con sporadici valori elevati (Figura 5.1.86). I valori rilevati si mantengono costantemente al di sotto del limite di 5.000 UFC/100 mL.

Si nota che il pH in uscita è quasi sempre leggermente inferiore rispetto a quello in entrata (Figura 5.1.87). Esso tendenzialmente segue l'andamento dell'ingresso, ad eccezione dei primi mesi del 2018.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

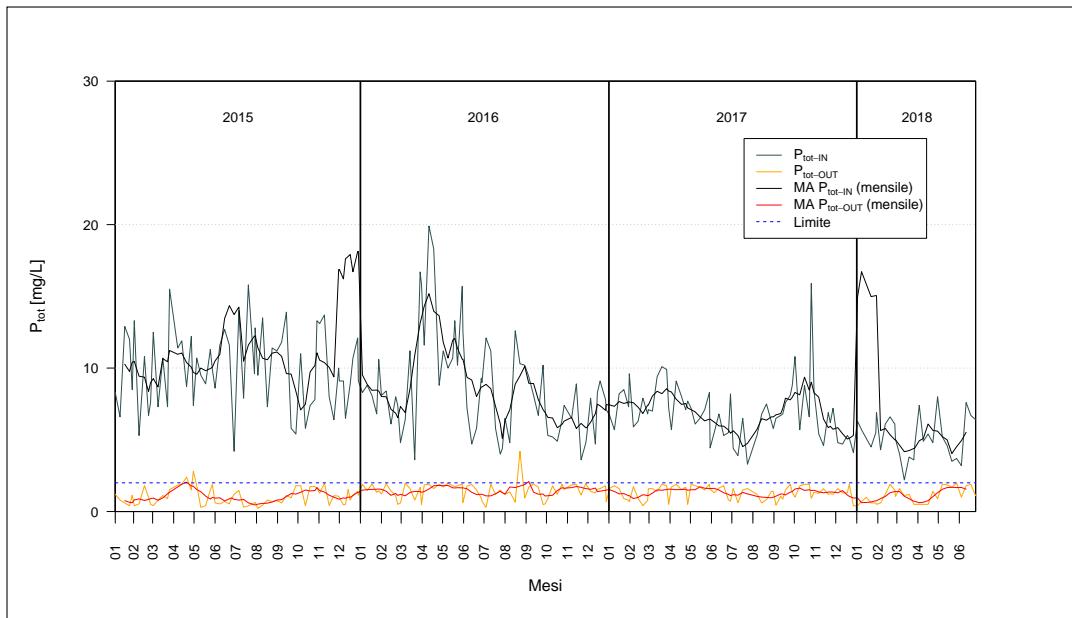


Figura 5.1.85: Andamento delle concentrazioni di fosforo totale in ingresso e in uscita

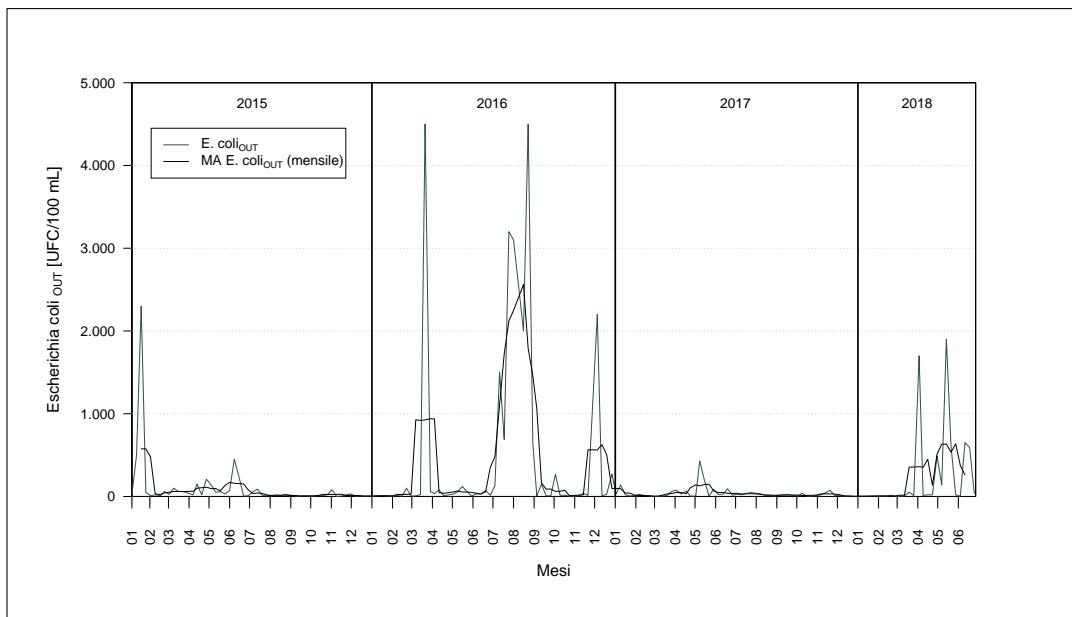


Figura 5.1.86: Andamento della concentrazione in uscita di *Escherichia coli*

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

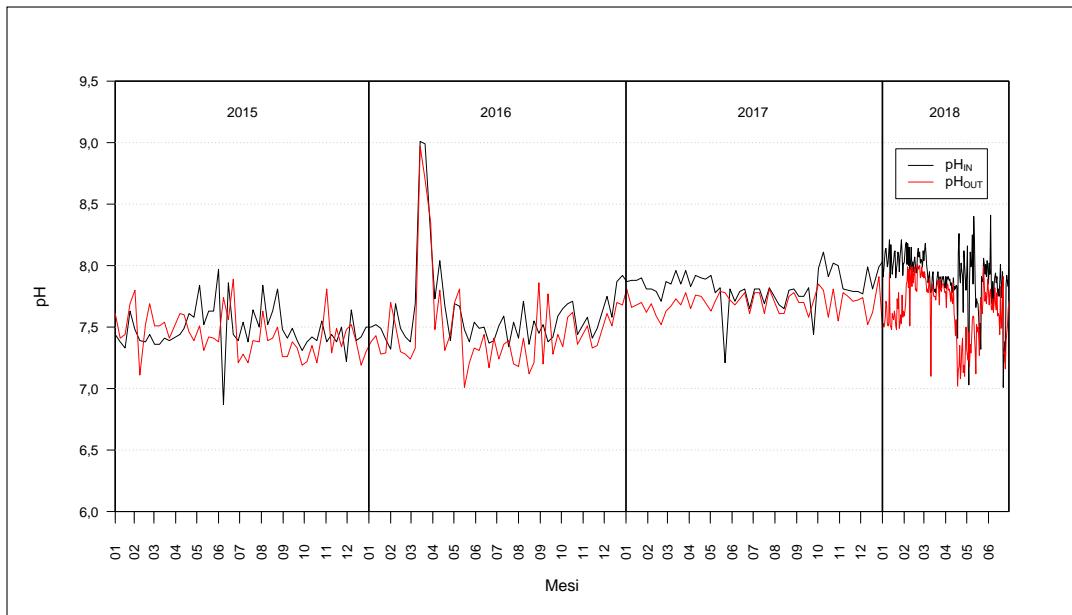


Figura 5.1.87: Andamento del pH del liquame in ingresso e in uscita

La temperatura in uscita, invece, è praticamente invariata rispetto a quella in ingresso (Figura 5.1.88).

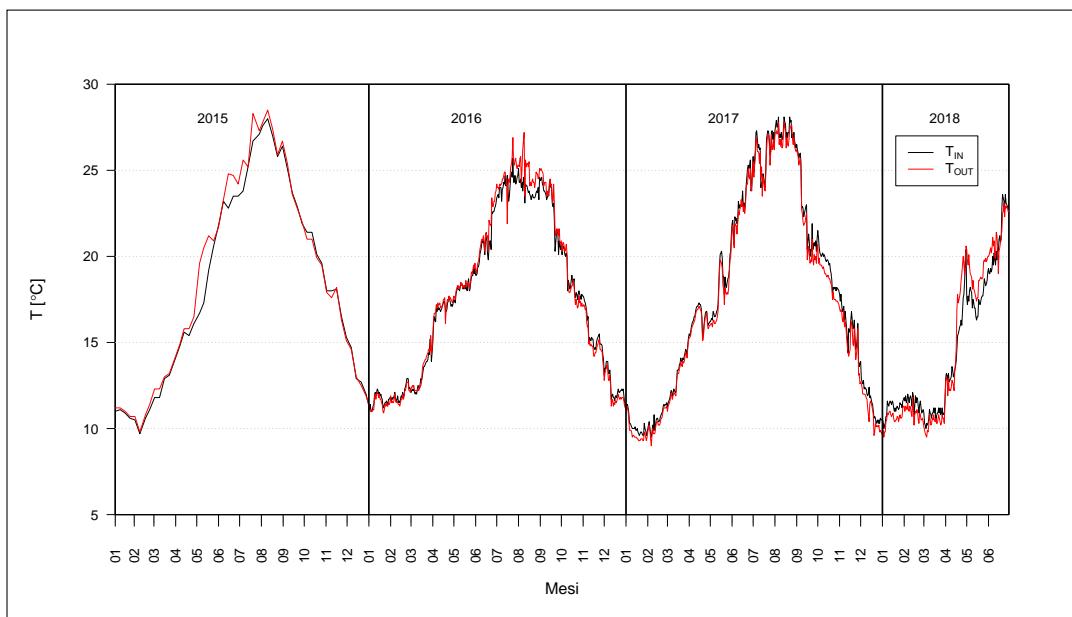


Figura 5.1.88: Andamento della temperatura del liquame in ingresso e in uscita

5.1.2.3 Prestazioni

Facendo riferimento alle formule di calcolo dei rendimenti di rimozione esposte nella sezione 3.3, sono stati calcolati i rendimenti per ciascun anno (Figura 5.1.89) e per il periodo complessivo 2015 - 2018 (Figura 5.1.90).

Tutti i rendimenti assumono valori simili nei diversi anni ma si osservano escursioni più marcate nel caso del fosforo.

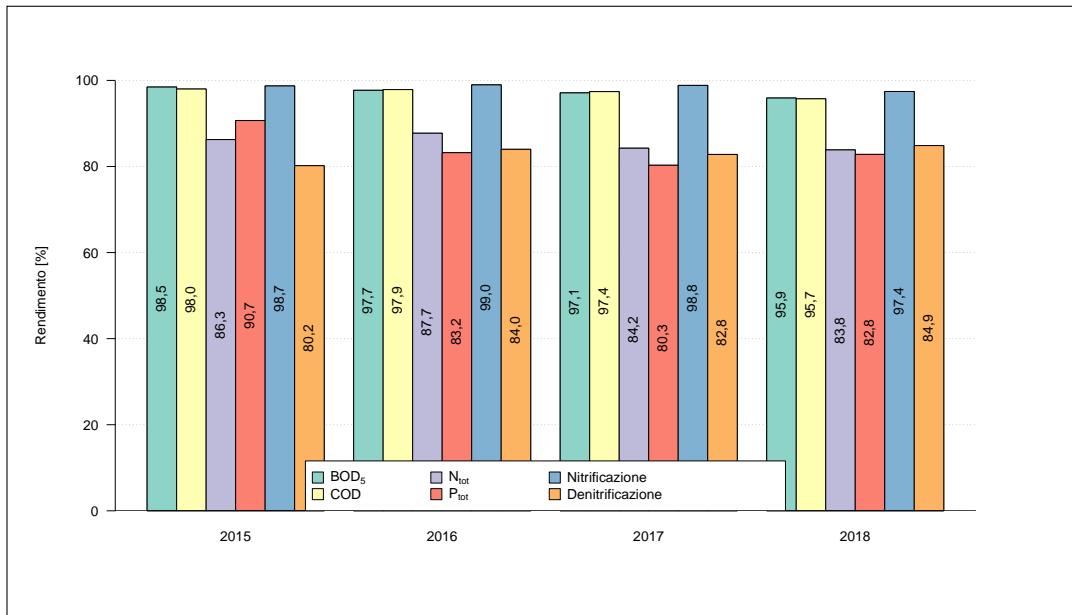


Figura 5.1.89: Rendimenti di rimozione su base annua

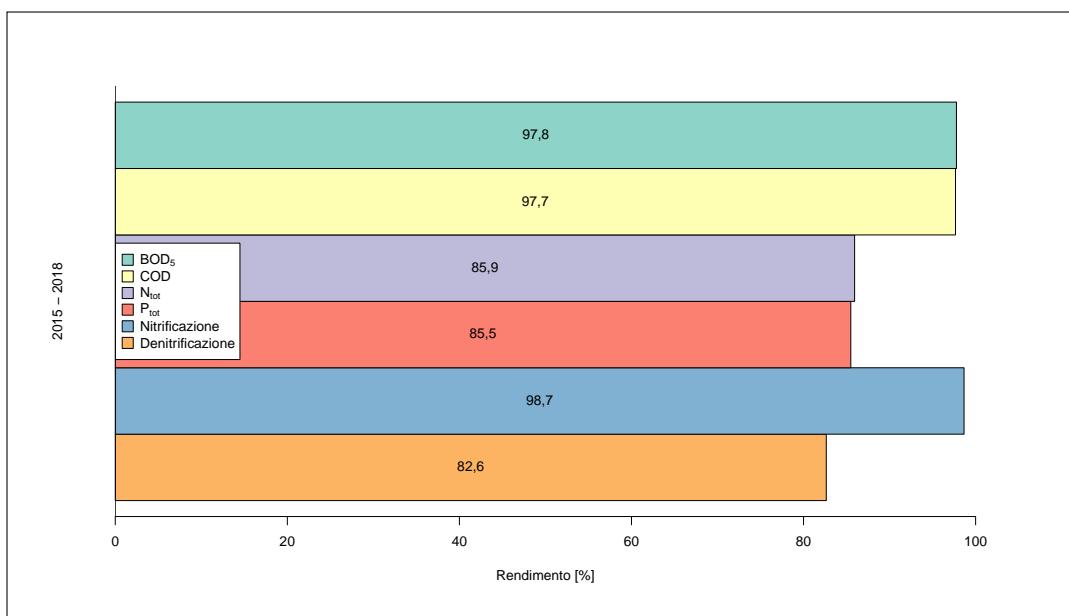


Figura 5.1.90: Rendimenti di rimozione complessivi per il periodo 2015 - 2018

5.1.2.4 Parametri operativi

La concentrazione di SST nella vasca di ossidazione è variabile, con gran parte dei valori compresa tra 4 e 6 g/L (Figura 5.1.91). Non si individua correlazione tra concentrazione di SST e carico in ingresso di COD.

Anche la concentrazione di SST nel fango di ricircolo è piuttosto variabile (Figura 5.1.92). I valori sono principalmente compresi tra 6 e 12 g/L, cioè circa il doppio del valore misurato nella vasca di ossidazione.

La Figura 5.1.93 confronta gli andamenti del volume del fango e dello SVI nella vasca di ossidazione. I due parametri non sono correlati e si nota che le caratteristiche di sedimentabilità del fango non sono ottimali poiché, frequentemente, lo SVI supera il valore di 150 mL/g. In realtà, essendo lo SVI calcolato a partire da un fango molto voluminoso, i valori ottenuti non sono particolarmente significativi.

La portata del fango di supero è molto oscillante e si mantiene abbastanza stabile nel tempo. Si precisa che i numerosi valori pari a 0 m³/d si hanno in corrispondenza di quei giorni in cui non si ha estrazione del fango di supero dal fondo del sedimentatore (Figura 5.1.94).

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

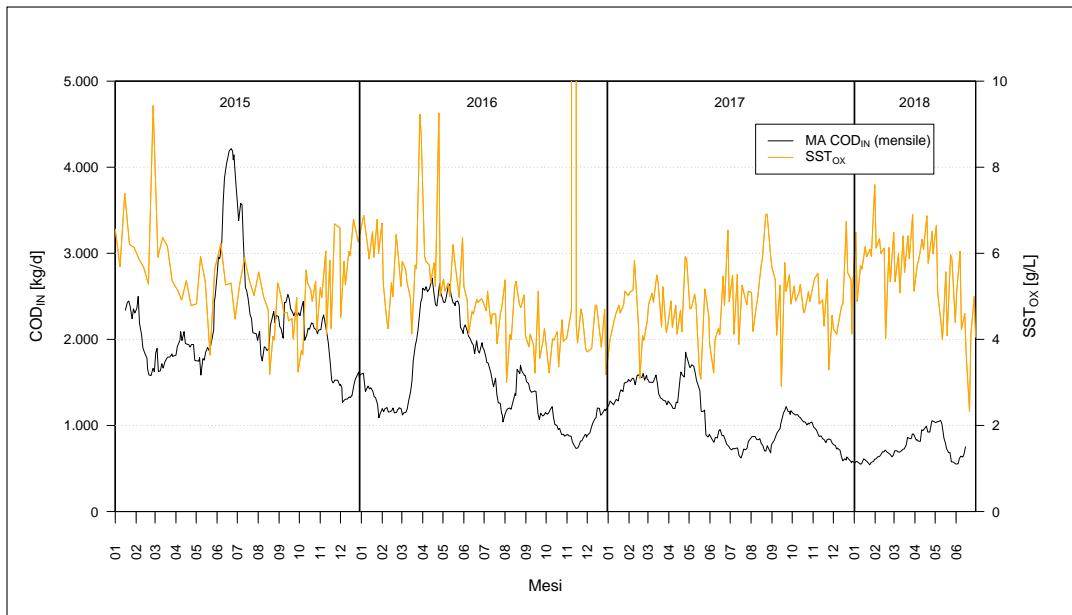


Figura 5.1.91: Andamento della concentrazione di SST nella vasca di ossidazione e del carico in ingresso di COD

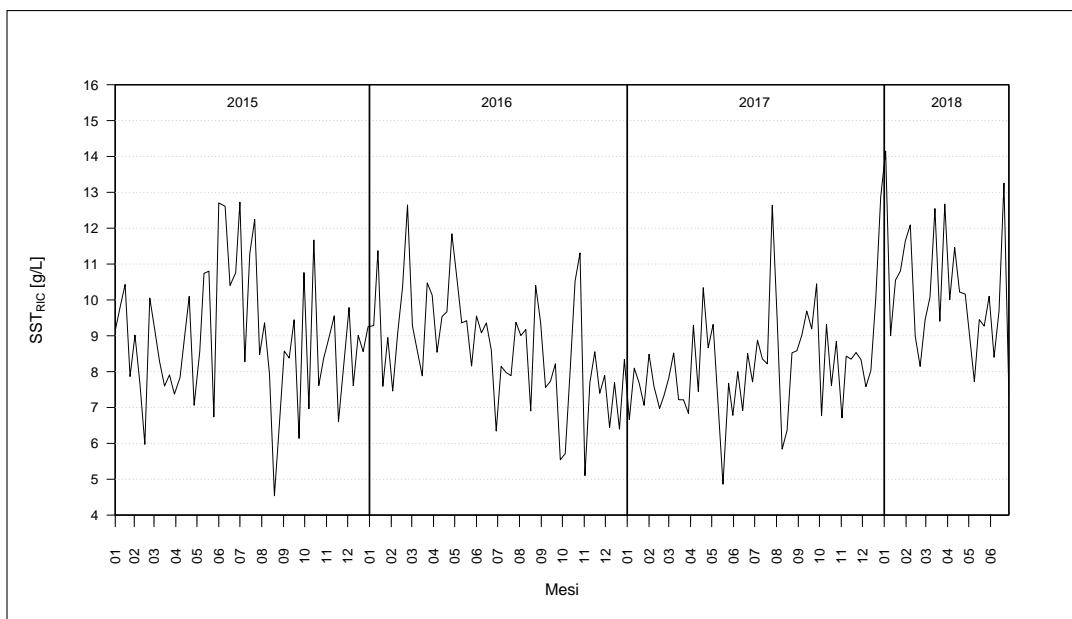


Figura 5.1.92: Andamento della concentrazione di SST nel fango di ricircolo

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

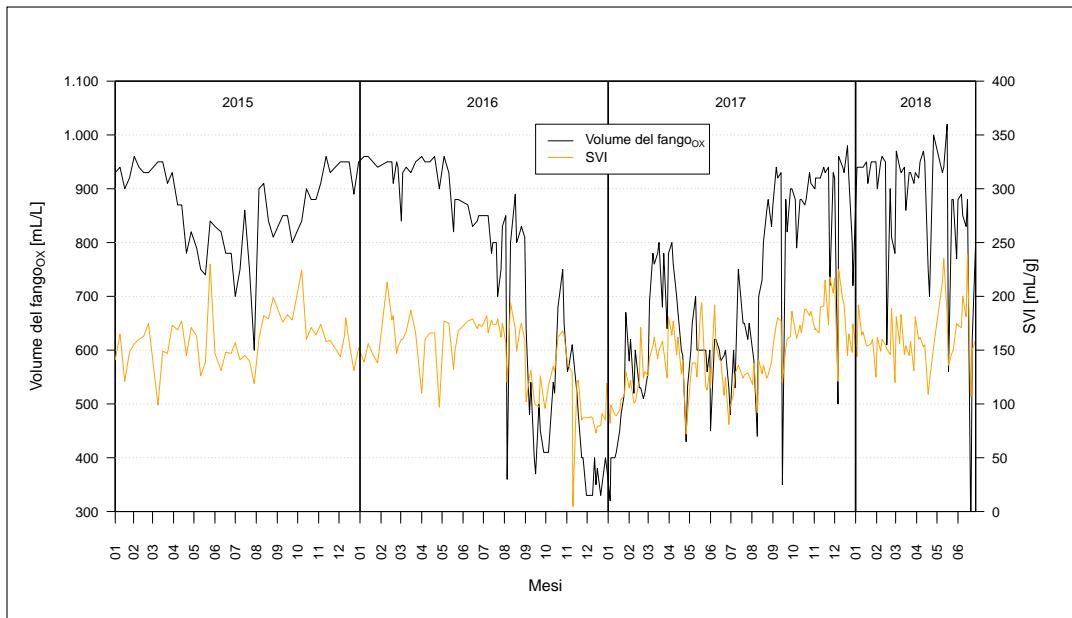


Figura 5.1.93: Andamento della concentrazione di SSS e SVI nella vasca di ossidazione

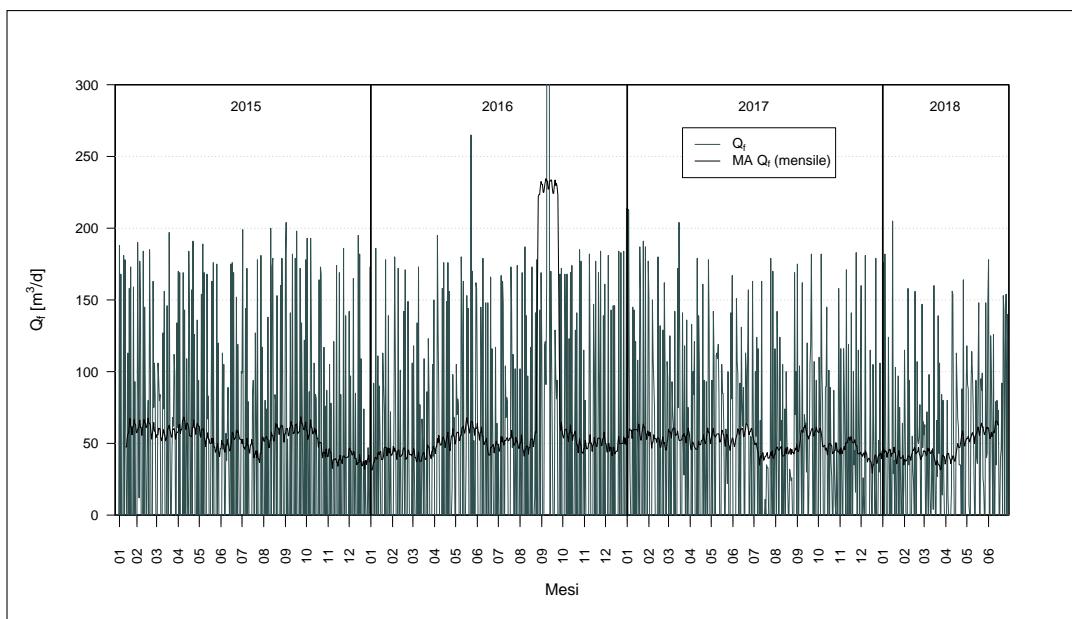


Figura 5.1.94: Andamento della portata del fango di supero

I valori del carico del fango sono generalmente bassi (con media pari a $0,12 \text{ d}^{-1}$) e quindi favoriscono il processo di nitrificazione. Si nota un trend decrescente (Figura 5.1.95).

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

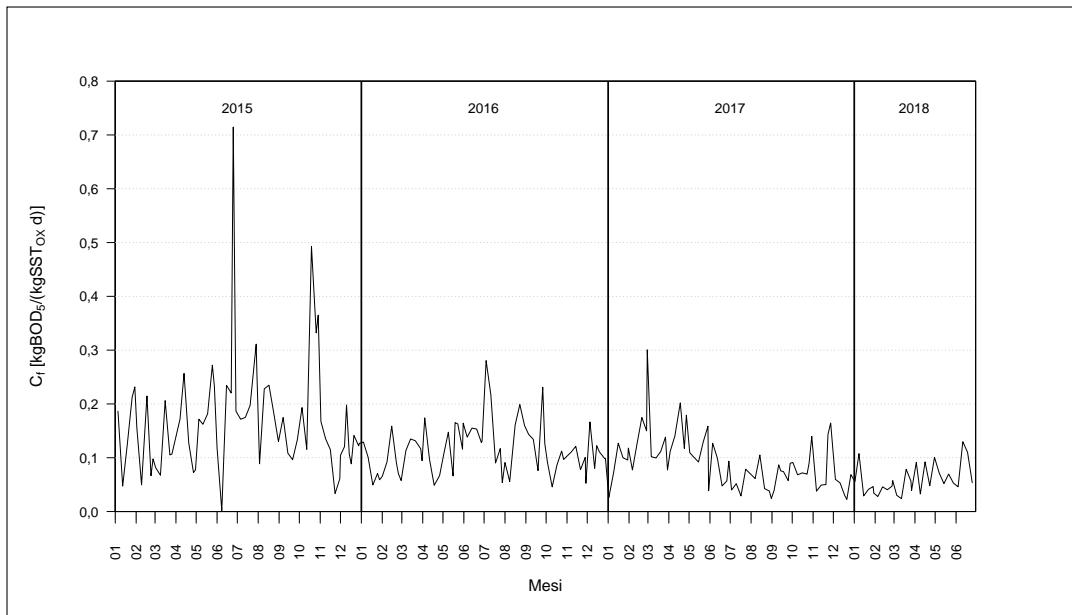


Figura 5.1.95: Andamento del carico del fango

L’andamento dell’età del fango è abbastanza variabile (attorno al valore medio di 11 giorni) e in particolare mostra una diminuzione repentina nel mese di settembre 2016 (Figura 5.1.96).

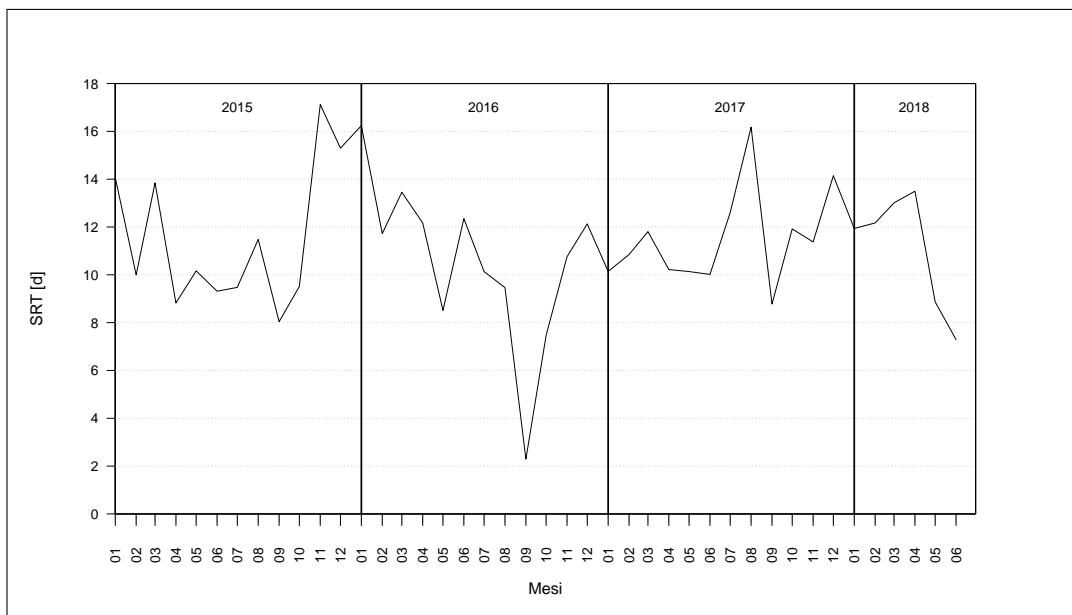


Figura 5.1.96: Andamento dell’età del fango (SRT)

La concentrazione di ossigeno disciolto (Figura 5.1.97) segue tendenzialmente l’andamento che ci si aspetta in relazione alla temperatura: è maggiore

nei mesi invernali e minore nei periodi più caldi. Presenta delle oscillazioni elevate ma, soprattutto al passare del tempo, sembra che il set point sia rispettato sempre più frequentemente.

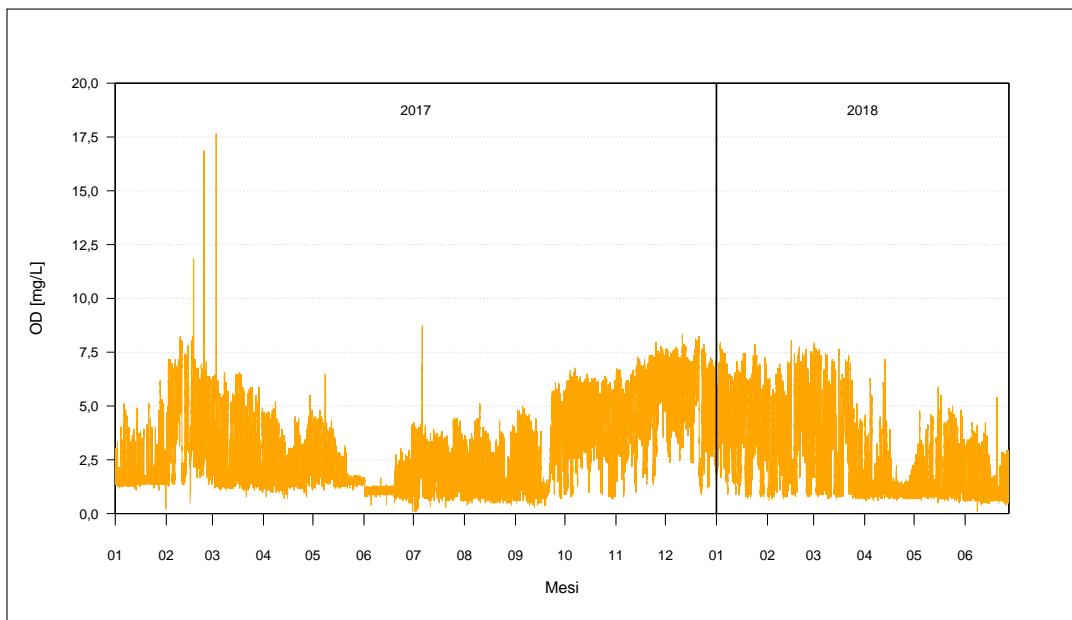


Figura 5.1.97: Andamento della concentrazione di ossigeno disciolto nella vasca di ossidazione

5.2 Statistica descrittiva - risultati

Le serie di dati possono essere descritte, oltre che attraverso l'analisi esplorativa, anche per mezzo degli indici statistici della serie (per le definizioni, si veda la sezione 4.1). I valori degli indici relativi all'impianto A sono raccolti in Tabella 5.5 e Tabella 5.6, mentre quelli riferiti all'impianto B si trovano in Tabella 5.7 e Tabella 5.8. Si precisa che, nel caso dell'impianto A, gli indici riguardanti la portata in ingresso e i carichi in ingresso sono stati calcolati escludendo l'anno 2015 perché, come già spiegato, in tale periodo la portata esibisce un comportamento anomalo.

I valori ottenuti sono una descrizione numerica del comportamento delle serie di dati e confermano le osservazioni fatte con l'analisi visuale dei *timeplot*.

In aggiunta alla rappresentazione tabulare degli indici, è utile riassumerli in forma grafica attraverso i *box plot* (si veda la sottosezione 4.1.4), come mostrato in Figura 5.2.1, Figura 5.2.2, Figura 5.2.3 e Figura 5.2.4.

IMPIANTO A - ingresso						
	Media	25° percentile	Mediana	75° percentile	Varianza	Dev. St.
Q [m ³ /d]	2.712,65	2.324,00	2.532,00	2.831,50	572.104,60	756,38
pH	7,81	7,69	7,86	7,99	0,0552	0,03
T[°C]	18,57	13,70	18,40	23,10	27,15	5,21
Concentrazioni (2015 - 2018)						
BOD ₅ [mg/L]	300,85	208,50	281,00	370,00	16.058,24	126,72
COD [mg/L]	668,55	418,50	608,00	831,50	130.731,00	361,57
SST [mg/L]	328,56	201,00	304,00	400,00	35.854,58	189,35
N _{tot} [mg/L]	68,33	54,60	68,60	80,00	430,41	20,75
N-NH ₄ ⁺ [mg/L]	52,30	42,35	50,39	62,87	233,85	15,29
N-NO ₂ ⁻ [mg/L]	0,098	0,010	0,026	0,172	0,0143	0,1198
N-NO ₃ ⁻ [mg/L]	0,58	0,50	0,50	0,60	0,0506	0,2250
P _{tot} [mg/L]	8,22	6,20	7,80	9,70	11,44	3,38
E. coli [UFC/100 mL]	3,86 x 10 ⁶	6,9 x 10 ⁵	3,5 x 10 ⁶	4,6 x 10 ⁶	2,28 x 10 ¹³	4,78 x 10 ⁶
Rapporti (2015 - 2018)						
BOD ₅ /COD [-]	0,50	0,40	0,48	0,58	0,0351	0,1876
N _{tot} /BOD ₅ [-]	0,25	0,18	0,23	0,30	0,0108	0,0138
N _{tot} /COD [-]	0,12	0,09	0,12	0,14	0,0019	0,0439
P _{tot} /BOD ₅ [-]	0,029	0,023	0,028	0,034	0,0001	0,0101
P _{tot} /COD [-]	0,014	0,011	0,014	0,016	0,00002	0,0049
P _{tot} /N _{tot} [-]	0,134	0,101	0,119	0,133	0,0173	0,1319
Carichi (2016 - 2018)						
BOD ₅ [kg/d]	789,44	532,59	724,34	984,72	144.429,80	380,04
COD [kg/d]	1.794,54	1.107,08	1.423,96	2.212,28	1.496.189,00	1.223,19
N _{tot} [kg/d]	173,67	131,82	166,29	193,20	4.852,85	69,66
P _{tot} [kg/d]	20,85	15,26	19,42	23,99	118,63	10,89

Tabella 5.5: Indici relativi alle grandezze in ingresso - impianto A

Nota: l'unità di misura della varianza è il quadrato di quelle indicate, mentre CV e γ sono adimensionali

IMPIANTO A - uscita						
	Media	25° percentile	Mediana	75° percentile	Varianza	Dev. St.
pH	7,58	7,43	7,61	7,75	0,05	0,03
T [°C]	18,68	13,50	18,60	23,50	29,30	0,29
Concentrazioni						
BOD ₅ [mg/L]	7,54	4,00	6,00	10,00	18,50	0,57
COD [mg/L]	20,78	11,00	18,00	26,00	145,06	12,04
SST [mg/L]	8,23	4,00	6,00	10,00	28,90	5,38
N _{tot} [mg/L]	10,18	8,20	10,05	11,78	12,00	3,46
N-NH ₄ ⁺ [mg/L]	1,16	0,39	0,39	0,78	4,04	2,01
N-NO ₂ ⁻ [mg/L]	0,074	0,010	0,010	0,100	0,0127	0,1125
N-NO ₃ ⁻ [mg/L]	7,36	5,60	7,40	9,05	5,88	2,43
P _{tot} [mg/L]	1,57	0,90	1,38	1,98	0,81	0,90
E. coli [UFC/100 mL]	3.756,48	20,25	245,00	3.000,00	9,96 x 10 ⁷	9,980,26

IMPIANTO A - parametri operativi						
	Media	25° percentile	Mediana	75° percentile	Varianza	Dev. St.
SSTox1 [g/L]	3,38	2,57	3,19	3,99	1,20	1,10
SSTox2 [g/L]	3,73	3,01	3,54	4,37	0,99	0,99
SSTox3 [g/L]	4,73	3,57	4,57	5,87	2,38	1,54
SSTRic1 [g/L]	4,54	3,46	4,35	5,31	2,75	1,66
SSTRic2 [g/L]	5,02	3,79	4,78	5,96	2,88	1,70
SSTRic3 [g/L]	6,38	4,87	6,17	7,72	5,59	2,36
SSSox1 [mL/L]	589,22	320,00	623,57	878,06	79.656,43	282,23
SSSox2 [mL/L]	661,60	414,88	694,37	905,71	63.503,85	252,12
SSSox3 [mL/L]	700,37	557,50	753,10	878,43	49.435,21	222,34
SVI ₁ [mL/g]	163,73	109,04	173,07	209,35	2.893,95	53,80
SVI ₂ [mL/g]	192,71	134,00	185,86	213,96	36.689,57	191,55
SVI ₃ [mL/g]	153,10	130,57	152,00	170,84	1.407,76	37,52
Q _f [m ³ /d]	126,75	0,00	100,00	300,00	17.359,06	131,75
C _f [d ⁻¹]	0,09	0,05	0,07	0,38	0,0025	0,0499
SRT [d]	18,09	14,40	17,13	19,52	37,49	6,12
OD linea 1 e 2 [mg/L]	2,90	1,42	2,60	4,02	4,39	2,10
OD linea 3 [mg/L]	4,34	2,79	3,87	5,49	3,58	1,89

Tabella 5.6: Indici relativi alle grandezze in uscita e ai parametri operativi - impianto A

Nota: l'unità di misura della varianza è il quadrato di quelle indicate, mentre CV e γ sono adimensionali

IMPIANTO B - ingresso						
	Media	25° percentile	Mediana	75° percentile	Varianza	Dev. St.
Q [m ³ /d]	1.610,13	1.329,00	1.567,00	1.860,00	142.664,20	377,71
pH	7,68	7,47	7,67	7,86	0,0691	0,03
T [°C]	17,44	12,11	17,10	22,10	28,33	5,32
Concentrazioni						
BOD ₅ [mg/L]	508,49	222,00	338,50	447,25	48.701,96	220,69
COD [mg/L]	905,95	522,50	799,50	1.109,25	333.608,40	577,59
SST [mg/L]	512,11	250,50	420,00	690,00	185.618,20	430,83
N _{tot} [mg/L]	59,31	48,00	57,70	69,00	322,79	17,97
N-NH ₄ ⁺ [mg/L]	36,44	28,63	34,94	42,82	127,72	11,30
N-NO ₂ ⁻ [mg/L]	0,113	0,010	0,069	0,172	0,0207	0,1438
N-NO ₃ ⁻ [mg/L]	0,63	0,50	0,50	0,60	0,08	0,29
P _{tot} [mg/L]	8,07	5,80	7,40	9,90	9,65	3,11
E. coli [UFC/100 mL]	4.41 x 10 ⁶	6,08 x 10 ⁵	3,80 x 10 ⁶	5,55 x 10 ⁶	2,57 x 10 ³	5,07 x 10 ⁶
Rapporti						
BOD ₅ /COD [-]	0,44	0,33	0,42	0,53	0,0242	0,1556
N _{tot} /BOD ₅ [-]	0,19	0,14	0,17	0,21	0,0066	0,0813
N _{tot} /COD [-]	0,08	0,05	0,07	0,10	0,0015	0,0387
P _{tot} /BOD ₅ [-]	0,026	0,019	0,024	0,030	0,0002	0,0134
P _{tot} /COD [-]	0,011	0,007	0,010	0,014	0,0004	0,0061
P _{tot} /N _{tot} [-]	0,142	0,110	0,128	0,158	0,0024	0,0486
Carichi						
BOD ₅ [kg/d]	593,03	336,62	516,55	731,88	165.389,70	406,68
COD [kg/d]	1.468,59	774,79	1.203,28	1.870,60	1.112.837,00	1.054,911
N _{tot} [kg/d]	93,99	69,35	88,74	112,49	1.278,15	35,75
P _{tot} [kg/d]	13,84	8,58	11,18	16,51	93,66	9,68

Tabella 5.7: Indici relativi alle grandezze in ingresso - impianto B

Nota: l'unità di misura della varianza è il quadrato di quelle indicate, mentre CV e γ sono adimensionali

IMPIANTO B - uscita						
	Media	25° percentile	Mediana	75° percentile	Varianza	Dev. St.
pH	7,56	7,38	7,56	7,71	0,06	0,24
T [°C]	17,49	12,00	17,30	21,90	30,55	5,53
Concentrazioni						
BOD ₅ [mg/L]	8,10	4,18	7,00	10,00	16,51	4,06
COD [mg/L]	21,17	11,00	19,00	26,00	147,05	12,13
SST [mg/L]	8,23	4,00	6,00	10,00	32,45	5,70
N _{tot} [mg/L]	8,30	6,10	7,60	10,75	9,87	3,14
N-NH ₄ ⁺ [mg/L]	0,52	0,39	0,39	0,47	0,23	0,48
N-NO ₂ ⁻ [mg/L]	0,027	0,010	0,010	0,022	0,0024	0,0488
N-NO ₃ ⁻ [mg/L]	6,84	4,90	6,10	7,78	9,73	3,12
P _{tot} [mg/L]	1,26	0,77	1,30	1,73	0,33	0,57
E. coli [UFC/100 mL]	215,07	7,25	20,00	61,50	454,786,40	674,38

IMPIANTO B - parametri operativi						
	Media	25° percentile	Mediana	75° percentile	Varianza	Dev. St.
SSTOX [g/L]	6,88	4,36	5,05	5,73	1,076,79	32,81
SSTRIC [g/L]	8,84	7,82	8,66	9,65	2,34	1,53
SSSOX [mL/L]	786,20	685,18	842,00	930,00	29,769,46	172,54
SVI [mL/g]	151,72	134,22	154,80	171,55	874,78	29,58
Q _f [m ³ /d]	54,74	0,00	0,00	100,00	10,855,87	104,19
C _f [d ⁻¹]	0,12	0,07	0,10	0,14	0,0063	0,0794
SRT [d]	11,16	9,48	11,11	12,54	7,59	2,75
OD [mg/L]	2,92	1,27	2,25	4,22	3,56	1,89

Tabella 5.8: Indici relativi alle grandezze in uscita e ai parametri operativi - impianto B

Nota: l'unità di misura della varianza è il quadrato di quelle indicate, mentre CV e γ sono adimensionali

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

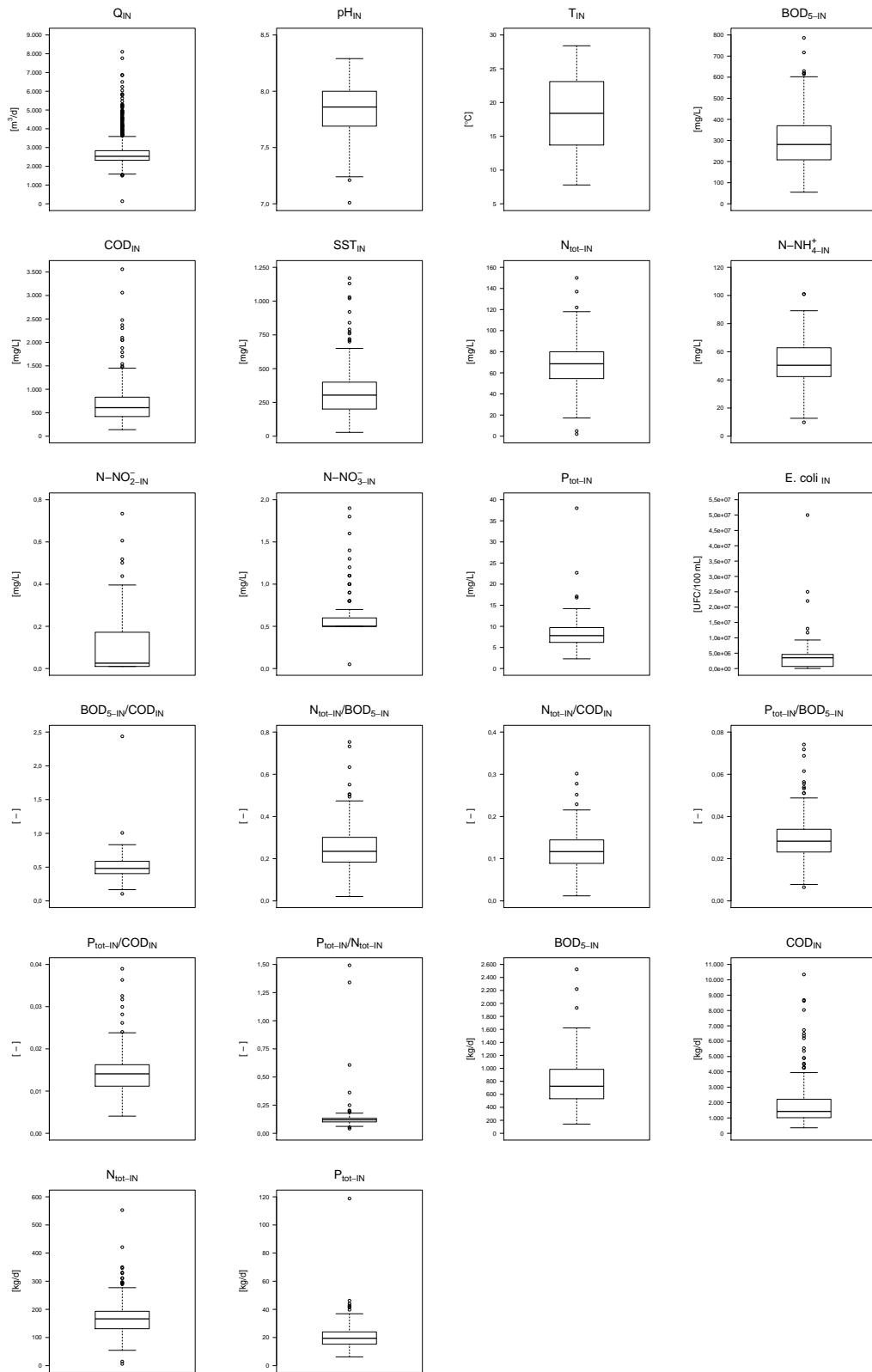


Figura 5.2.1: Box plot delle grandezze in ingresso - impianto A

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

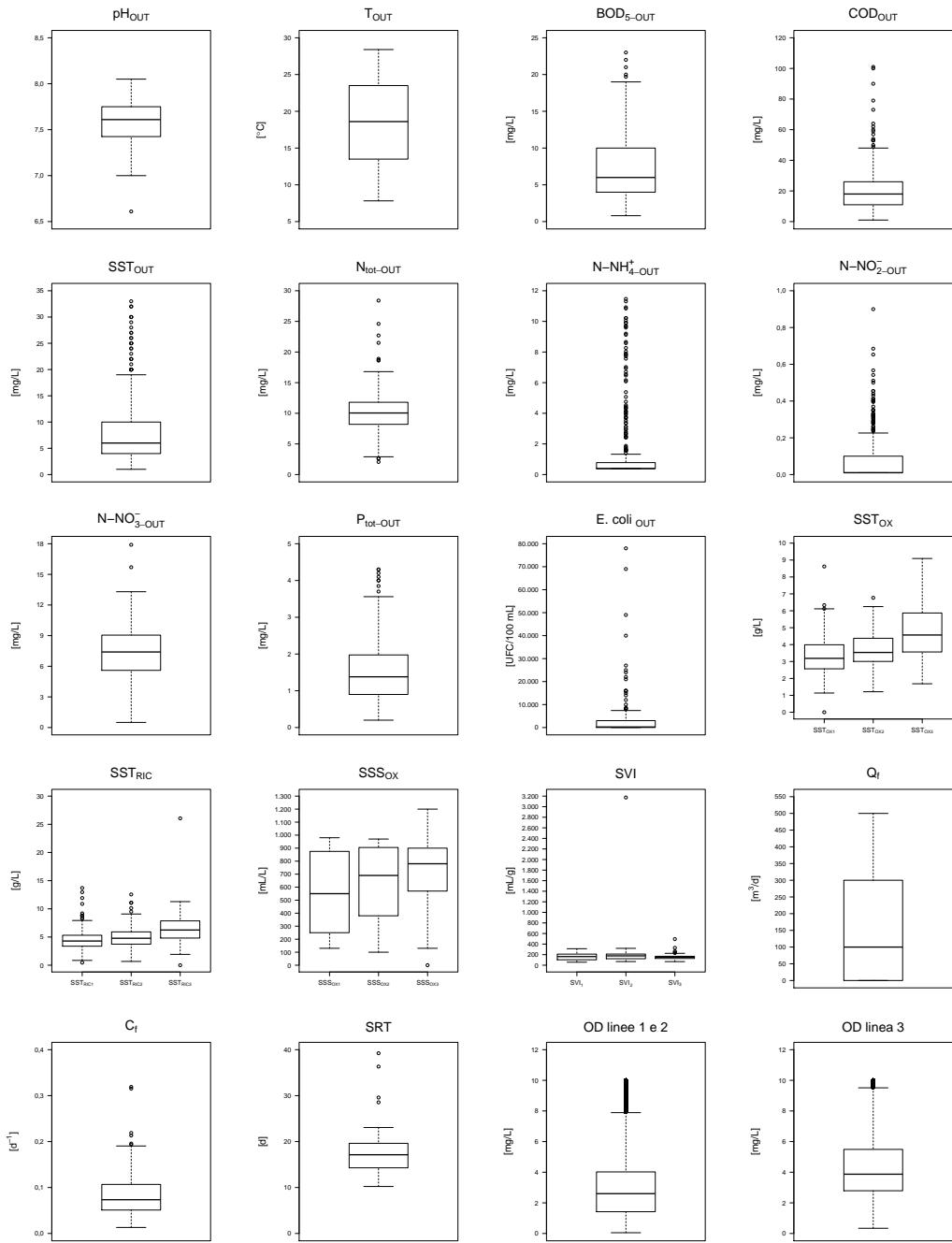


Figura 5.2.2: Box plot delle grandezze in uscita e dei parametri operativi - impianto A

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

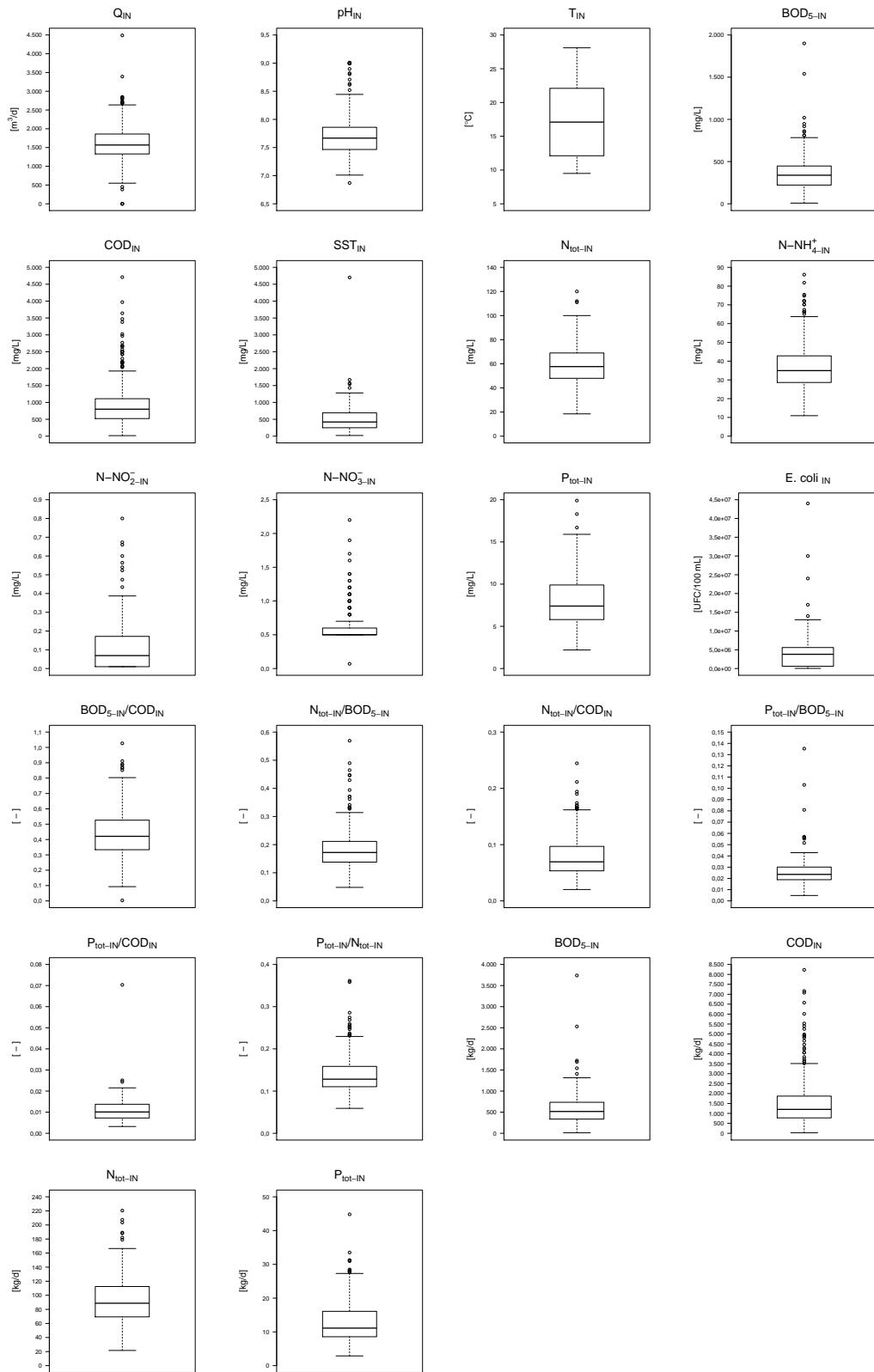


Figura 5.2.3: Box plot delle grandezze in ingresso - impianto B

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

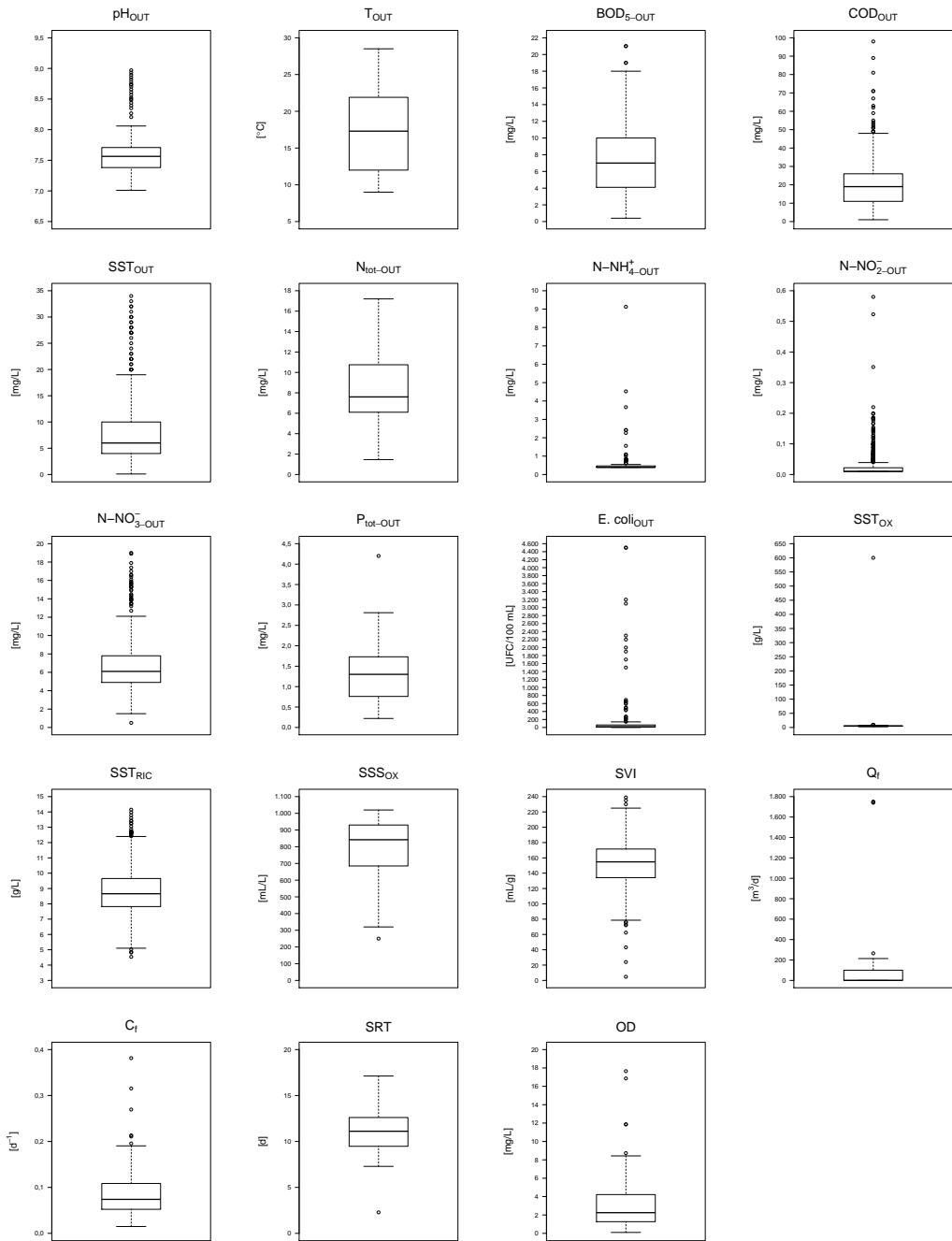


Figura 5.2.4: Box plot delle grandezze in uscita e dei parametri operativi - impianto B

5.3 Analisi degli *outliers*

L'analisi degli *outliers* è stata condotta seguendo la procedura indicata nella sezione 4.2. Si è quindi scelto di individuare i valori anomali attraverso la rappresentazione sotto forma di *box plot* (Figura 5.2.1, Figura 5.2.2, Figura 5.2.3, Figura 5.2.4). In essi, i punti esterni ai baffi sono molto numerosi e, per motivi di sintesi, di seguito saranno riportate le conclusioni a cui si è giunti esclusivamente per quei valori anomali che sono stati modificati o eliminati (e quindi sostituiti con il valore *NA*) (Tabella 5.9). Tutti gli altri, invece, sono stati conservati perché ritenuti significativi per l'analisi del funzionamento degli impianti.

In generale, per quanto riguarda concentrazioni e carichi, sia in ingresso che in uscita, si è deciso di mantenere la maggior parte dei valori anomali, soprattutto se elevati, al fine di condurre un'analisi a favore di sicurezza. Concentrazioni e carichi in ingresso consistenti potrebbero essere infatti un indizio della presenza di scarichi di tipo diverso da quello domestico (o comunque da quello che ci si aspetta) o di scarichi abusivi.

Si precisa che si è provveduto a rimuovere i valori dei rapporti $P_{\text{tot}}/\text{BOD}_5$ e $P_{\text{tot}}/\text{COD}$ in corrispondenza del 21/03/2016 poiché, in tale data, si è eliminato il valore di fosforo totale. Per gli altri rapporti, per il carico del fango e per l'età del fango, invece, si sono mantenuti tutti i valori, senza valutare quelli estremi, perché non sono stati modificati i dati con cui si sono calcolati.

Osservando i *box plot* relativi all'azoto ammoniacale, sembrerebbero esserci dei valori anomali. In realtà, essendo questi valori numerosi, come già osservato con l'analisi esplorativa, sono un indice di scarsi rendimenti di nitrificazione in alcuni periodi dell'anno. Anche nel caso dei SST_{IN} dell'impianto B si individua un punto estremo isolato che, tuttavia, non è stato ritenuto un errore di misurazione in virtù del fatto che, nella stessa data, si riscontra un valore elevato anche per il BOD_5 . Questa apparente relazione suggerisce di mantenere entrambi i valori perché potrebbero essere significativi del comportamento dell'impianto.

L'analisi degli *outliers* e il loro trattamento portano ad avere serie di dati leggermente diverse da quelle di partenza. Tuttavia, essendo il numero di dati modificati o eliminati esiguo, le conclusioni a cui si era giunti per mezzo dell'analisi esplorativa rimangono sostanzialmente invariate.

Le nuove serie di dati saranno utilizzate per condurre ulteriori analisi statistiche.

IMPIANTO A				
Parametro	Data	Valore anomalo	Nuovo valore	Motivazione
Q _{IN} [m ³ /d]	23/08/2016	138	1.380	Probabile errore di registrazione del dato
P _{tot-IN} [mg/L]	21/03/2016	38	NA	Probabile errore di misurazione
E. coli _{IN} [UFC/100 mL]	21/08/2017	50.000.000	NA	Probabile errore di misurazione
P _{tot-IN/COD} [-]	21/03/2016	0,04	NA	Conseguenza rimozione valore concentrazione P _{tot-IN}
P _{tot-IN} [kg/d]	21/03/2016	118,75	NA	Conseguenza rimozione valore concentrazione P _{tot-IN}
SST _{RIC3} [g/L]	02/11/2017	26,06	NA	Probabile errore di misurazione
SSSO _{x3} [mL/L]	27/04/2015	0	NA	Probabile errore di misurazione
SVI ₁₂ [mL/g]	10/05/2017	3.174	1.74	Probabile errore di registrazione del dato Errore di registrazione del dato
IMPIANTO B				
Parametro	Data	Valore anomalo	Nuovo valore	Motivazione
Q _{IN} [m ³ /d]	24/11/2015	0	NA	Mancato funzionamento del misuratore di portata
	01/10/2016	0	NA	Mancato funzionamento del misuratore di portata
	02/10/2016	0	NA	Mancato funzionamento del misuratore di portata
	14/02/2017	382	NA	Anomalia di funzionamento del misuratore di portata
BOD _{5-IN} [mg/L]	19/10/2015	1.540	NA	Probabile errore di misurazione
E. coli _{IN} [UFC/100 mL]	14/05/2018	44.000.000	NA	Probabile errore di misurazione
SST _{Ox} [g/L]	10/11/2016	600	NA	Probabile errore di misurazione
SVI [mL/g]	10/11/2016	4,77	NA	Conseguenza rimozione valore SST _{Ox}
	09/09/2016	1.751	NA	Probabile anomalia di funzionamento del misuratore di portata
Q _f [m ³ /d]	—	1.740	NA	Probabile anomalia di funzionamento del misuratore di portata
	11/09/2016	1.745	NA	Probabile anomalia di funzionamento del misuratore di portata
	17/02/2017 - 13:54	11,86	NA	Valore eccedente la concentrazione a saturazione
	17/02/2017 - 14:00	11,86	NA	Valore eccedente la concentrazione a saturazione
OD [mg/L]	23/02/2017 - 21:12	16,86	NA	Valore eccedente la concentrazione a saturazione
	03/03/2017 - 06:18	17,65	NA	Valore eccedente la concentrazione a saturazione

 Tabella 5.9: Trattamento degli *outliers* principali

5.4 Individuazione e rimozione del trend

L'individuazione del trend è stata fatta per mezzo del metodo di regressione lineare e del metodo LOESS seguendo quanto descritto nella sottosottosezione 4.5.1.1.

La regressione lineare è un metodo comunemente utilizzato per condurre studi di carattere ambientale proprio per la sua semplicità [Erickson et al., 2017]. Sebbene con questo metodo si evidenzi un trend esclusivamente lineare, il risultato è facilmente interpretabile e fornisce un'idea di massima relativamente al comportamento delle serie di dati a lungo termine. Poiché la scala grafica dell'asse delle ordinate varia a seconda del parametro che si rappresenta, considerare come indicatore del trend il coefficiente angolare della retta di regressione non permette di effettuare dei confronti tra grandezze diverse. Per ovviare a questo problema, si è deciso di calcolare la variazione percentuale dei dati:

$$\text{Variazione} = \frac{y_{start} - y_{end}}{y_{start}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

dove:

y_{start} = ordinata del punto della retta di regressione calcolata nell'istante temporale iniziale della *time series*;

y_{end} = ordinata del punto della retta di regressione calcolata nell'istante temporale finale della *time series*.

Un'idea per stabilire quali percentuali siano effettivamente indicative di un trend è:

- $\text{Variazione} < 10\%$: trend trascurabile;
- $10\% < \text{Variazione} < 20\%$: trend debole;
- $\text{Variazione} > 20\%$: trend marcato.

Quanto appena descritto è una proposta di interpretazione dei risultati ottenuti, la cui significatività statistica non è stata valutata in questo lavoro. Si propone di approfondire, in lavori futuri, questo aspetto per mezzo del test delle ipotesi (Capitolo 6).

Il metodo LOESS, a differenza della regressione lineare, approssima con dei polinomi l'andamento dei dati in maniera locale (sottosottosezione 4.5.1.1). Di conseguenza, esso non solo mostra l'andamento dei dati a lungo termine, ma permette di cogliere anche quei trend significativi riferiti a limitati periodi temporali. Specialmente quest'ultima proprietà lo rende adatto ad essere utilizzato per detrendizzare la serie (sottosottosezione 4.5.1.2).

Più la distanza tra la retta di regressione e la curva del metodo LOESS è piccola, più il modello di regressione lineare è rappresentativo del trend dei dati

di partenza. Anche in questo caso si suggerisce di sviluppare più in dettaglio questa idea (Capitolo 6).

In Figura 5.4.1 sono mostrate la retta di regressione e la curva del metodo LOESS per ogni serie di dati analizzata per l'impianto A.

Si noti in Figura 5.4.1(1)(19)(20)(21)(22) che si sono calcolate due rette di regressione. Ancora una volta, la spiegazione è che nell'anno 2015 la portata in ingresso esibisce un comportamento anomalo noto e quindi tale anno va considerato separatamente.

In Figura 5.4.1(11) si può notare un trend che supera la soglia del 20% e la vicinanza della retta di regressione con la curva del metodo LOESS suggerisce che quanto ottenuto per mezzo della regressione lineare è rappresentativo dell'andamento dei dati.

Viceversa, nella Figura 5.4.1(9) si osserva una situazione in cui la retta e la curva sono piuttosto distanti e quindi il risultato della regressione lineare è poco attendibile. La *time series*, infatti, ha un andamento palesemente non lineare che è correttamente individuato dal LOESS.

La situazione intermedia è mostrata in Figura 5.4.1(8). I due metodi restituiscono curve simili: la retta di regressione lineare ben evidenzia il trend decrescente, mentre il metodo LOESS, come ci si aspetta, ricalca maggiormente i trend locali.

Nel caso del pH (Figura 5.4.1(2)(23)), la variazione percentuale è inferiore al 10%. Tuttavia, data la ridotta variabilità del pH nelle acque reflue, il trend crescente va comunque considerato (da qui la necessità, come già spiegato, di approfondire l'analisi valutando la significatività dei risultati).

Infine, per quanto riguarda la temperatura (Figura 5.4.1(3)(24)), l'analisi del trend perde di significato di fronte alla preponderanza della componente periodica della serie.

La Tabella 5.10 raccoglie le variazioni percentuali ottenute con il metodo della regressione lineare. Tali valori sono stati messi a confronto con le osservazioni fatte durante l'analisi esplorativa dei dati e l'esito di questo confronto è espresso per mezzo della colorazione delle celle della tabella, secondo quanto descritto nella didascalia della stessa.

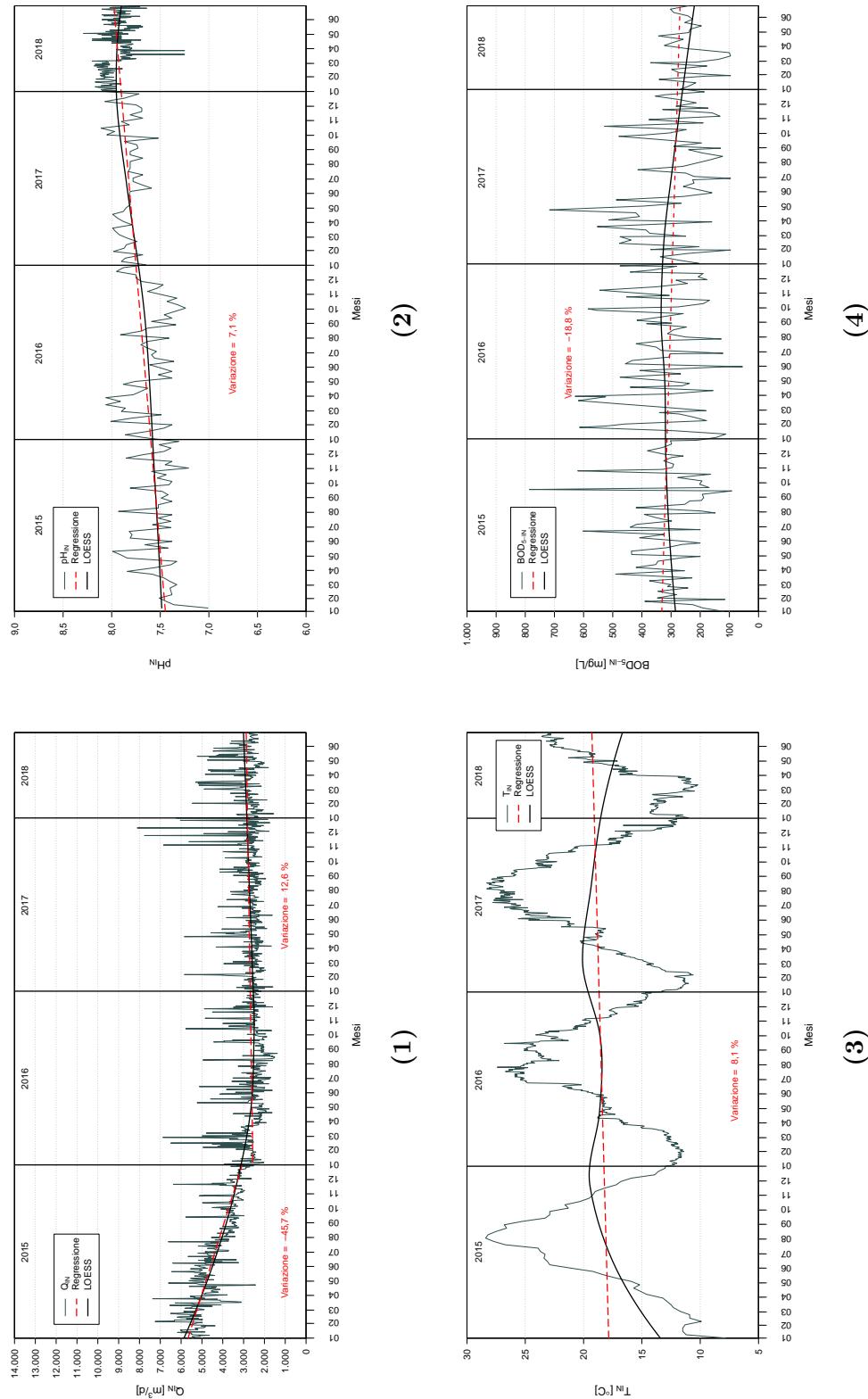


Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 1

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

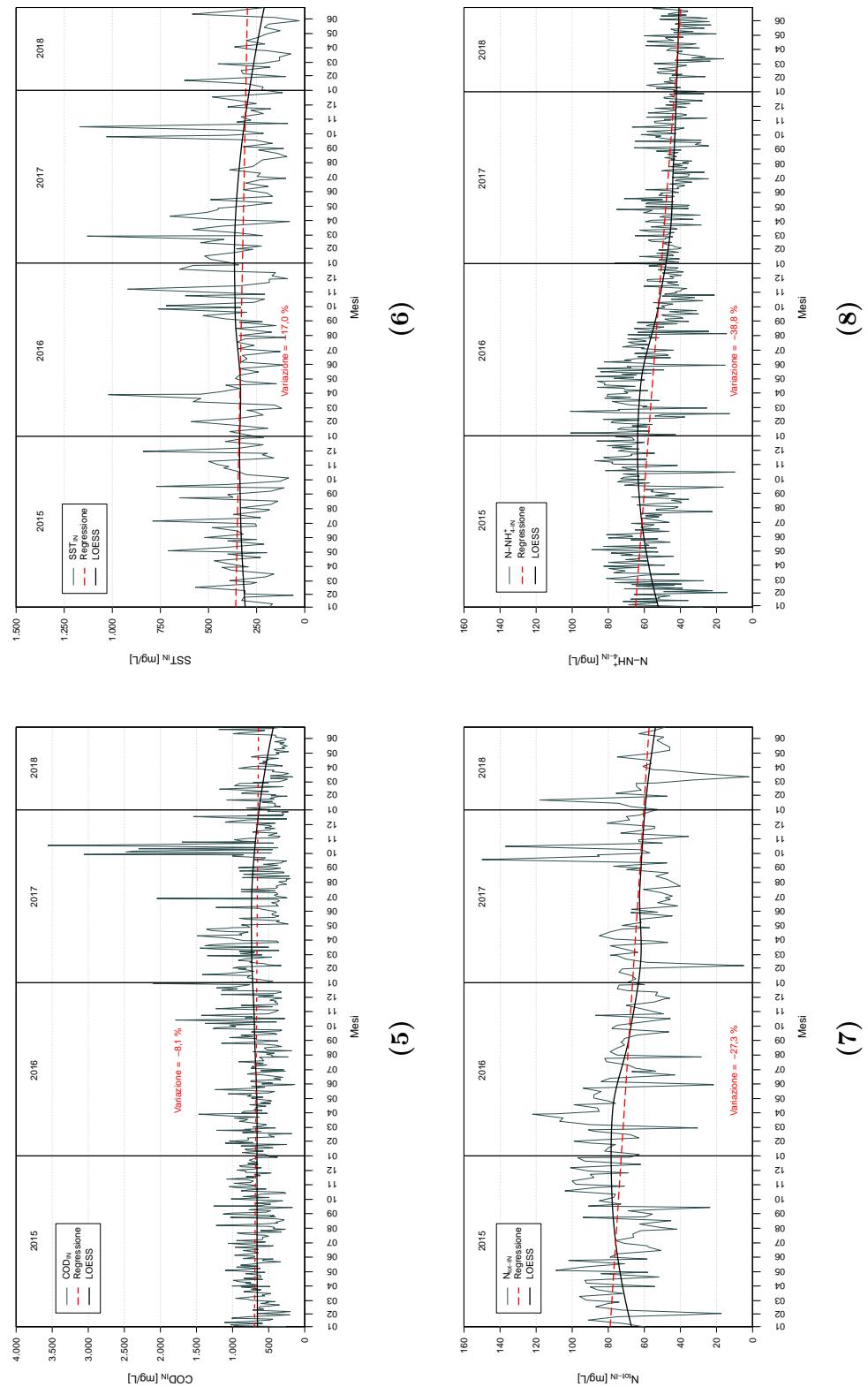


Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 2

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

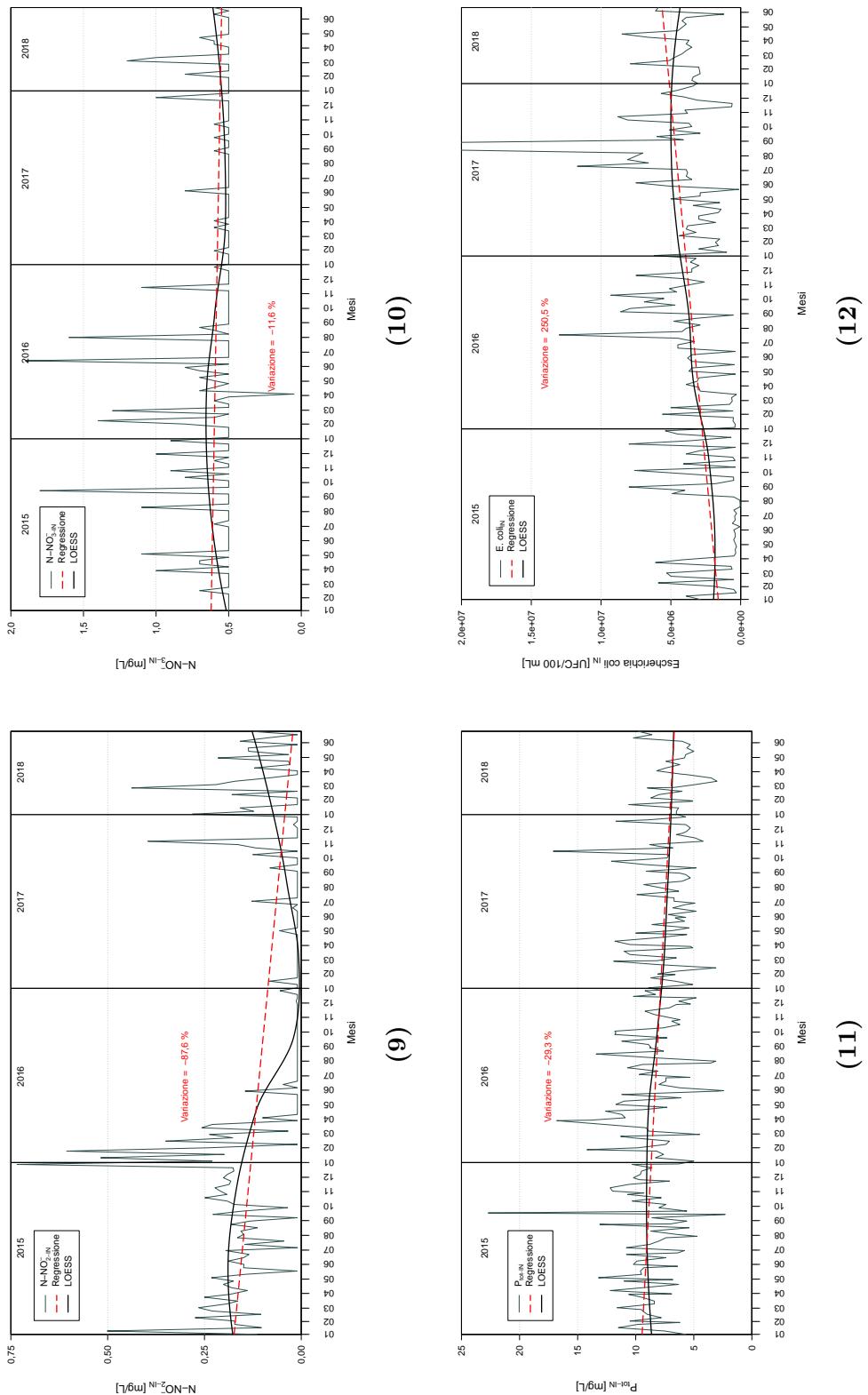


Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 3

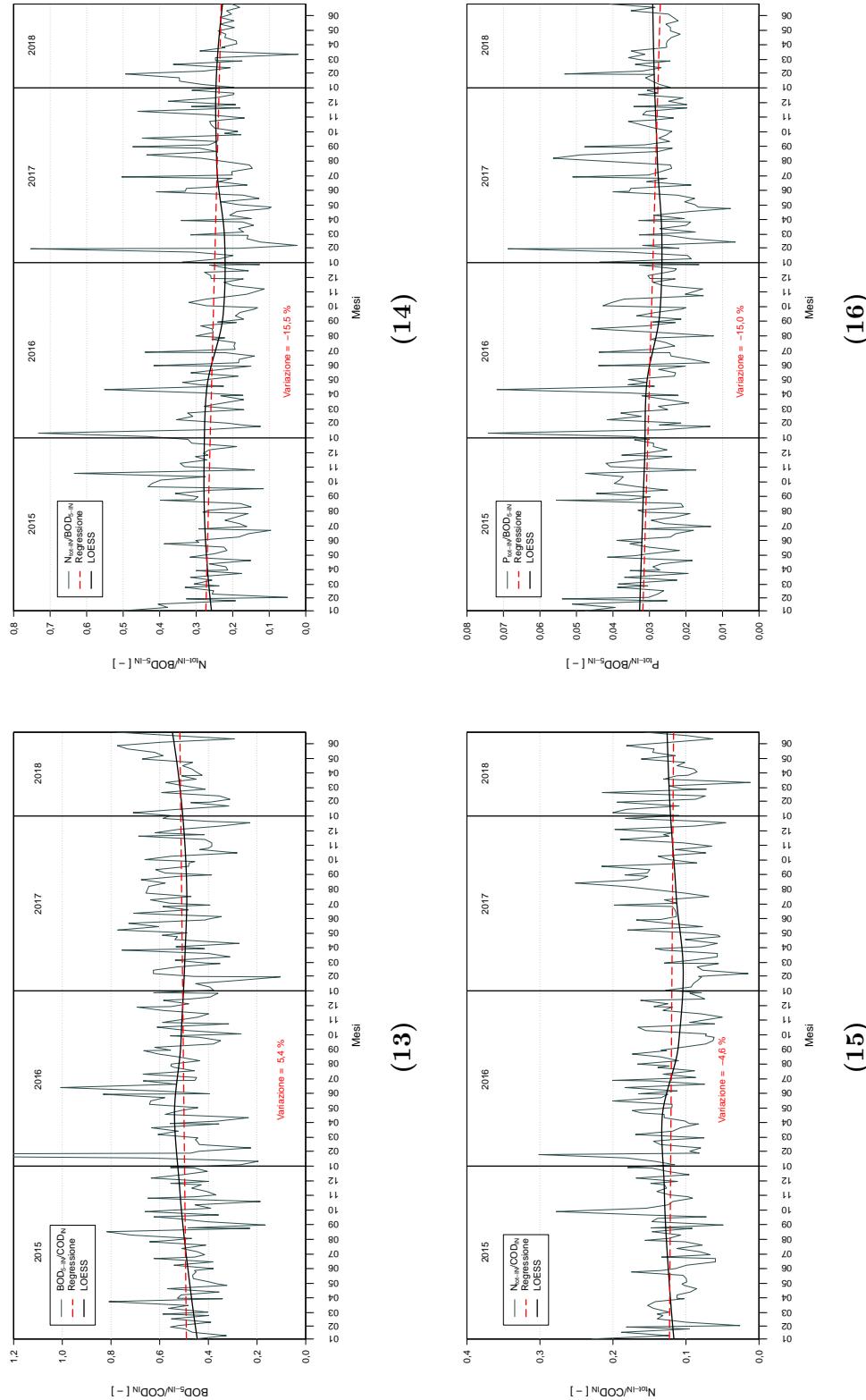
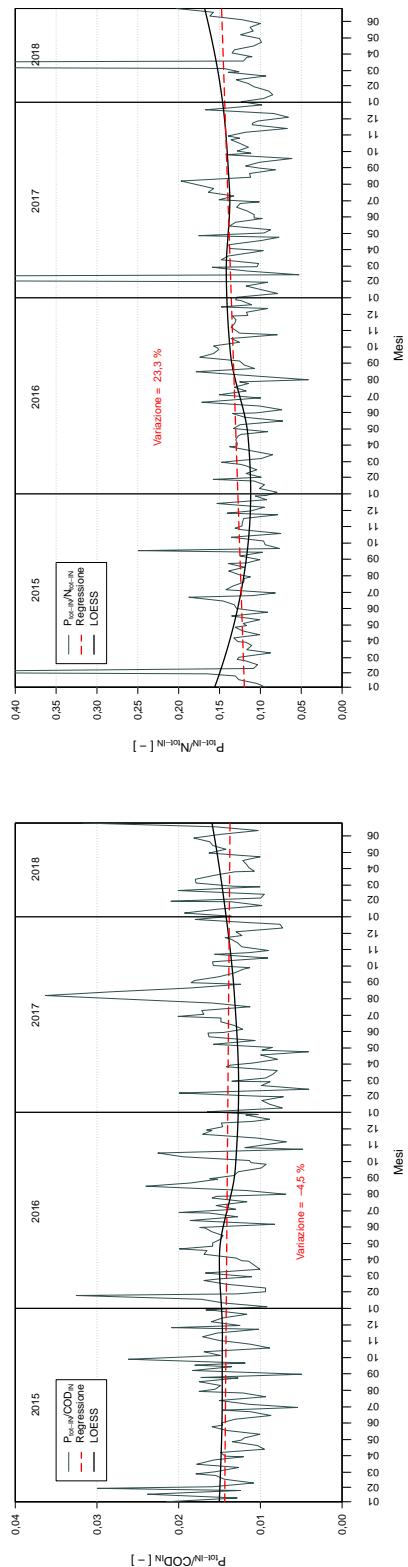
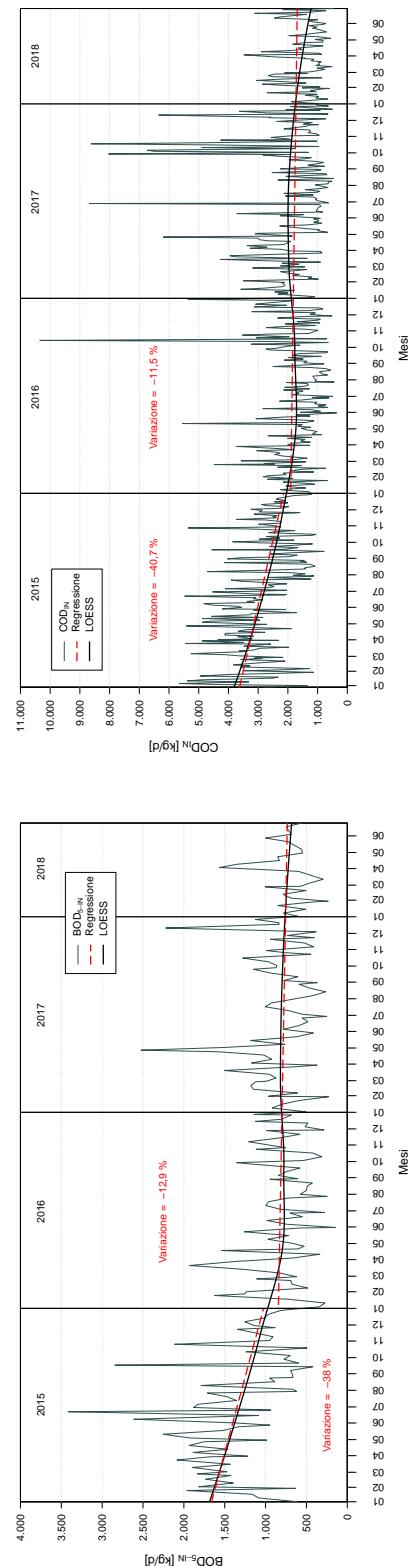


Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 4



(18)



(19)

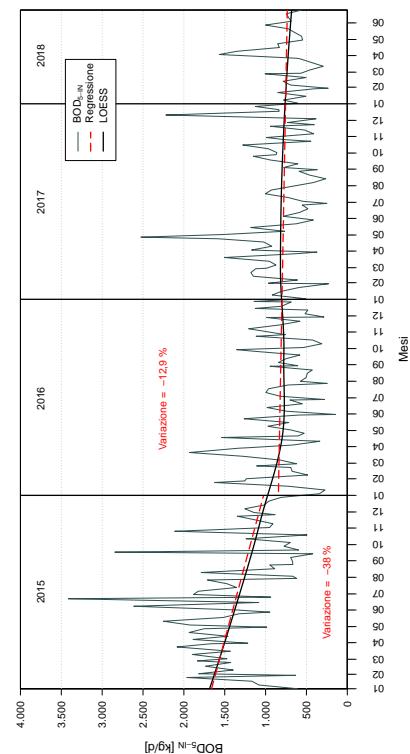
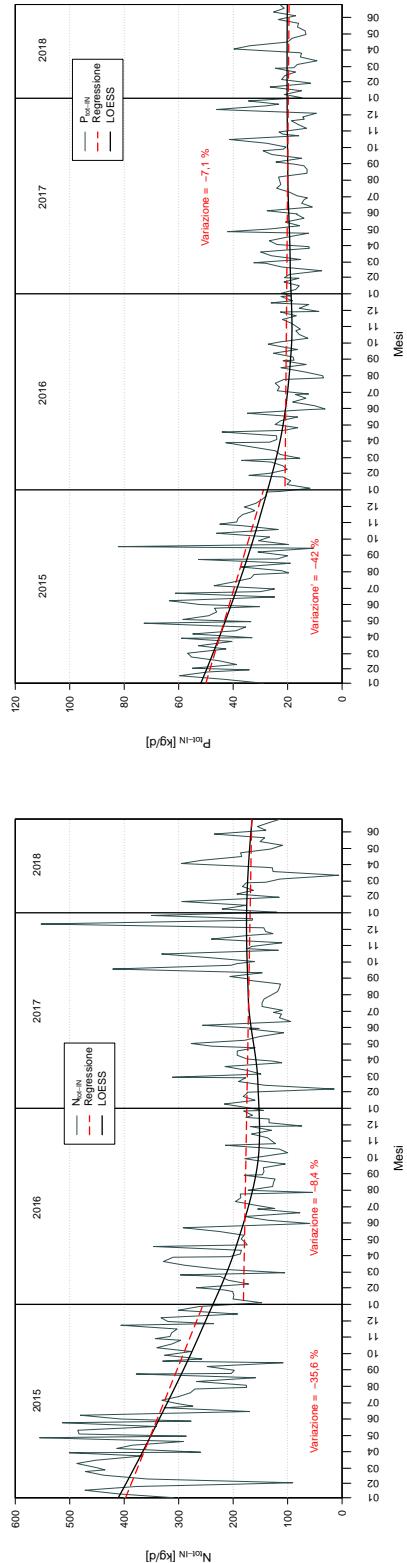
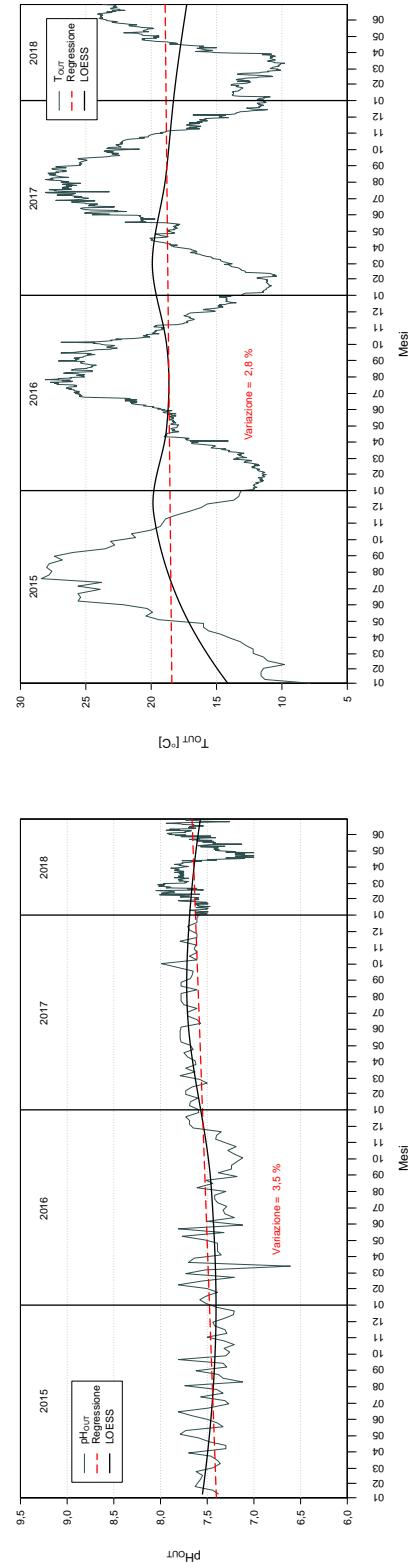


Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 5



(21)

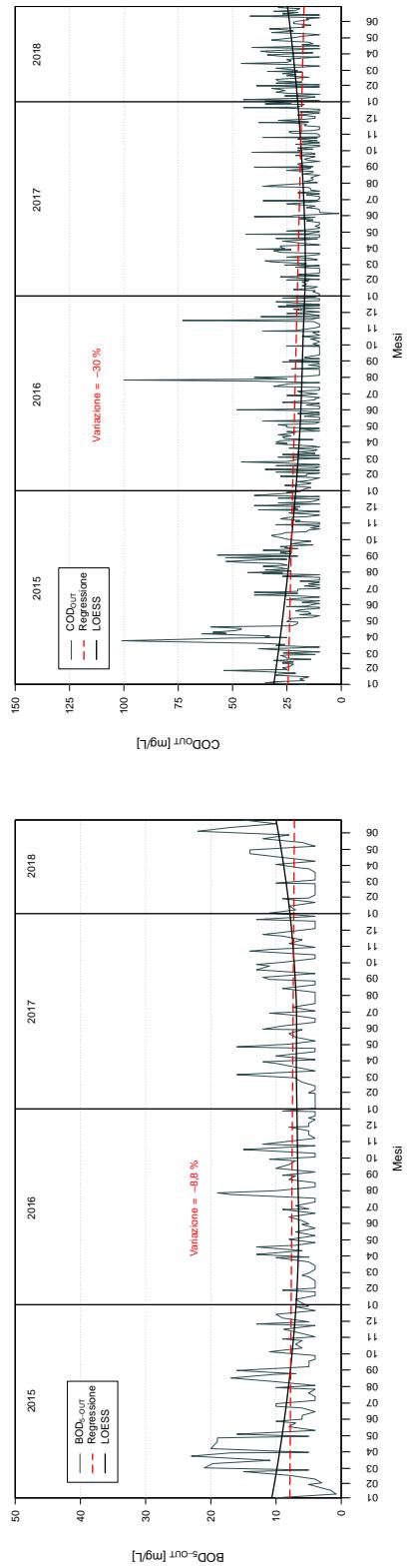


(22)

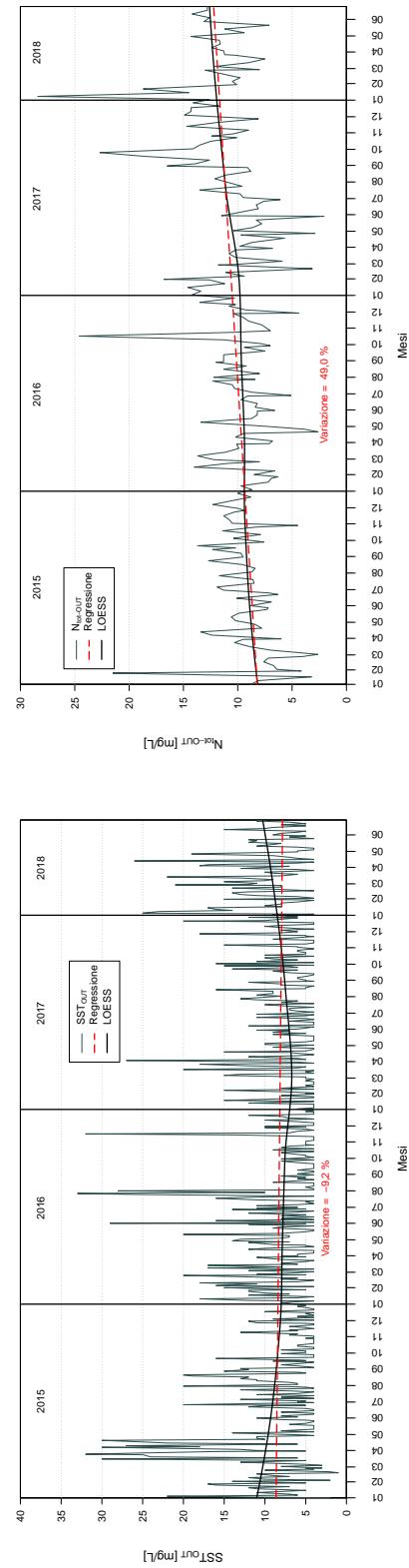
(23)

(24)

Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 6

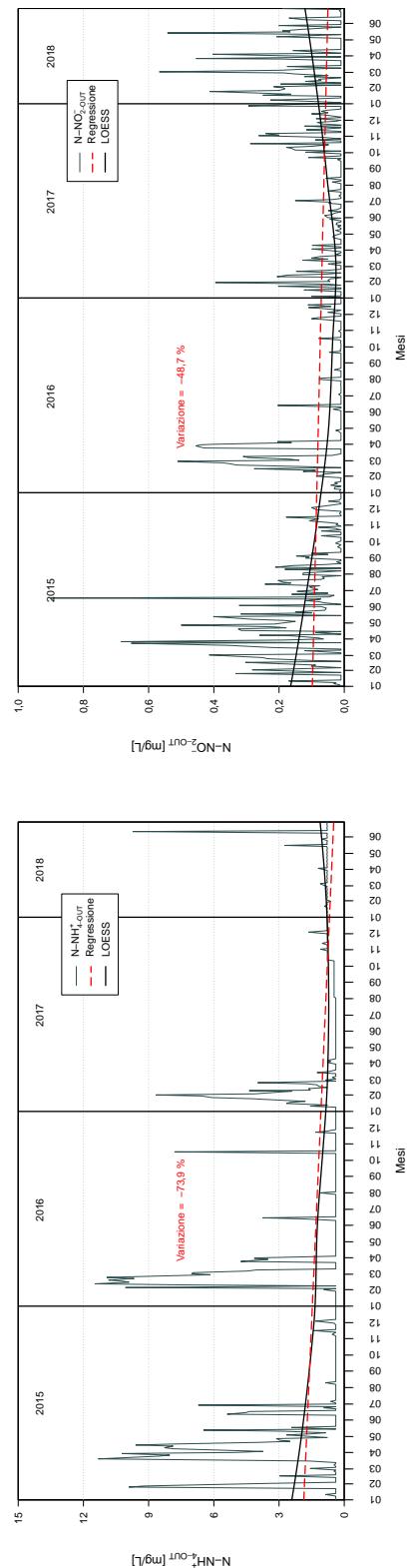


(26)

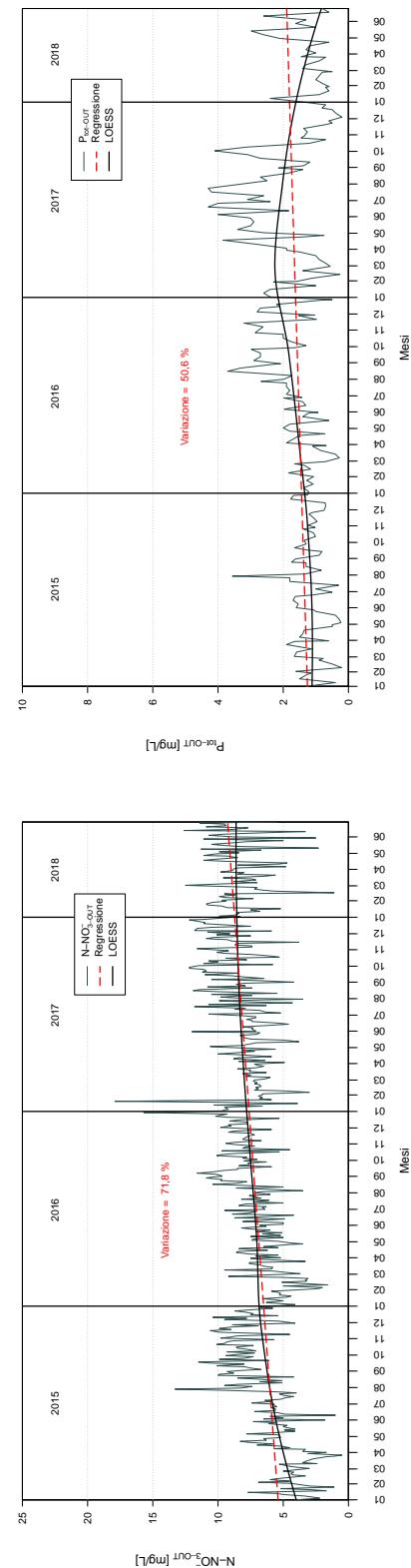


(28)

Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 7

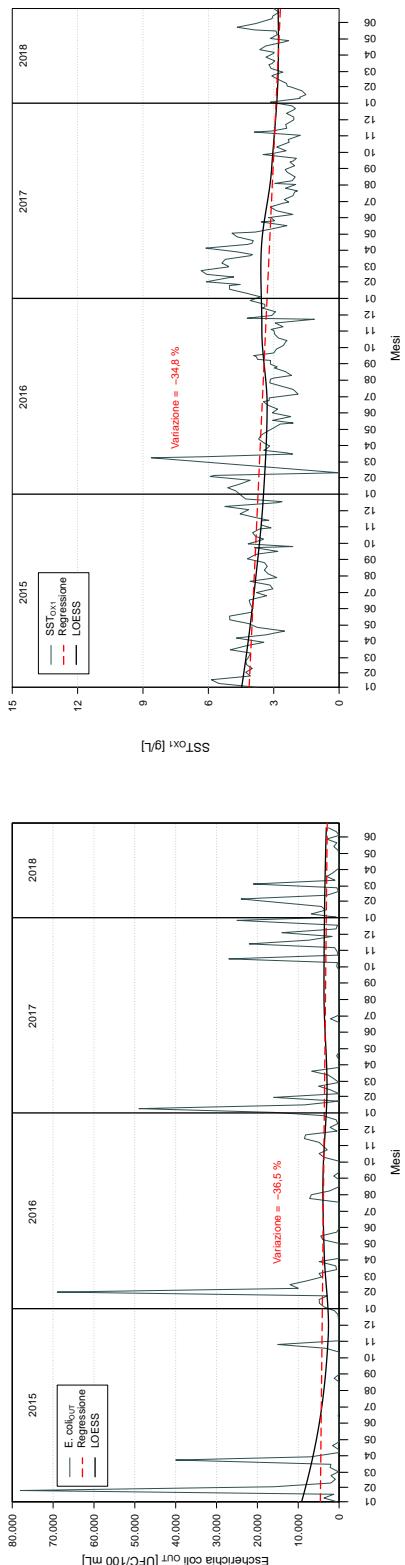


(30)

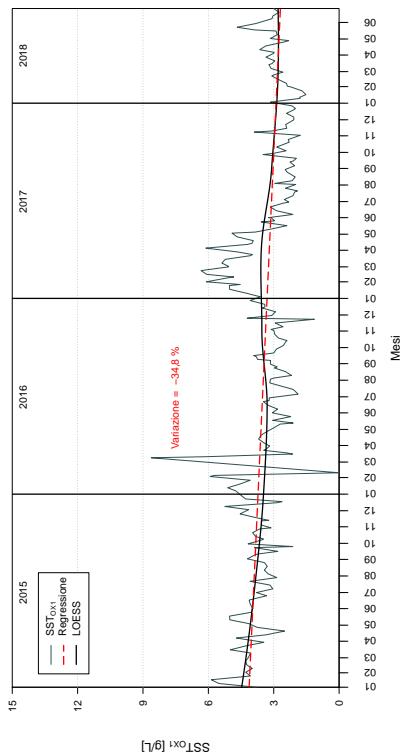


(31)

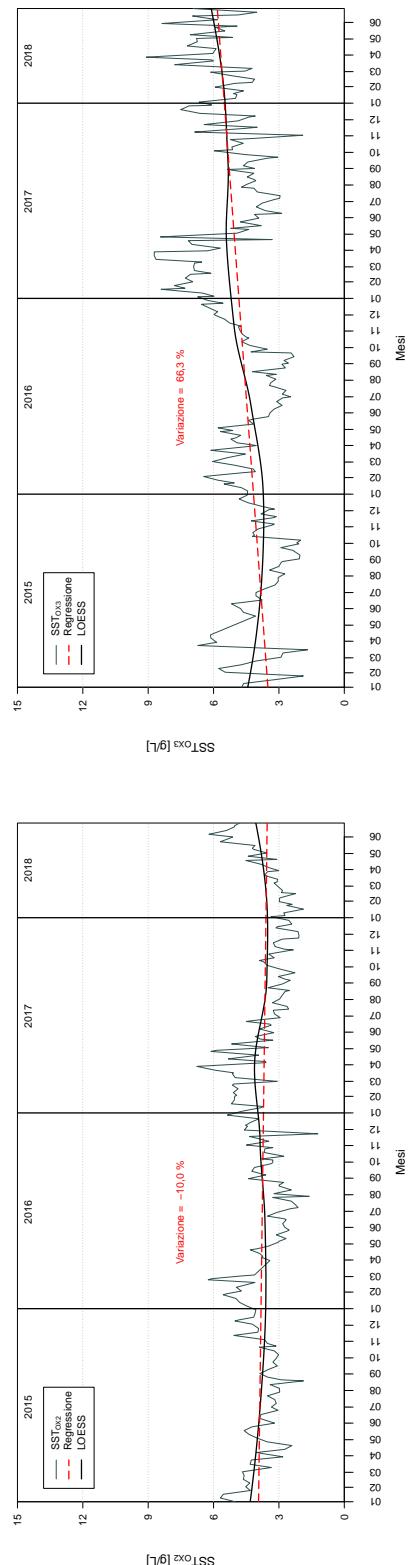
Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 8



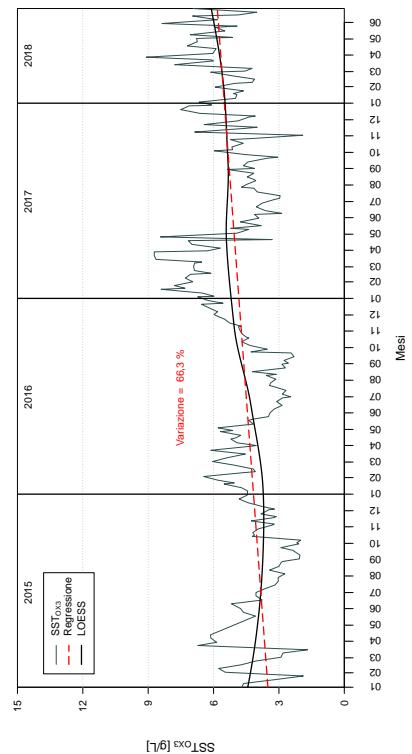
(33)



(34)

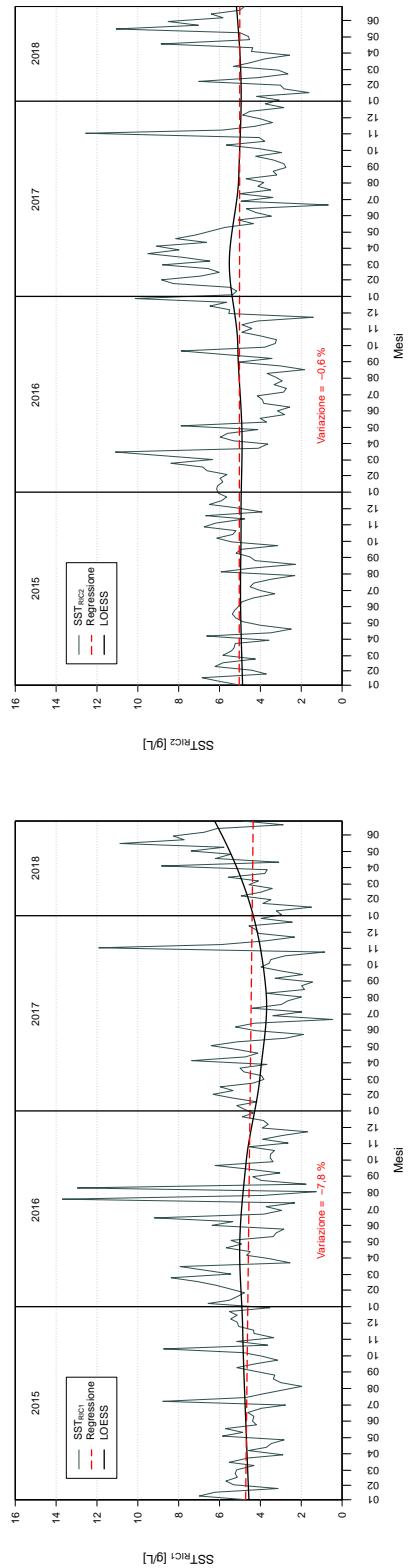


(35)

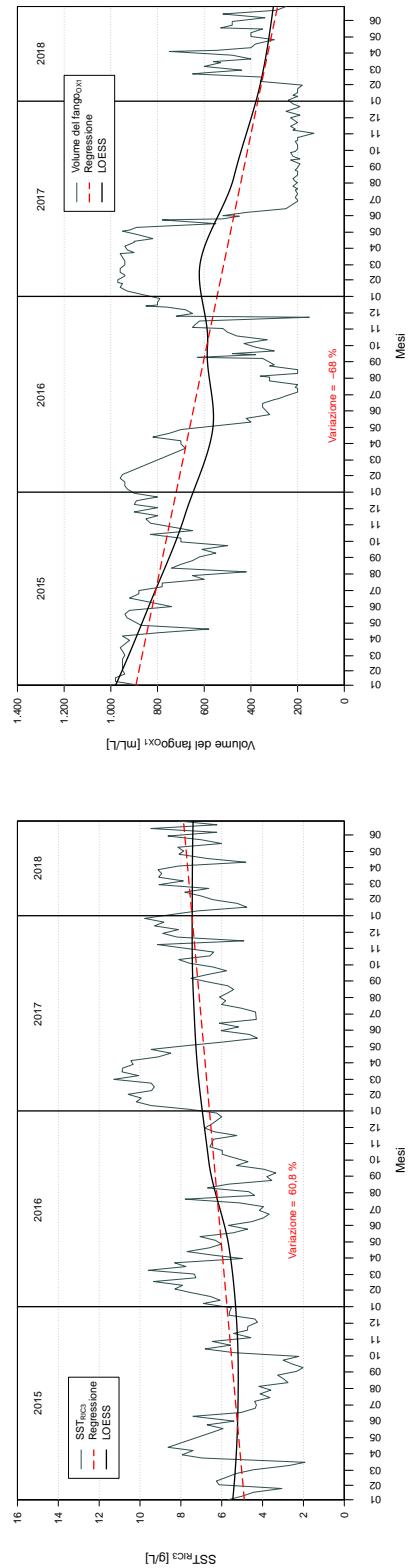


(36)

Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 9



(38)



(40)

Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 10

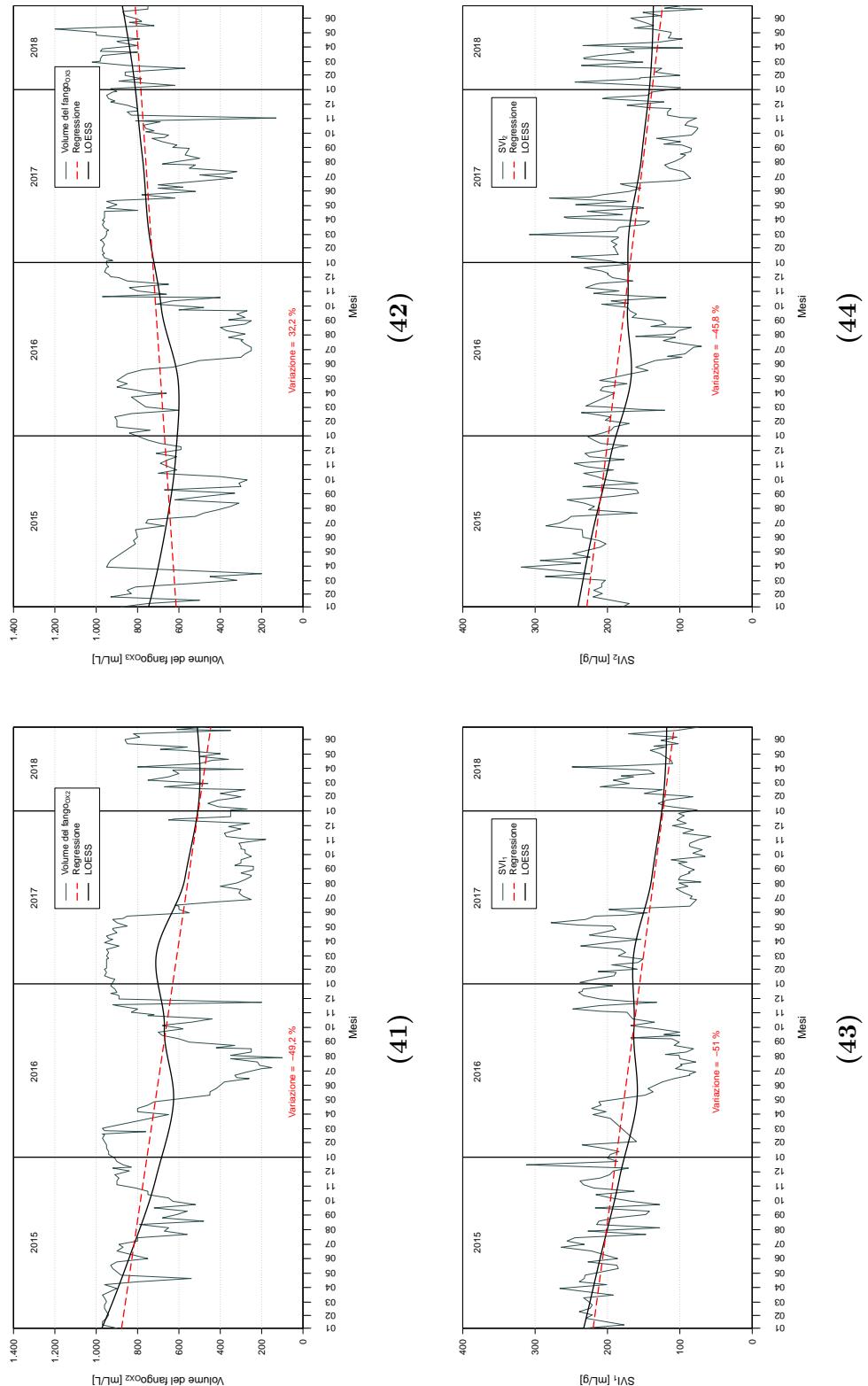
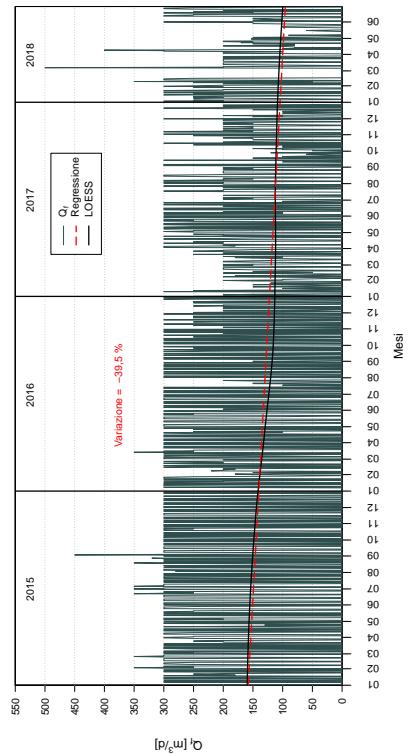
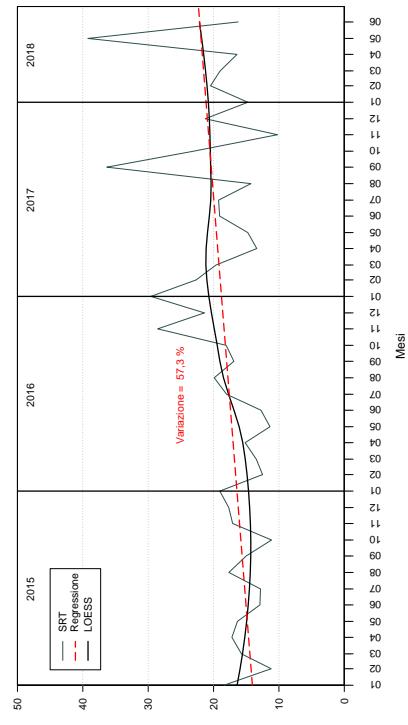


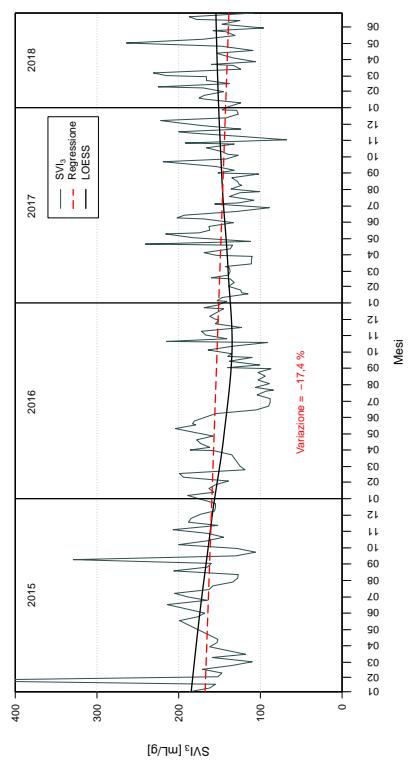
Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 11



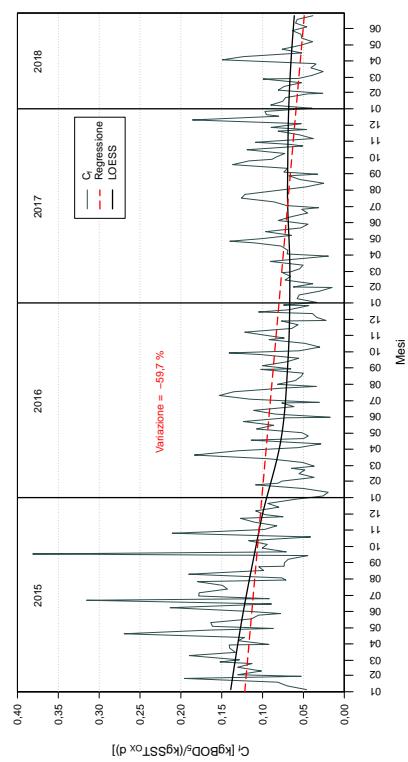
(46)



(48)

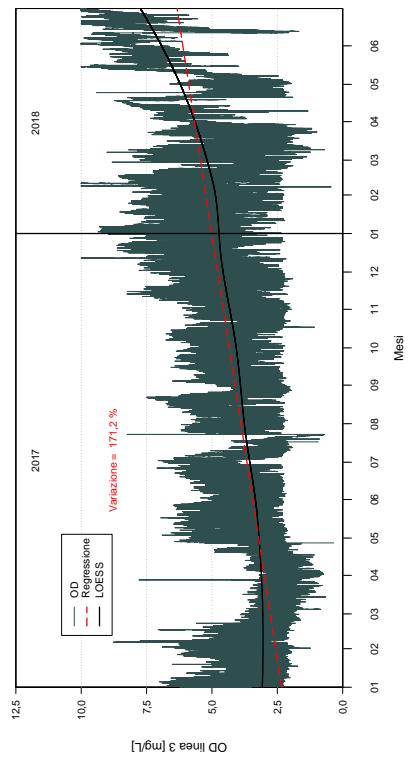


(45)

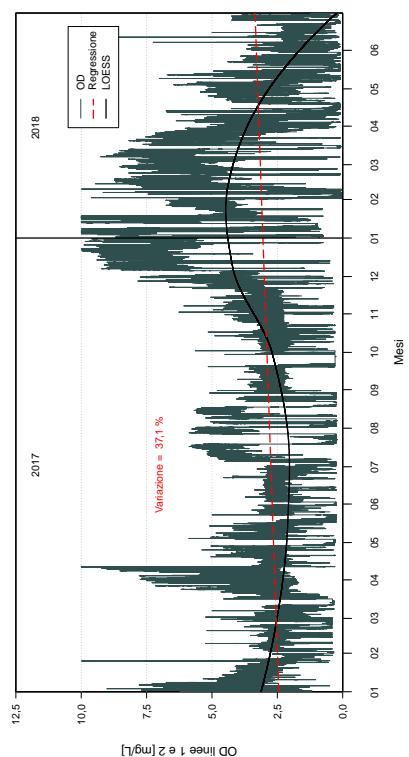


(47)

Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 12



(50)



(49)

Figura 5.4.1: Trend impianto A - parte 13

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

IMPIANTO A - ingresso		IMPIANTO A - uscita	
	Variazione [%]		Variazione [%]
Q (2015)	-45,7	pH	3,5
Q (2016 - 2018)	12,6	T	2,8
pH	7,1	Concentrazioni	
T	8,1	BOD ₅	-8,8
Concentrazioni (2015 - 2018)		COD	-30,0
BOD ₅	-18,8	SST	-9,2
COD	-8,1	N _{tot}	49,0
SST	-17,0	N-NH ₄ ⁺	-73,9
N _{tot}	-27,3	N-NO ₂ ⁻	-48,7
N-NH ₄ ⁺	-38,8	N-NO ₃ ⁻	71,8
N-NO ₂ ⁻	-87,6	P _{tot}	50,6
N-NO ₃ ⁻	-11,6	E. coli	-36,5
P _{tot}	-29,3	IMPIANTO A - parametri operativi	
E. coli	250,5	Variazione [%]	
Rapporti (2015 - 2018)		SSTOX ₁	-34,8
BOD ₅ /COD	5,4	SSTOX ₂	-10,0
N _{tot} /BOD ₅	-15,5	SSTOX ₃	66,3
N _{tot} /COD	-4,6	SSTRIC ₁	-7,8
P _{tot} /BOD ₅	-15,0	SSTRIC ₂	0,6
P _{tot} /COD	-4,5	SSTRIC ₃	60,8
P _{tot} /N _{tot}	23,3	SSSOX ₁	-68,0
Carichi (2015)		SSSOX ₂	-49,2
BOD ₅	-38,0	SSSOX ₃	32,2
COD	-40,7	SVI ₁	-51,0
N _{tot}	-35,6	SVI ₂	-45,8
P _{tot}	-42,0	SVI ₃	-17,4
Carichi (2016 - 2018)		Q _f	-39,5
BOD ₅	-12,9	C _f	-59,7
COD	-11,5	SRT	57,3
N _{tot}	-8,4	OD - linee 1 e 2	37,1
P _{tot}	-7,1	OD - linea 3	171,2

Tabella 5.10: Variazioni percentuali ottenute tramite regressione lineare - impianto A (Confronto con analisi esplorativa: VERDE: trend presente e individuato con l'analisi visuale con la stessa descrizione (debole o marcato); GIALLO: trend presente e individuato con l'analisi visuale con descrizione diversa; ROSA: trend presente e non individuato con l'analisi visuale; AZZURRO: risultati ritenuti non affidabili; BIANCO: non è presente trend)

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

La Figura 5.4.2 mostra la retta di regressione lineare e la curva del metodo LOESS per l'impianto B. Confrontandola con la Figura 5.4.1, si nota che per l'impianto B i due modelli restituiscono più spesso trend simili. Anche per questo impianto, si possono fare le stesse considerazioni del precedente. Infatti, si hanno esempi di andamento molto prossimo a quello lineare (Figura 5.4.2(4)(5)), esempi in cui le due curve sono molto distanti (Figura 5.4.2(36)) e casi in cui il risultato della regressione è poco attendibile perché l'andamento è marcatamente non lineare (Figura 5.4.2(9)). Per il pH (Figura 5.4.2(2)(23) e la temperatura (Figura 5.4.2(3)(24), si ripropone lo stesso ragionamento fatto per l'impianto A.

In Tabella 5.11 sono riportati i valori delle variazioni percentuali ricavate con il metodo della regressione lineare e, per mezzo della colorazione delle celle, sono indicati i risultati del confronto con le conclusioni a cui si era giunti per mezzo dell'analisi visuale.

IMPIANTO B - ingresso		IMPIANTO B - uscita	
	Variazione [%]		Variazione [%]
Q	-20,5	pH	4,1
pH	6,9	T	-9,8
T	-5,6	Concentrazioni	
BOD₅	-66,5	BOD₅	3,8
COD	-66,5	COD	-33,9
SST	-80,6	SST	-36,6
N_{tot}	-37,8	N_{tot}	-17,6
N-NH₄⁺	-11,2	N-NH₄⁺	107,0
N-NO₂⁻	-47,6	N-NO₂⁻	-32,6
N-NO₃⁻	14,4	N-NO₃⁻	-34,4
P_{tot}	-52,7	P_{tot}	16,0
E. coli	503,1	E. coli	-7,5
Rapporti		IMPIANTO B - parametri operativi	
BOD₅/COD	21,0	SST_{OX}	-5,4
N_{tot}/BOD₅	80,3	SST_{RIC}	4,2
N_{tot}/COD	130,6	SSS_{OX}	-12,9
P_{tot}/BOD₅	19,6	SVI	-2,4
P_{tot}/COD	53,9	Q_f	-9,2
P_{tot}/N_{tot}	-24,5	C_f	-70,4
Carichi		SRT	-1,5
BOD₅	-75,3	OD	11,0
COD	-77,0		
N_{tot}	-50,4		
P_{tot}	-64,1		

Tabella 5.11: Variazioni percentuali ottenute tramite regressione lineare - impianto B (Confronto con analisi esplorativa: VERDE: trend presente e individuato con l'analisi visuale con la stessa descrizione (debole o marcato); GIALLO: trend presente e individuato con l'analisi visuale con descrizione diversa; ROSA: trend presente e non individuato con l'analisi visuale; AZZURRO: risultati ritenuti non affidabili; BIANCO: non è presente trend)

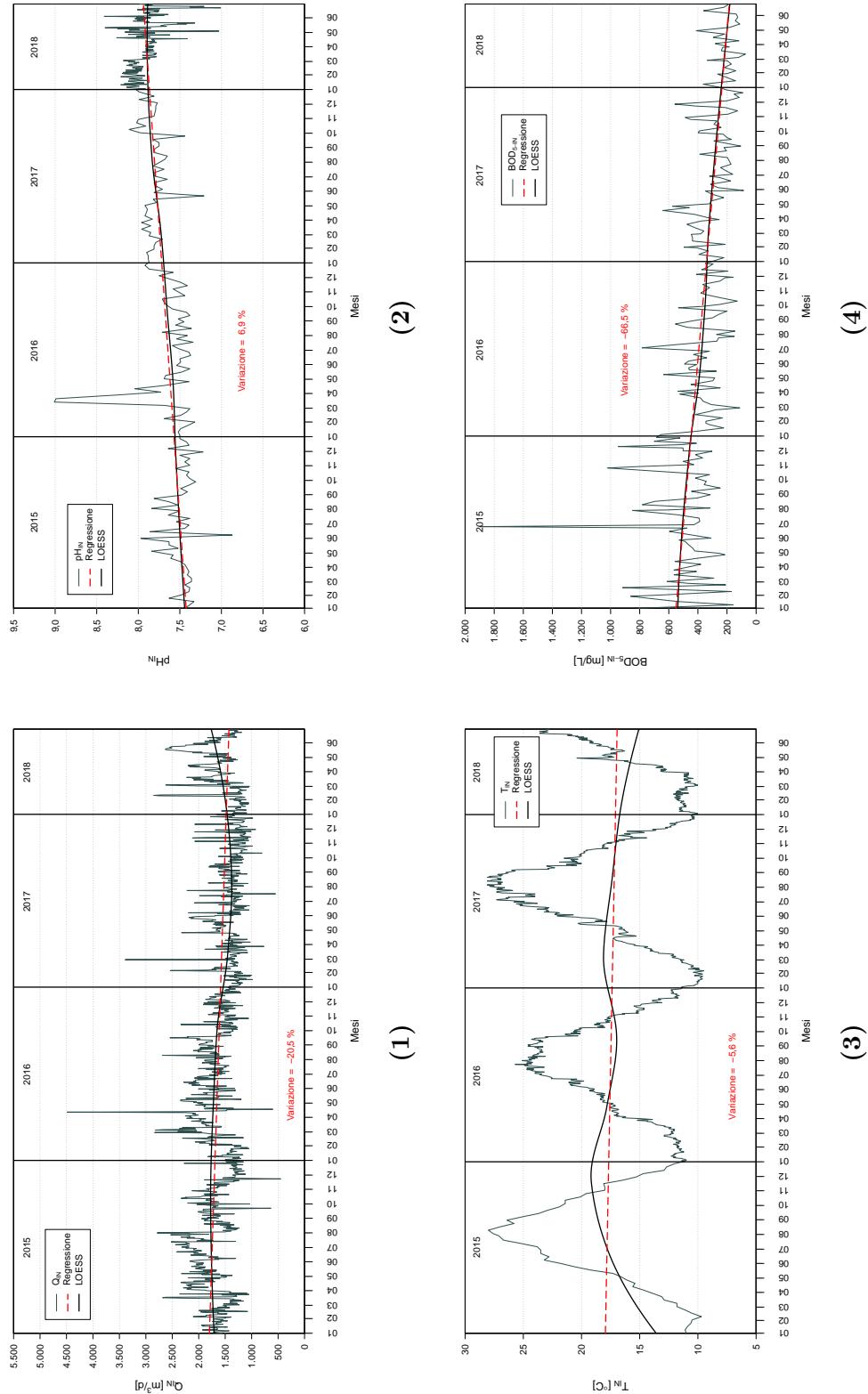


Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 1

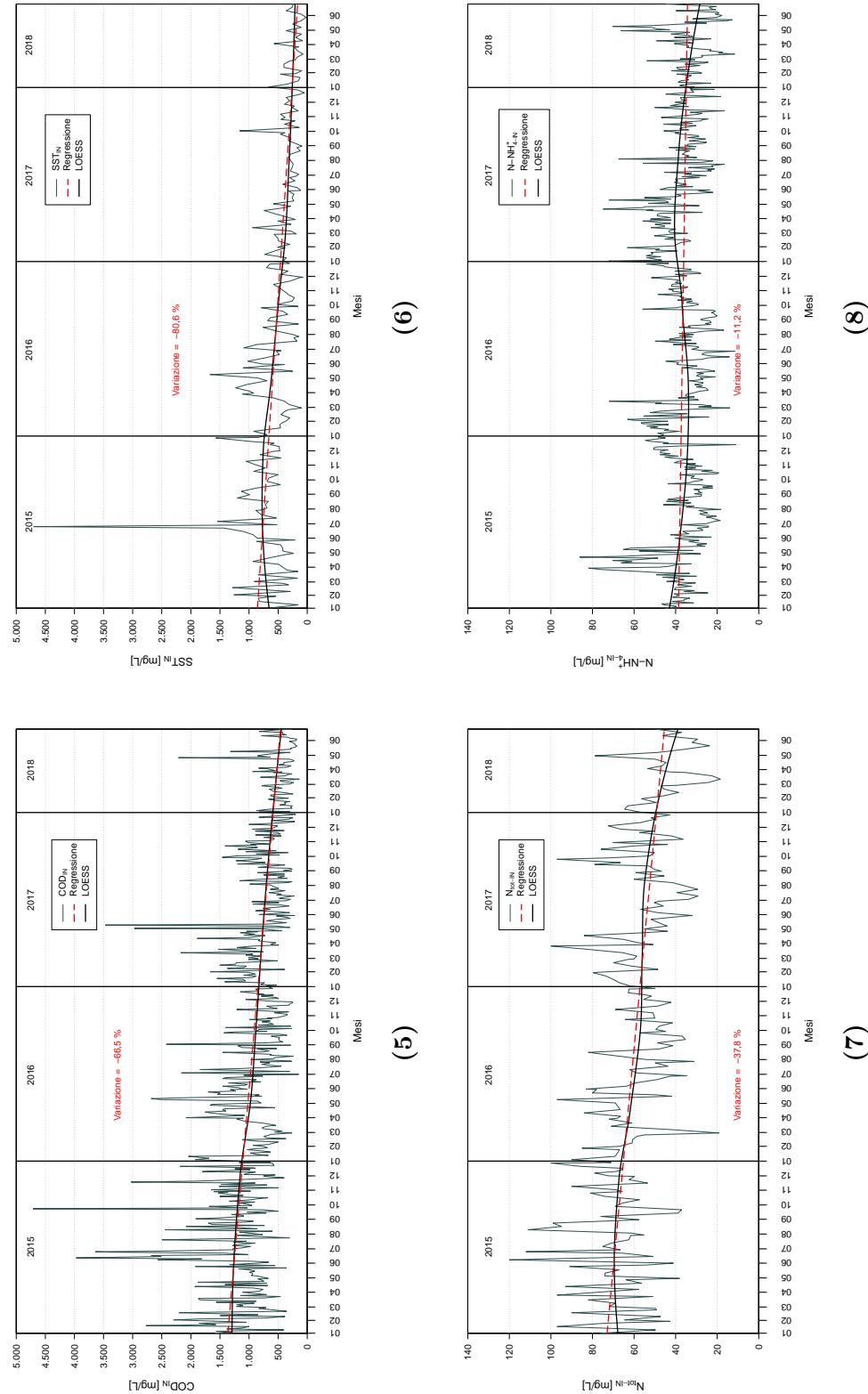
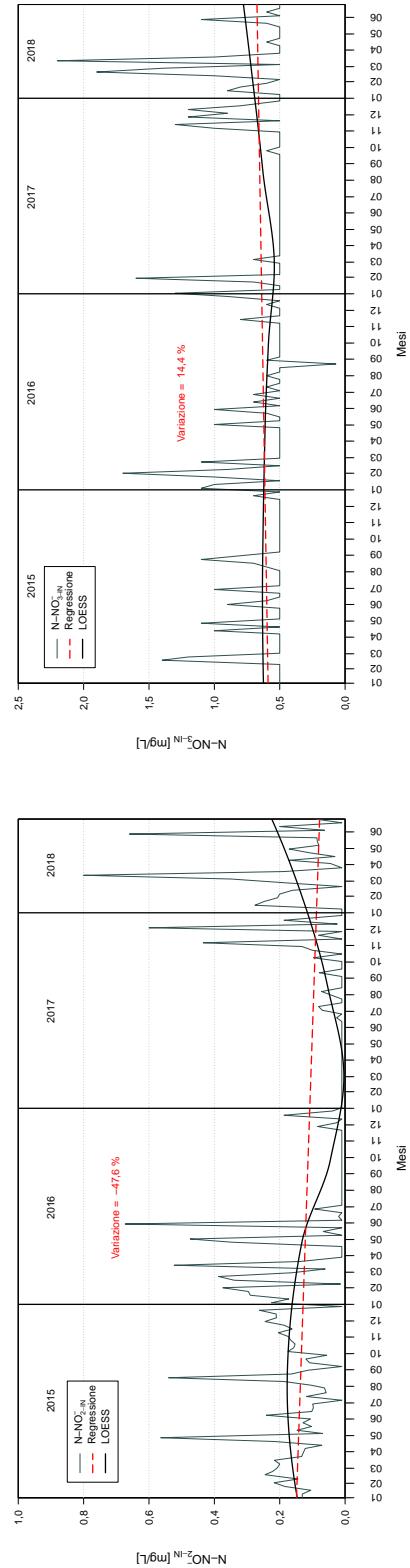
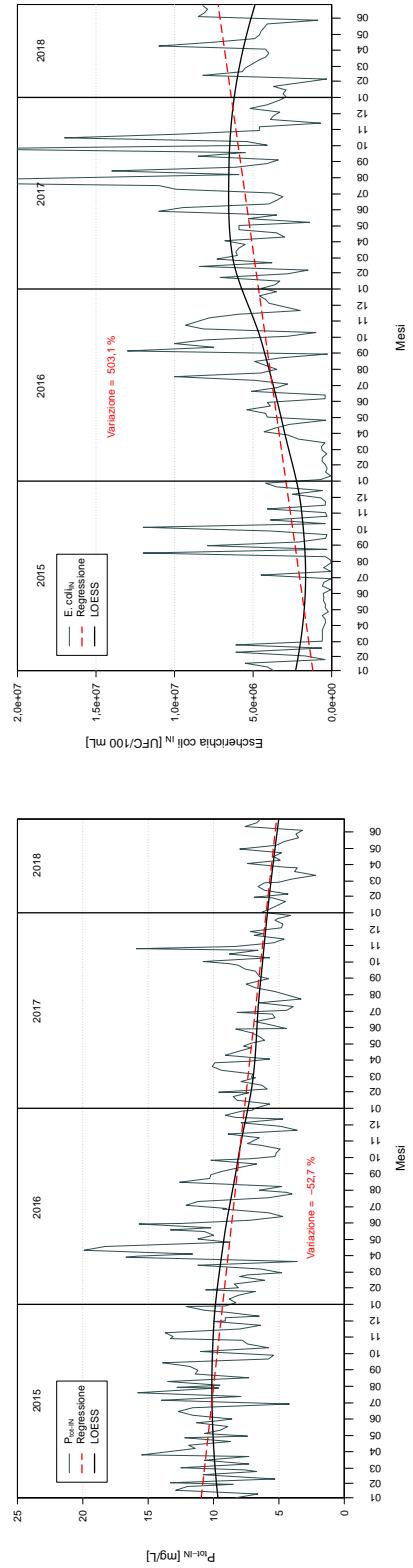


Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 2



(10)



(11)

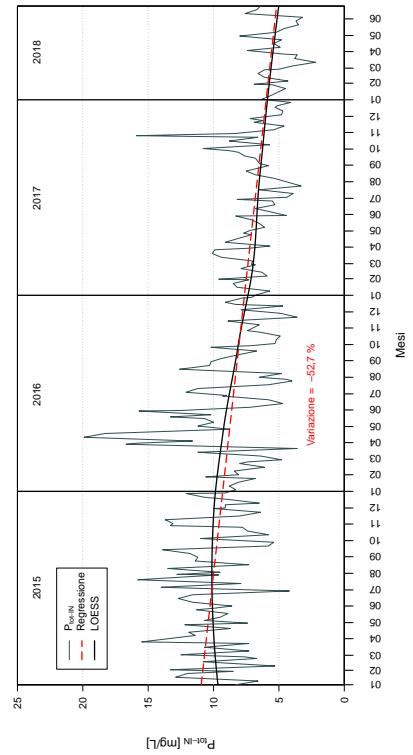


Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 3

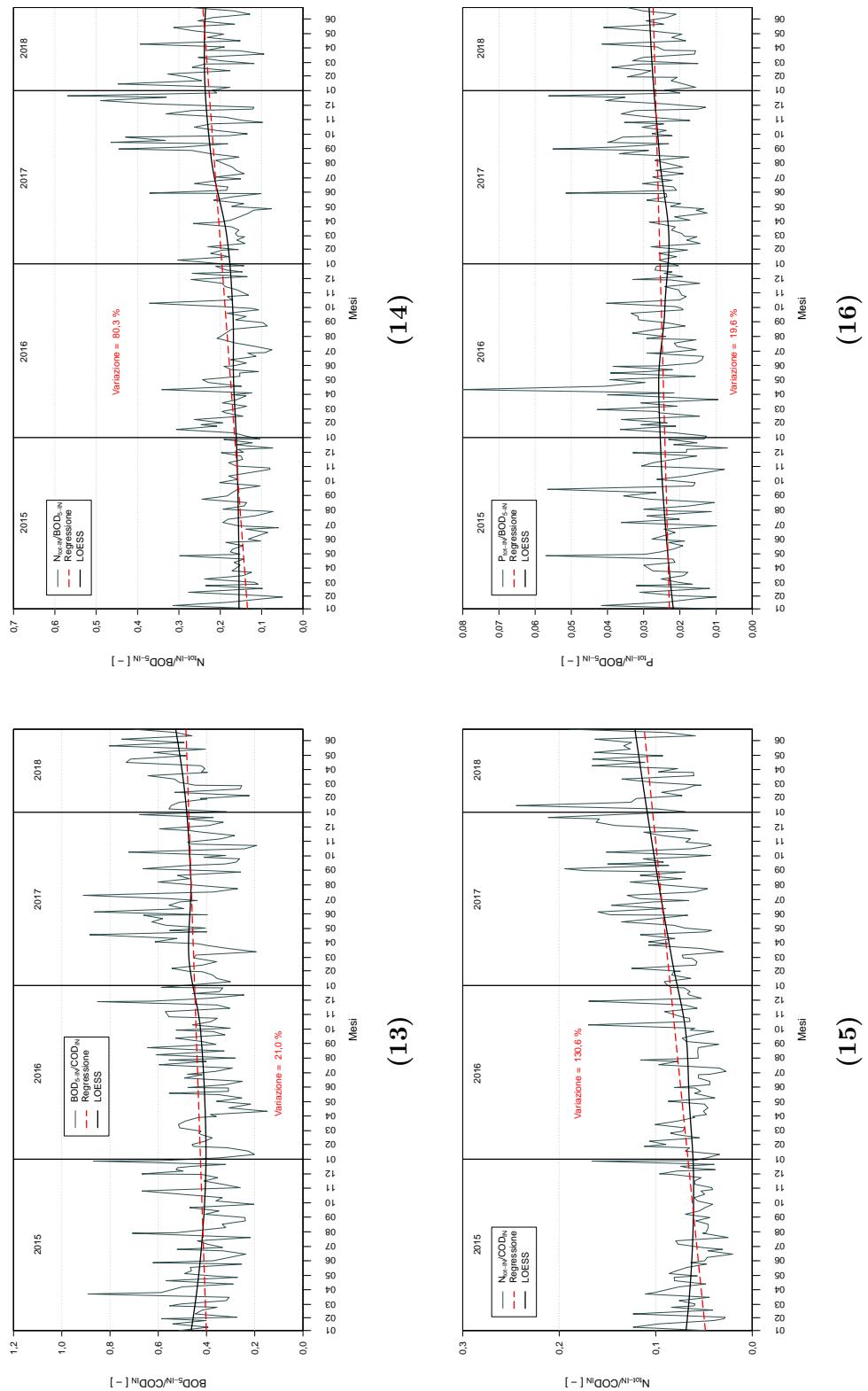
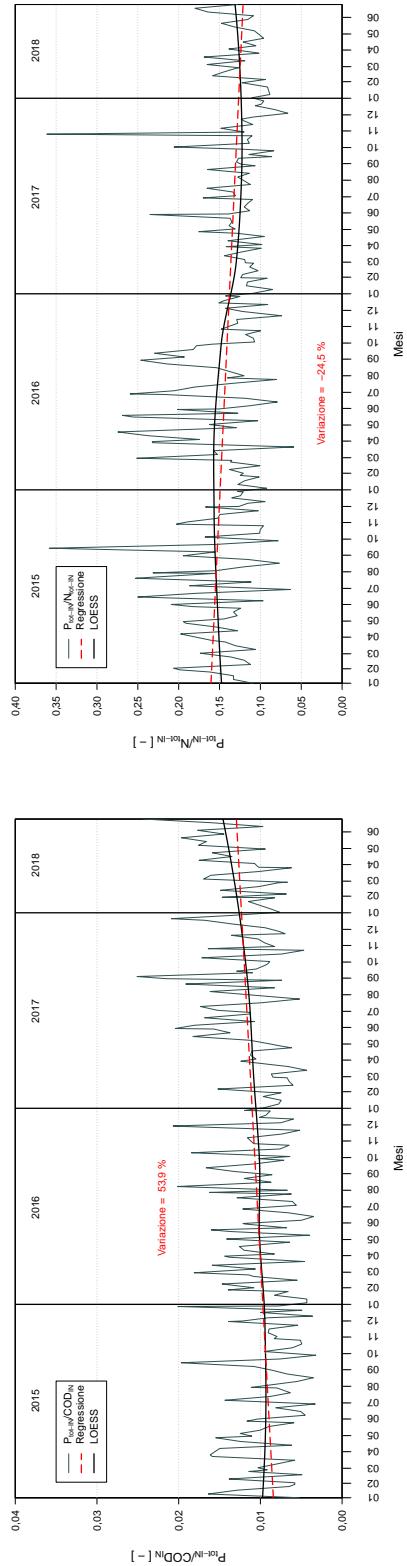
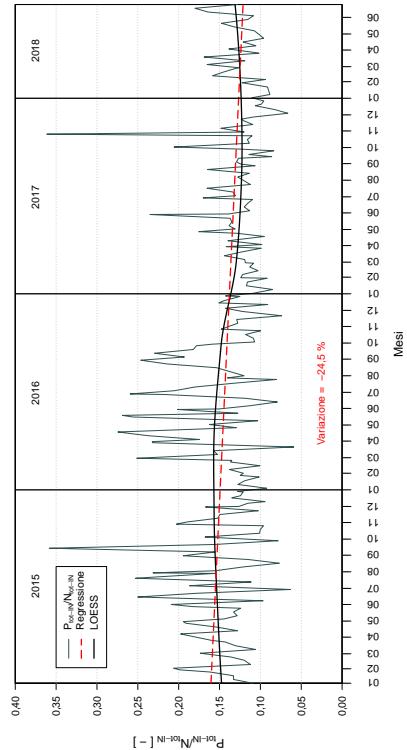


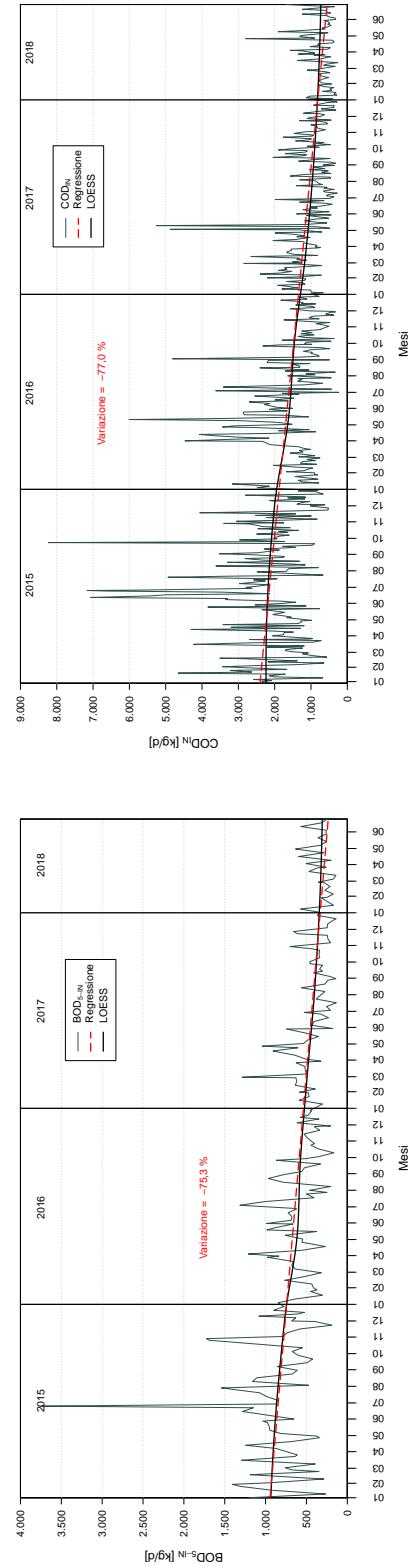
Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 4



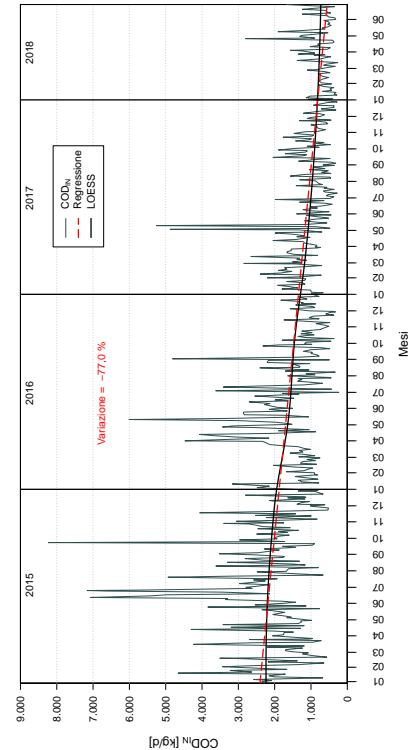
(17)



(18)

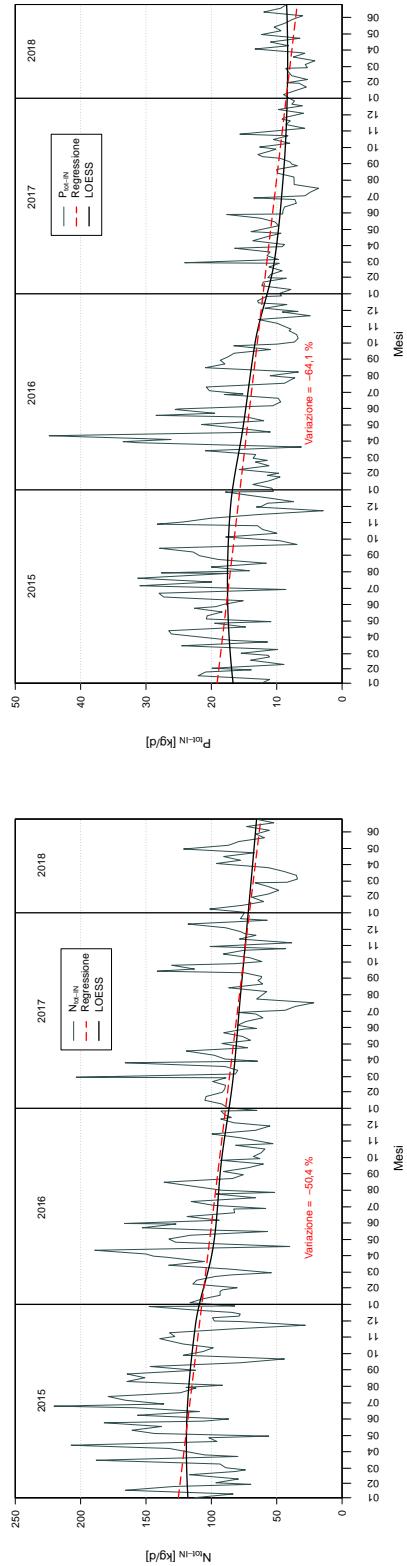


(19)

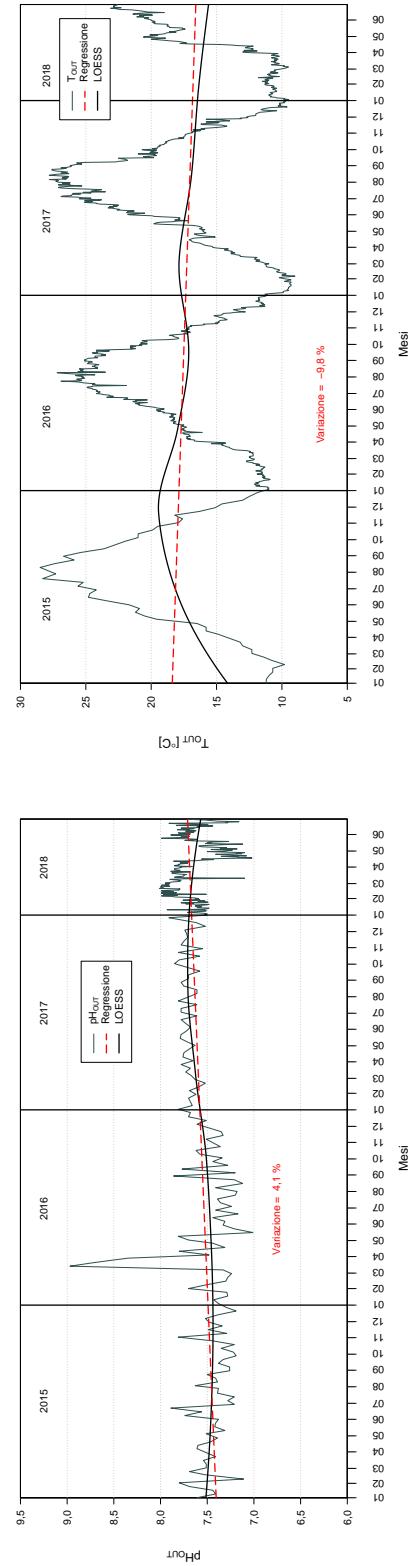


(20)

Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 5

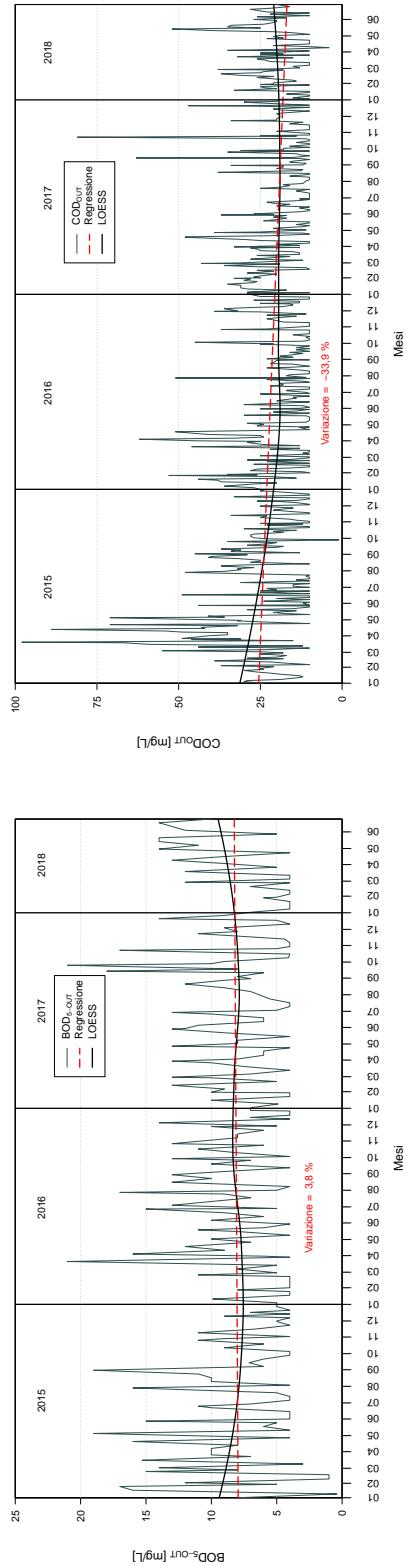


(22)

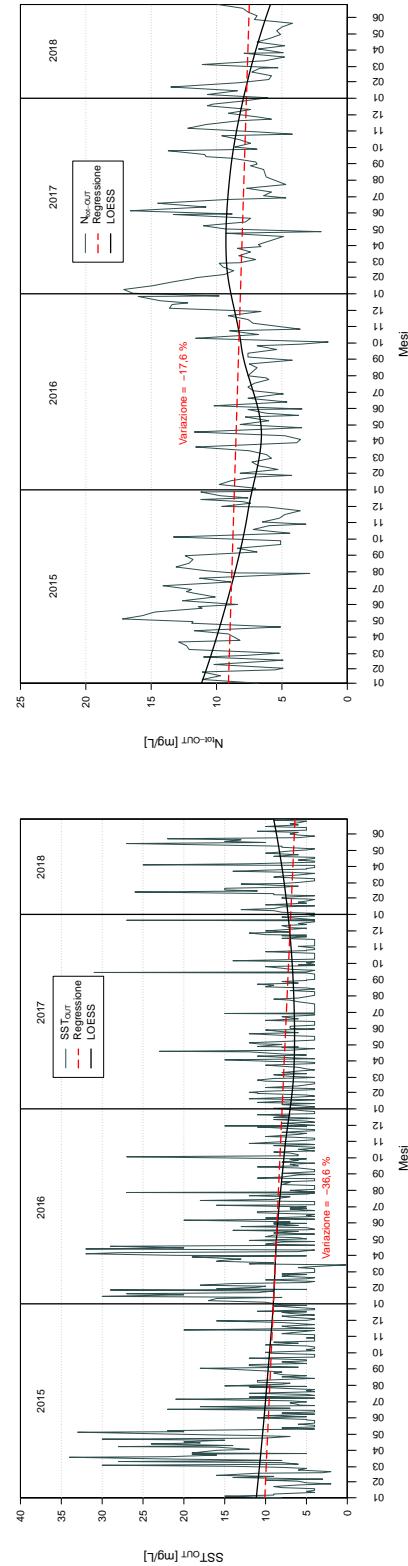


(24)

Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 6

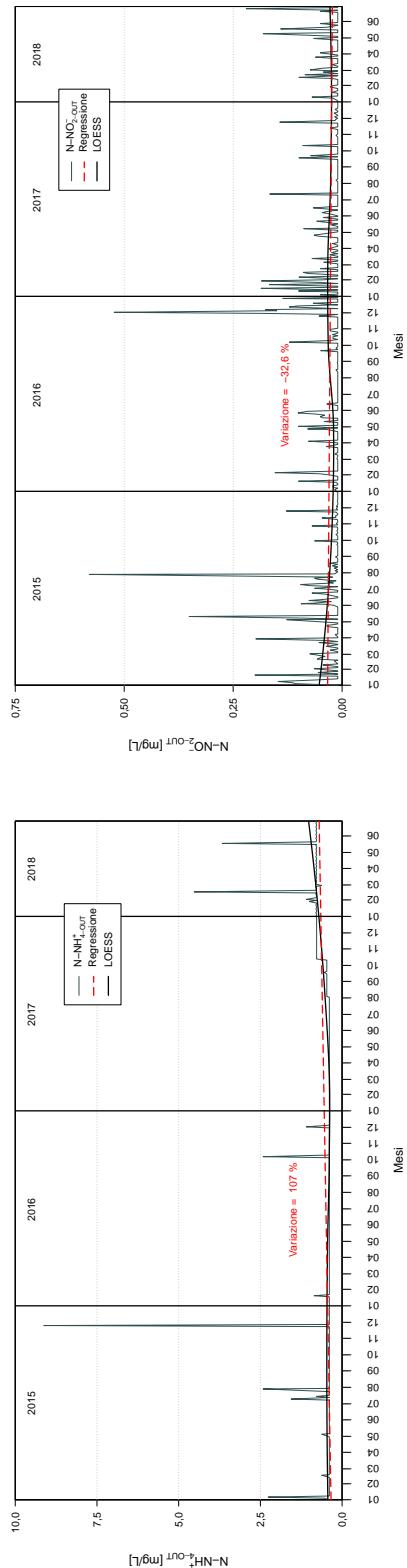


(26)

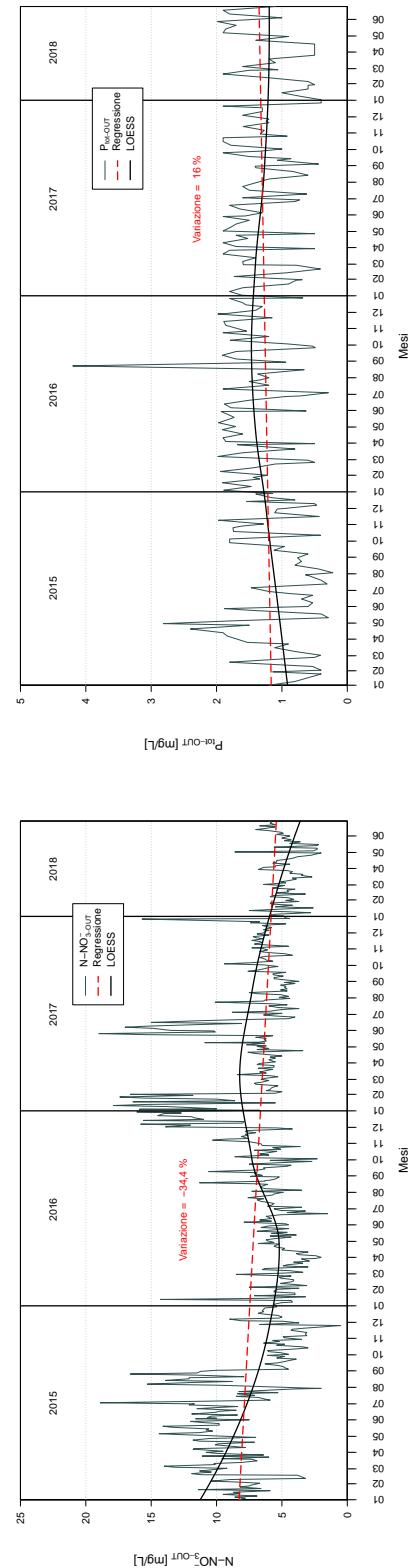


(28)

Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 7

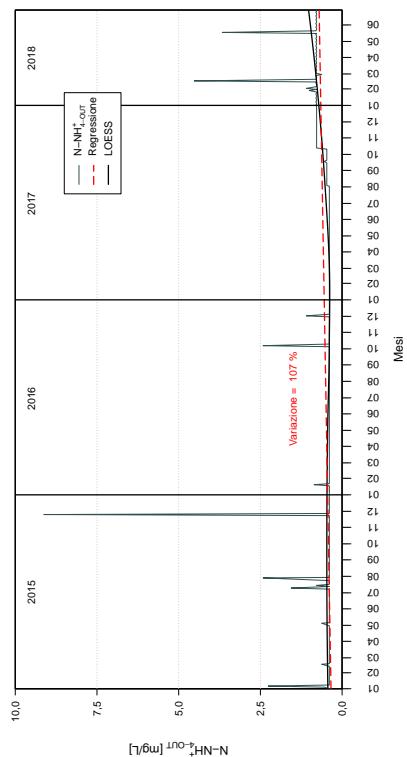


(29)



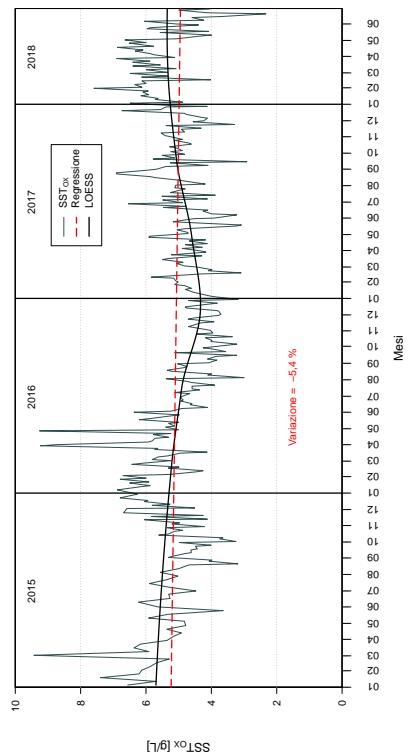
(30)

(32)

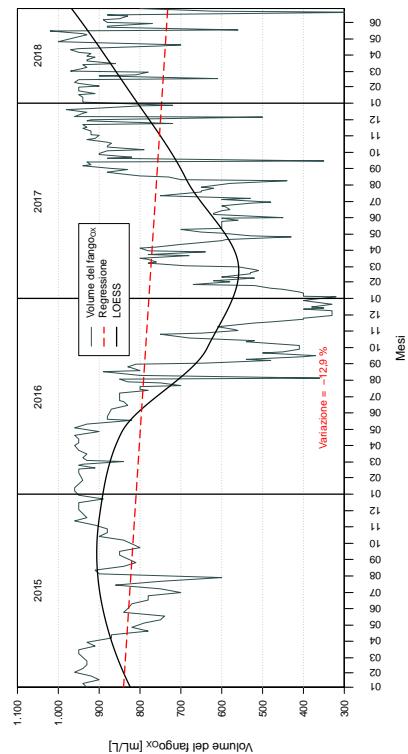


(31)

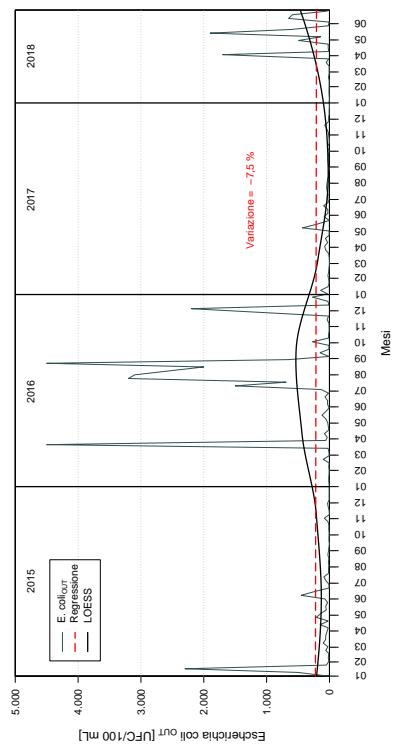
Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 8



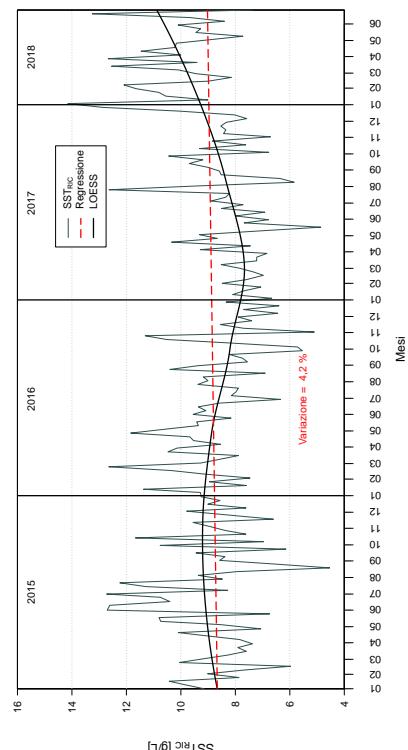
(34)



(36)

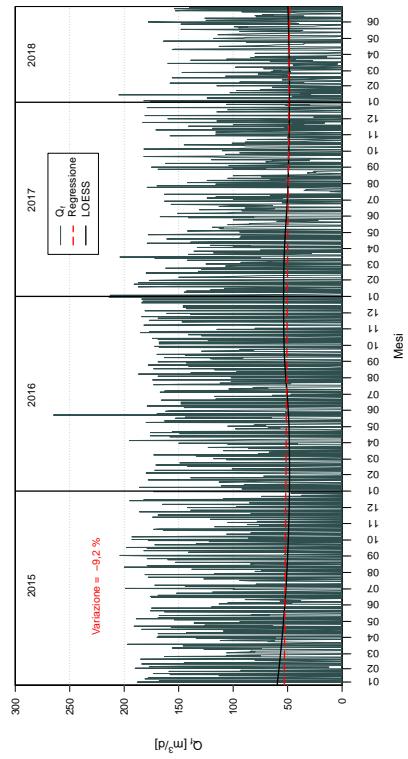


(33)

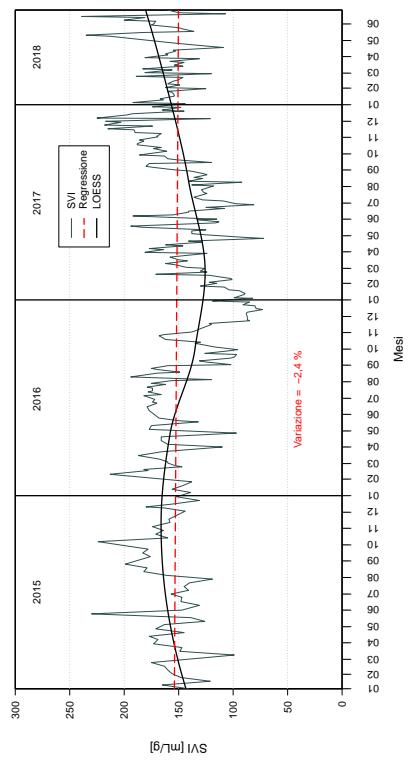


(35)

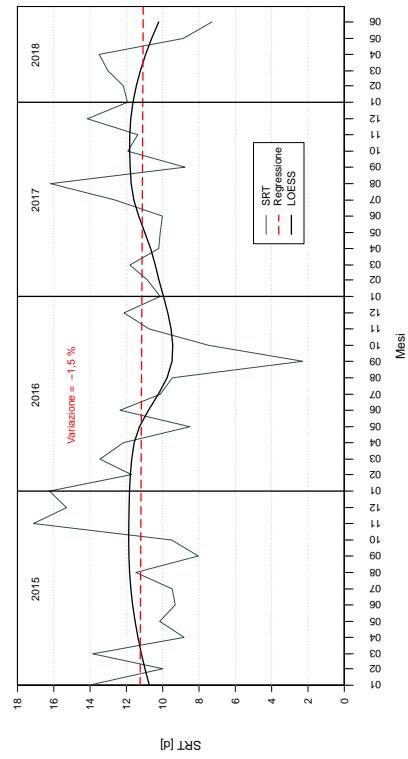
Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 9



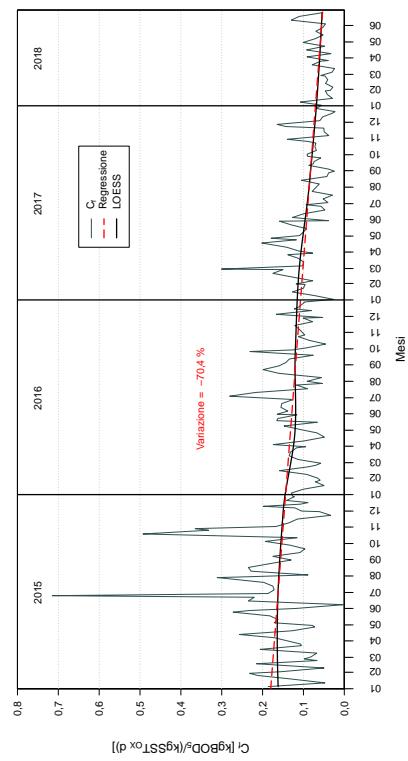
(37)



(38)



(39)



(40)

Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 10

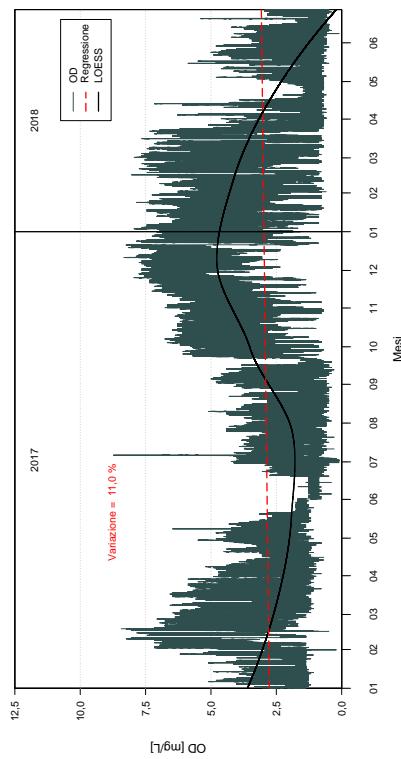


Figura 5.4.2: Trend impianto B - parte 11

(41)

5.5 Individuazione della componente periodica

Per individuare la componente periodica delle *time series* si è fatto ricorso alla lettura dei correlogrammi, risultato dell'applicazione della funzione di autocorrelazione alla serie detrendizzata (sottosezione 4.5.2). Poiché le osservazioni a disposizione non sono a frequenza regolare e poiché l'operazione di autocorrelazione richiede, invece, una frequenza di campionamento costante, è stato necessario procedere con l'aggregazione dei dati. In particolare, si è scelto di aggregare i dati settimanalmente secondo la mediana, ovvero si è costruita una nuova serie a frequenza costante di sette giorni, i cui valori sono la mediana dei dati della settimana che è stata aggregata.

Il valore massimo che si è scelto per il *lag* τ è di 60 settimane in modo da evidenziare eventuali stagionalità al più annuali (come ci si aspetta dal tipo di dati analizzati).

Un discorso diverso va fatto per l'età del fango, poiché essa è stata calcolata mese per mese e quindi si era già fatta un'aggregazione mensile. Il *lag* massimo è quindi stato scelto essere 12 mesi.

La Figura 5.5.1 e la Figura 5.5.2 raccolgono i correlogrammi delle serie di dati rispettivamente per l'impianto A e per l'impianto B. Su ciascun correlogramma sono rappresentate anche due rette tratteggiate orizzontali che definiscono l'intervallo di confidenza al 95%, utile per determinare la significatività statistica dei coefficienti di autocorrelazione calcolati. In questo lavoro non si è condotto lo studio di tale significatività e si suggerisce di approfondire la questione in elaborazioni future (Capitolo 6).

Come è ovvio che sia dalla definizione di funzione di autocorrelazione, in tutti i correlogrammi si ha coefficiente di autocorrelazione pari a 1 in corrispondenza di *lag* nullo.

Osservando i correlogrammi relativi all'impianto A, sono state individuate delle periodicità annuali per quelle serie in cui ci si aspetta che l'alternarsi delle stagioni sia il fattore maggiormente influenzante l'andamento dei dati. I risultati sono riassunti in Tabella 5.12 e fanno riferimento ai correlogrammi di Figura 5.5.1(2)(3)(24)(31)(32)(34)(35)(36)(38)(39)(40)(41)(42)(43)(44). I parametri che mostrano periodicità sono generalmente influenzati dalla temperatura, la cui serie di dati è quella che esibisce, tra tutte, un comportamento periodico più marcato e inequivocabile (Figura 5.5.1(3)(24)).

In alcuni casi (Figura 5.5.1(2)(31)(34)(35)(38)) non è risultato facile individuare il periodo nell'intervallo compreso tra 50 e 60 settimane, probabilmente anche a causa degli errori dovuti all'aggregazione dei dati. Si è scelto di indicare una periodicità di 52 settimane perché la periodicità annuale trova una spiegazione nel comportamento di un impianto di depurazione.

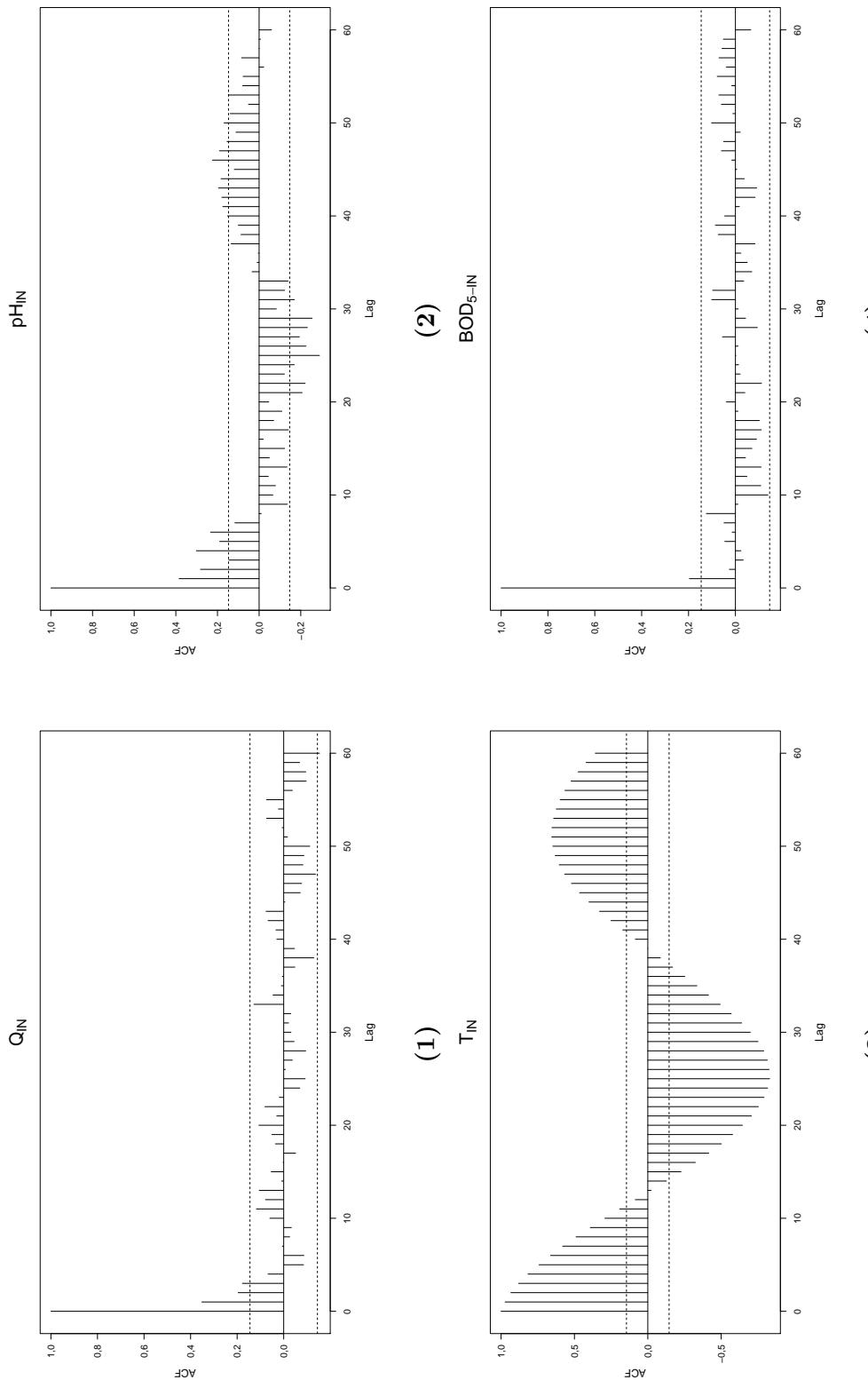


Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 1

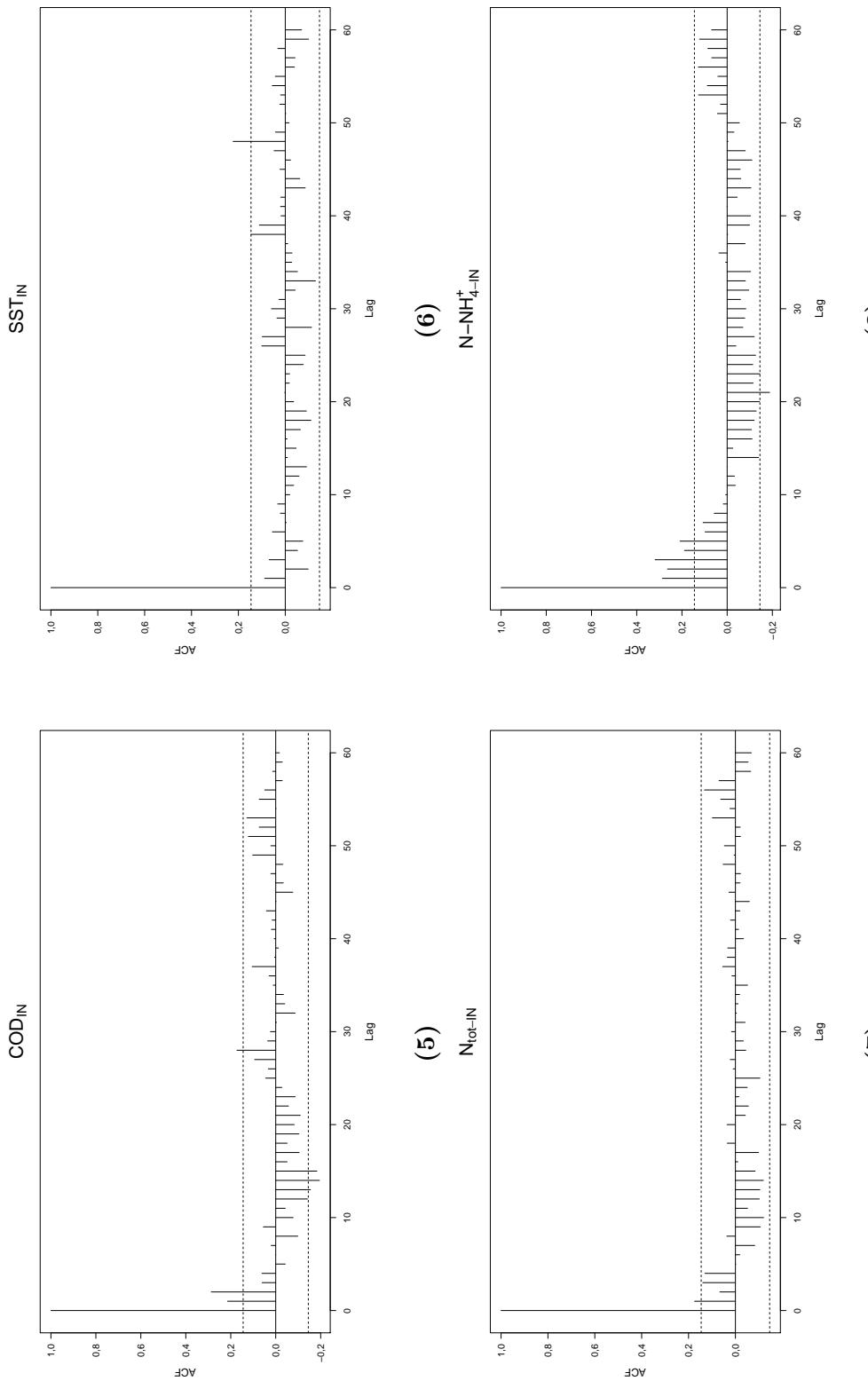


Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 2

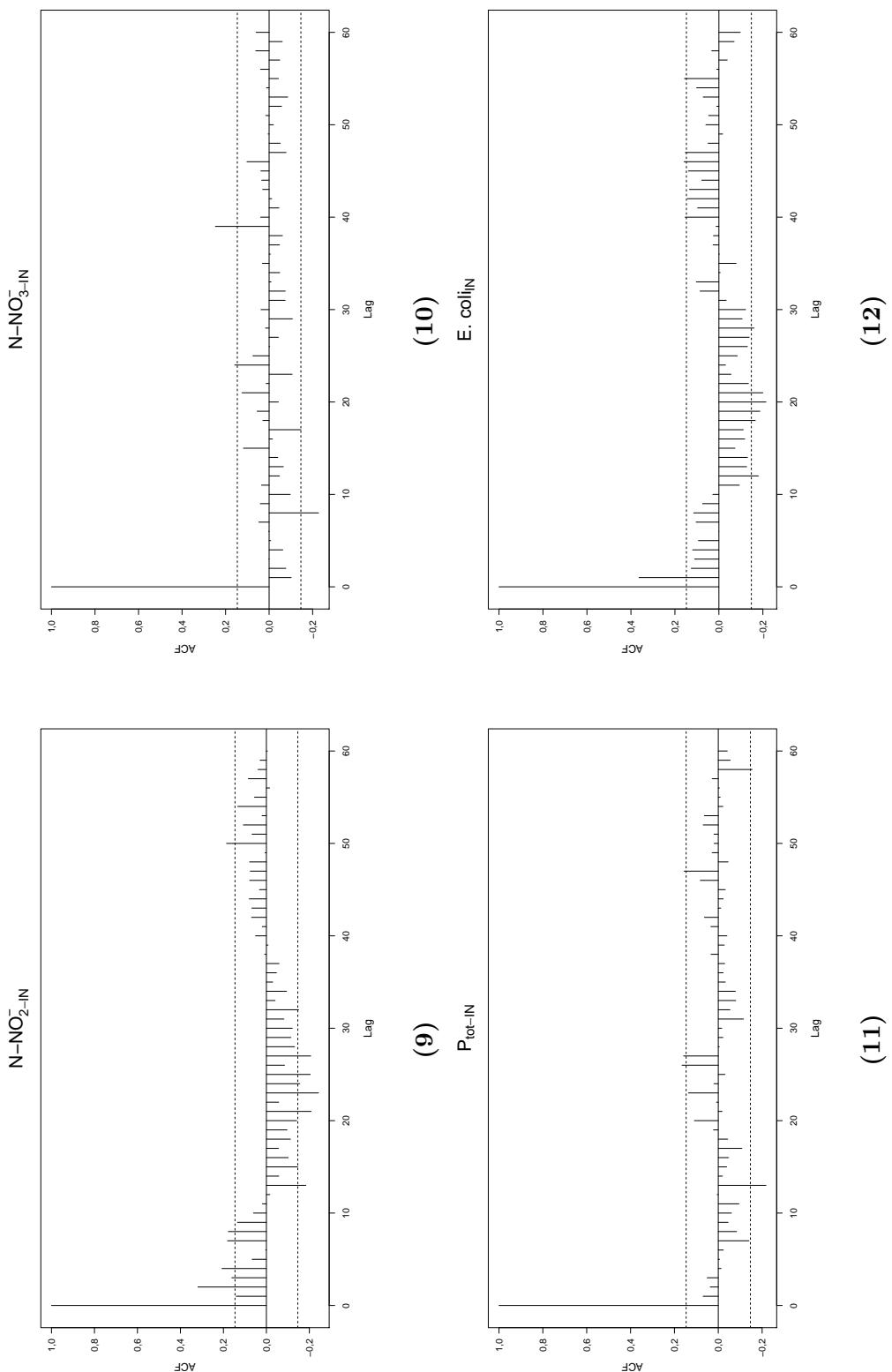
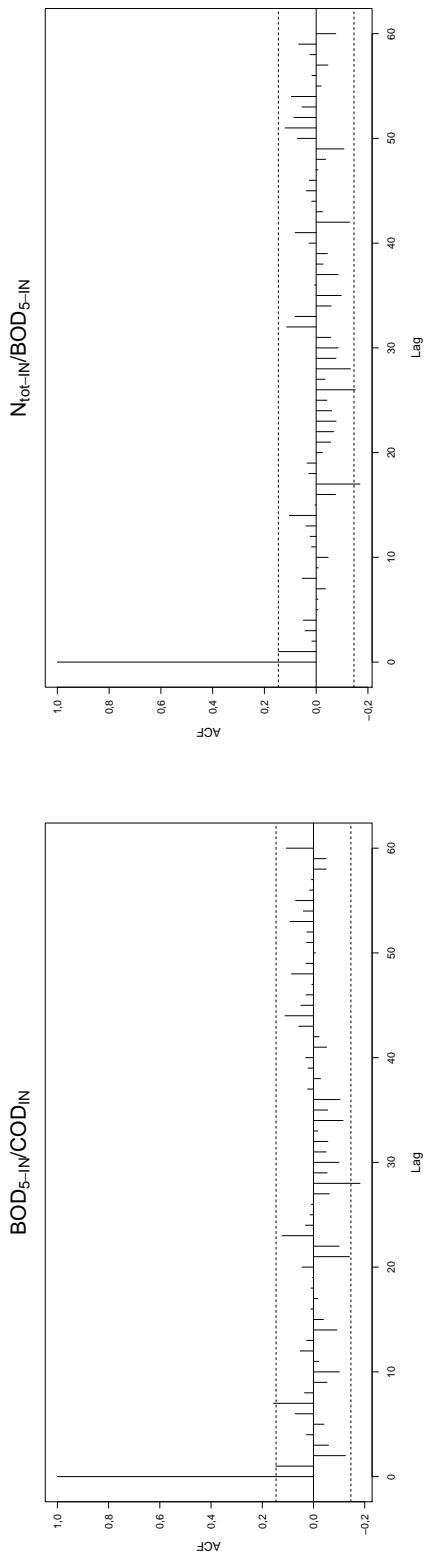
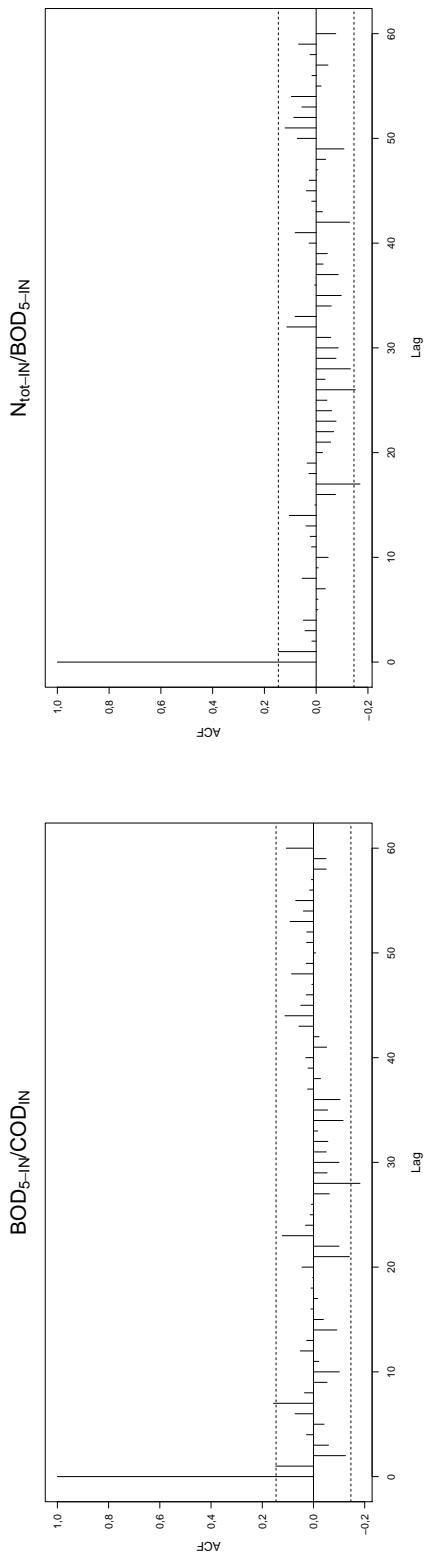


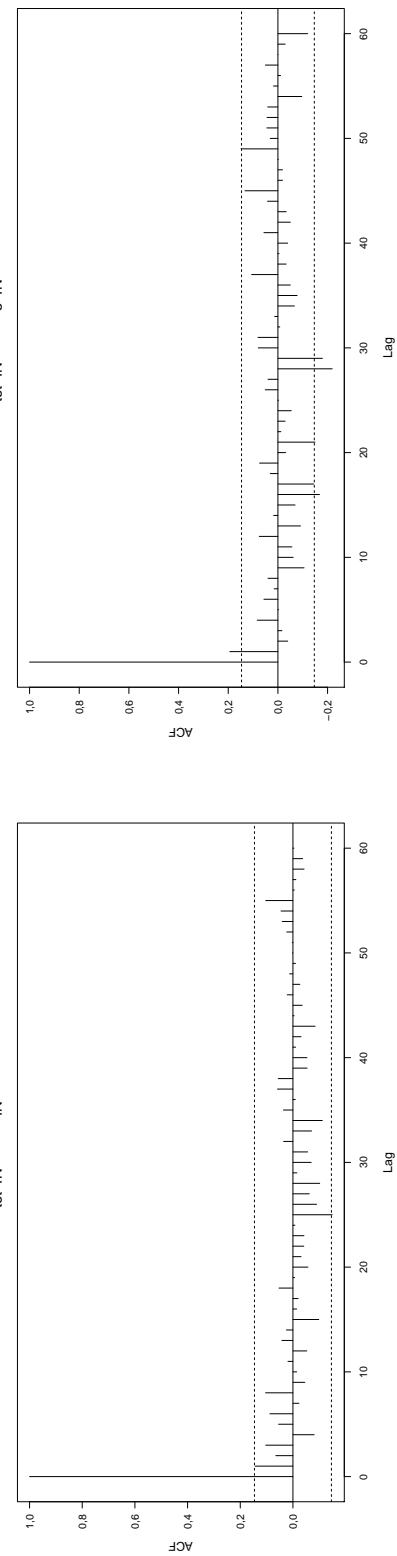
Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 3



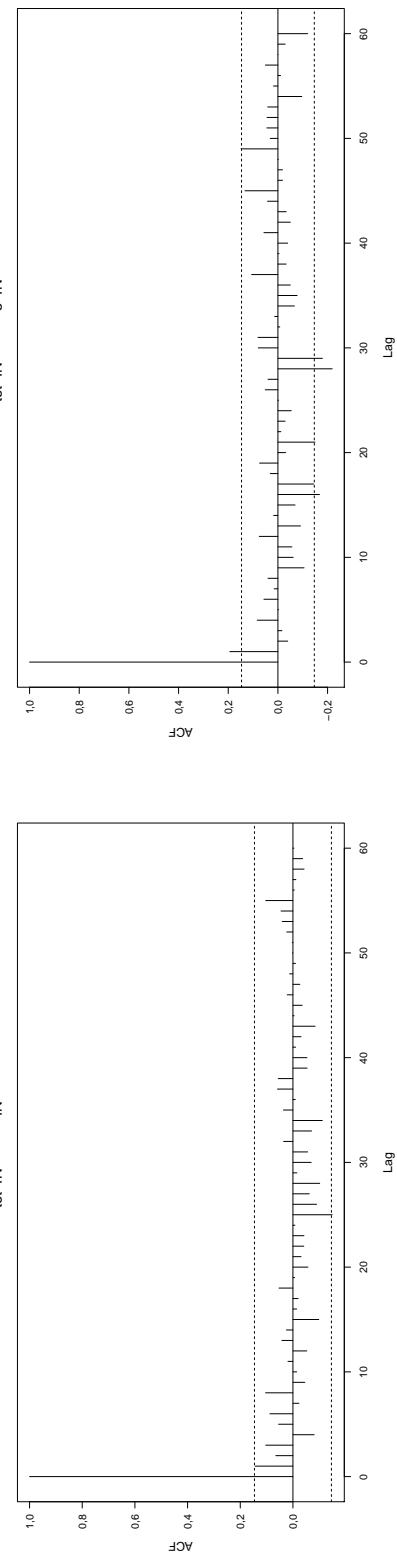
(13)



(14)



(15)



(16)

Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 4

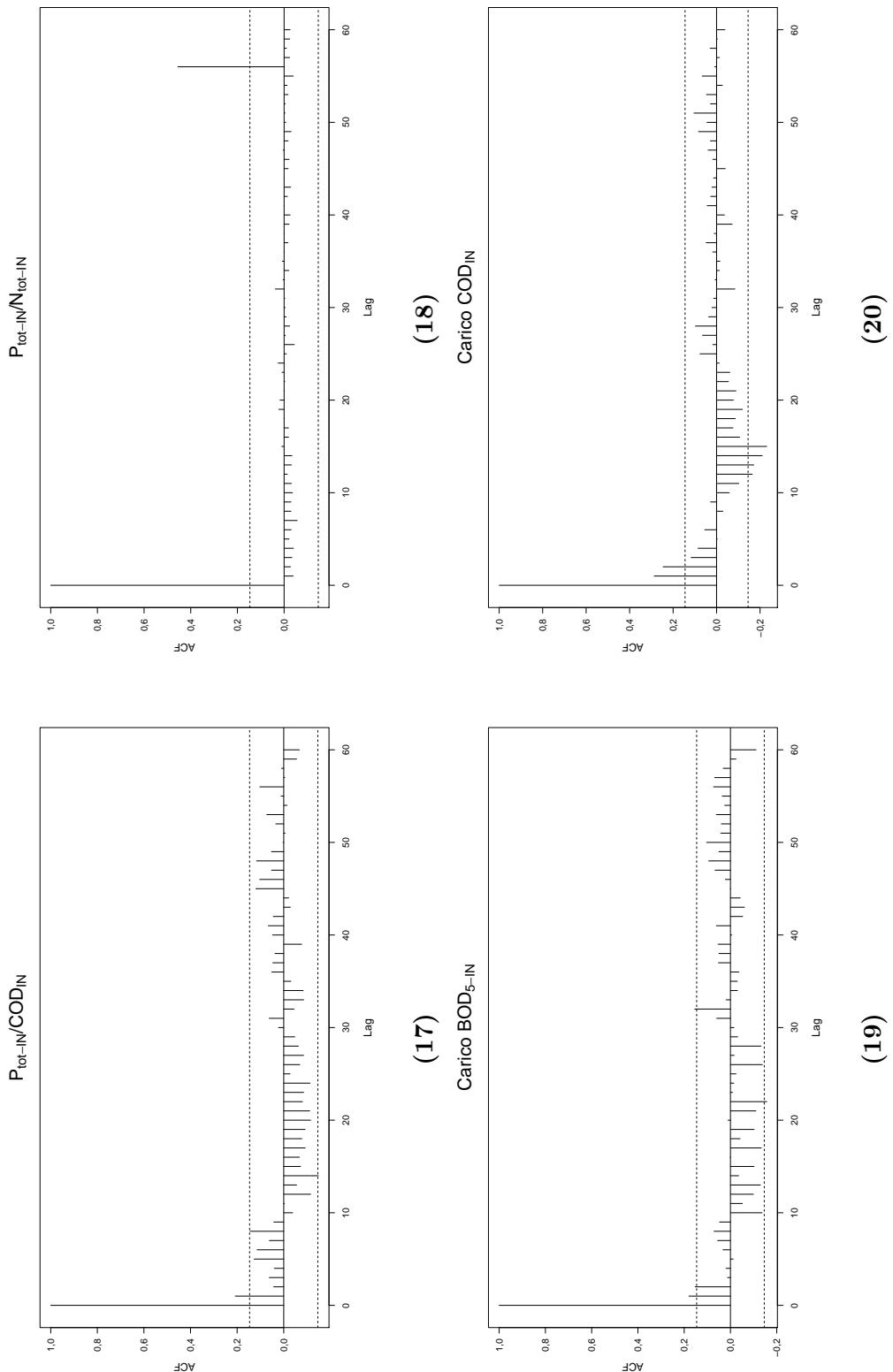


Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 5

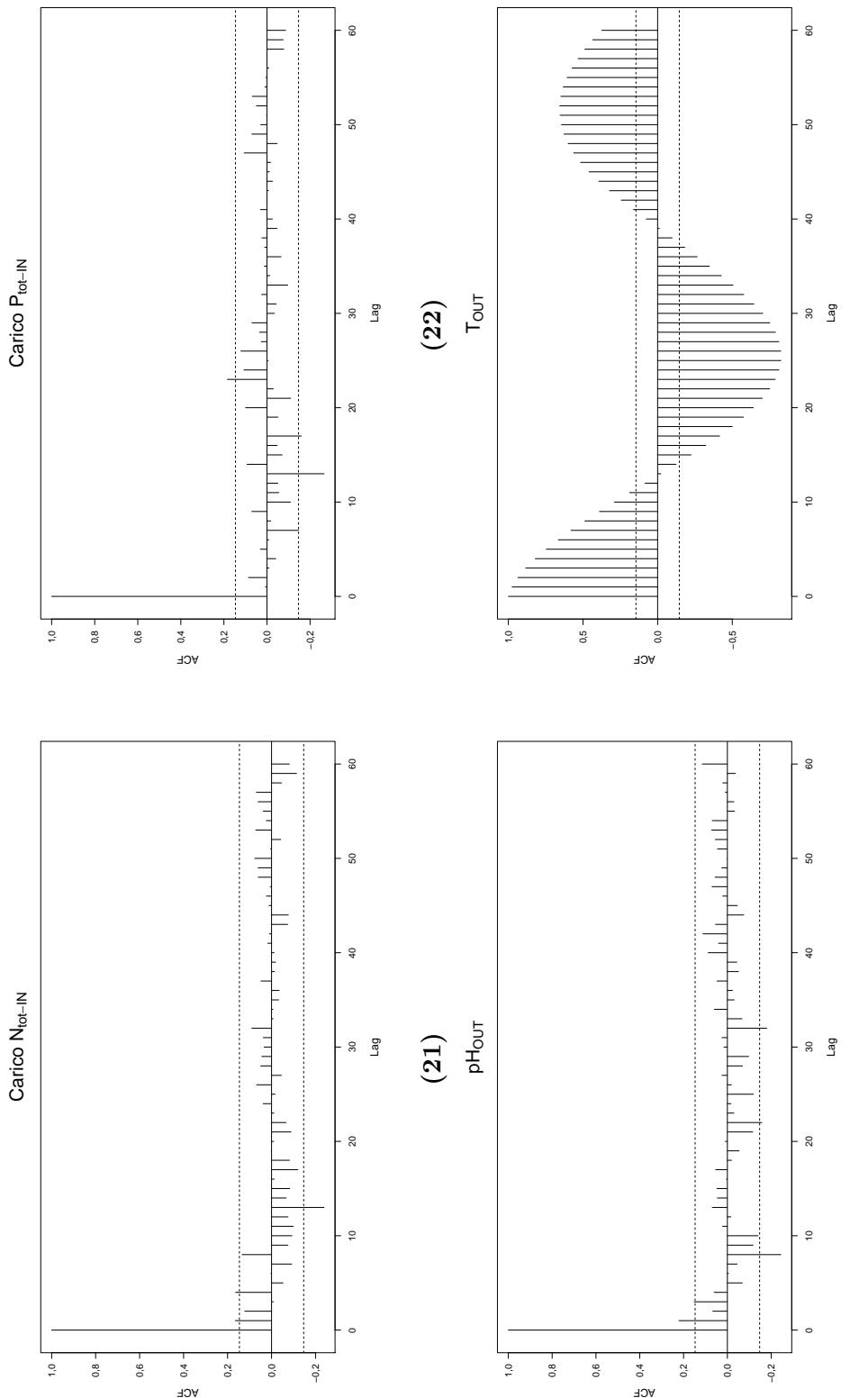


Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 6

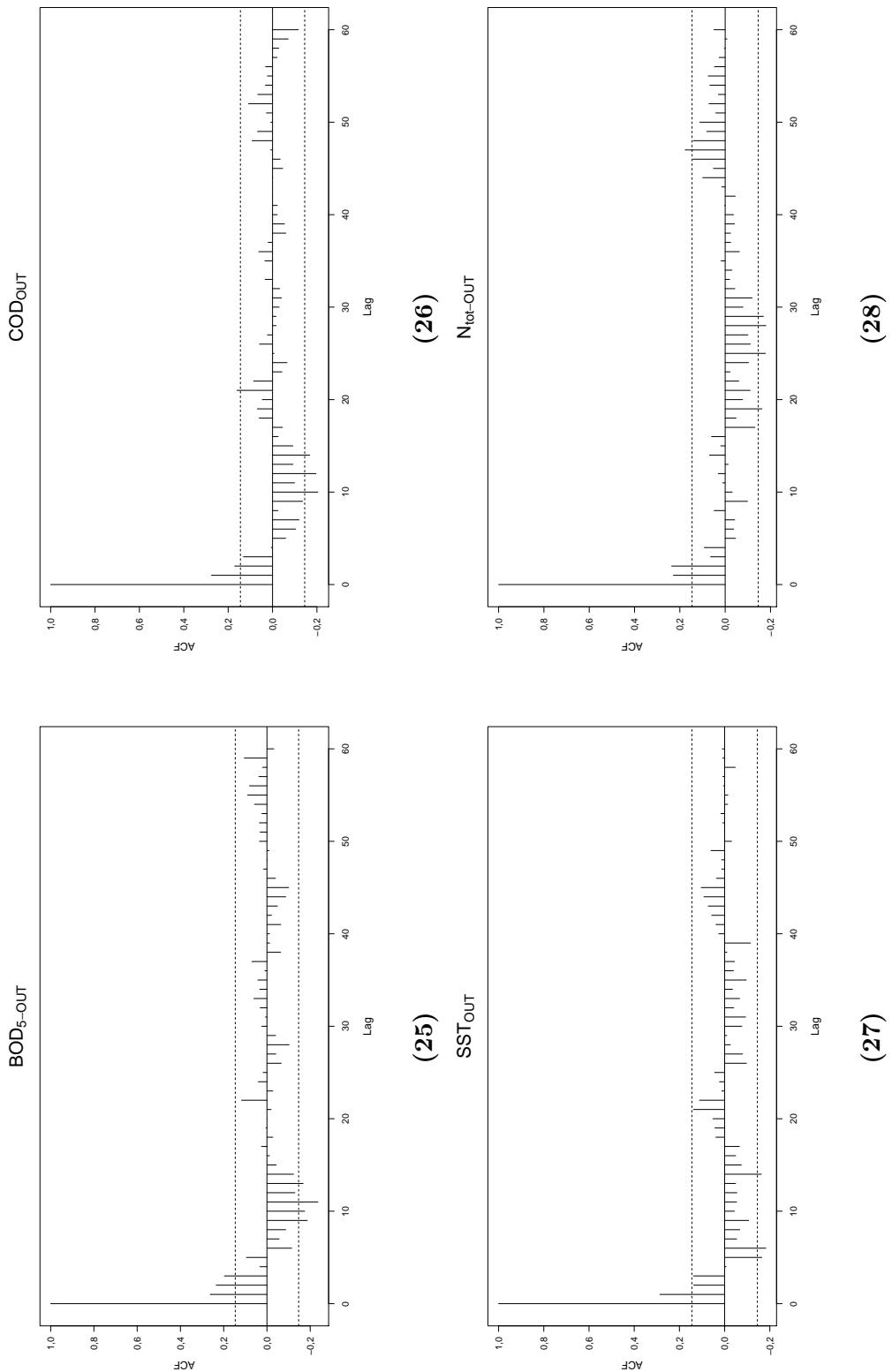


Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 7

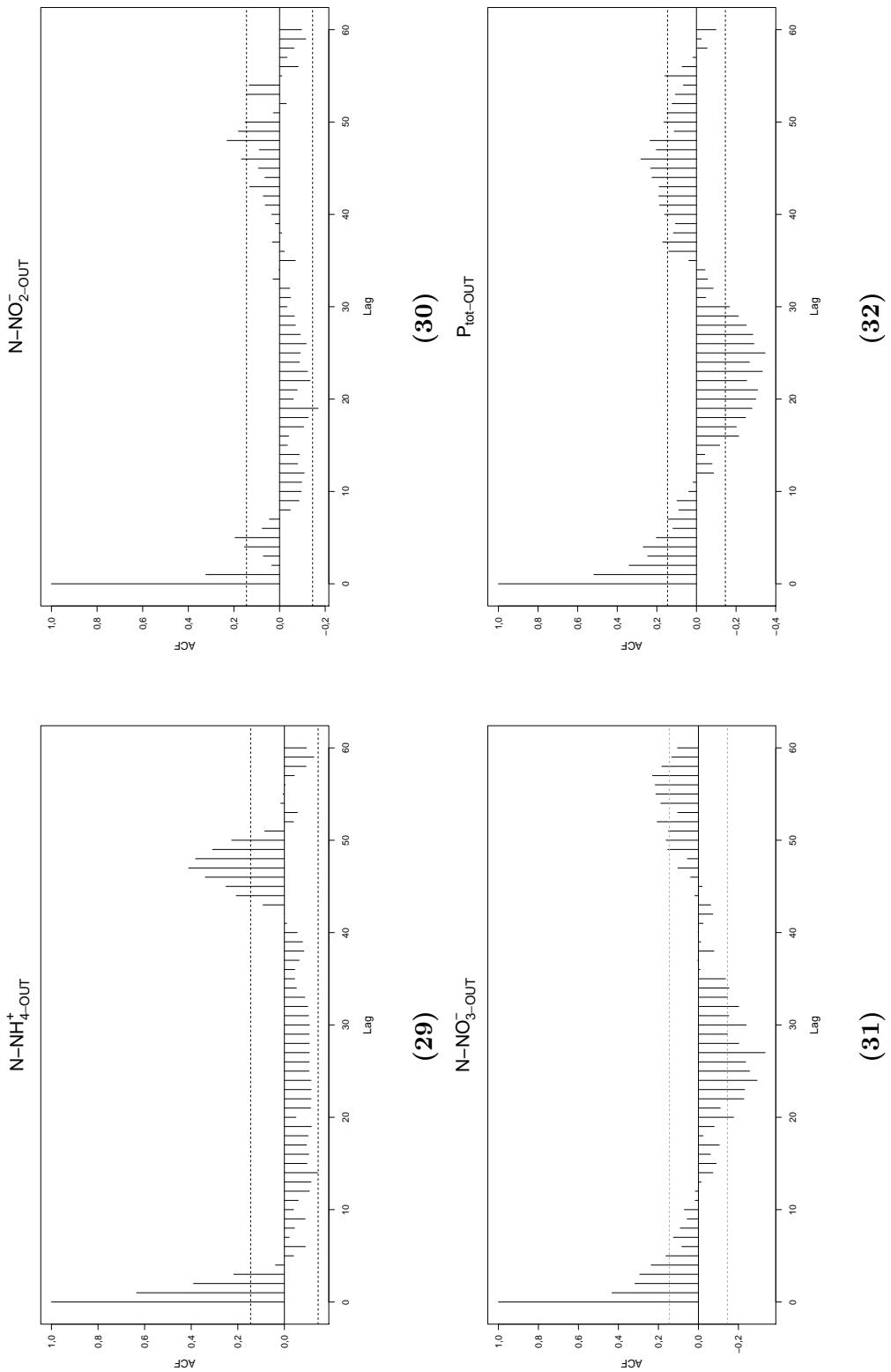


Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 8

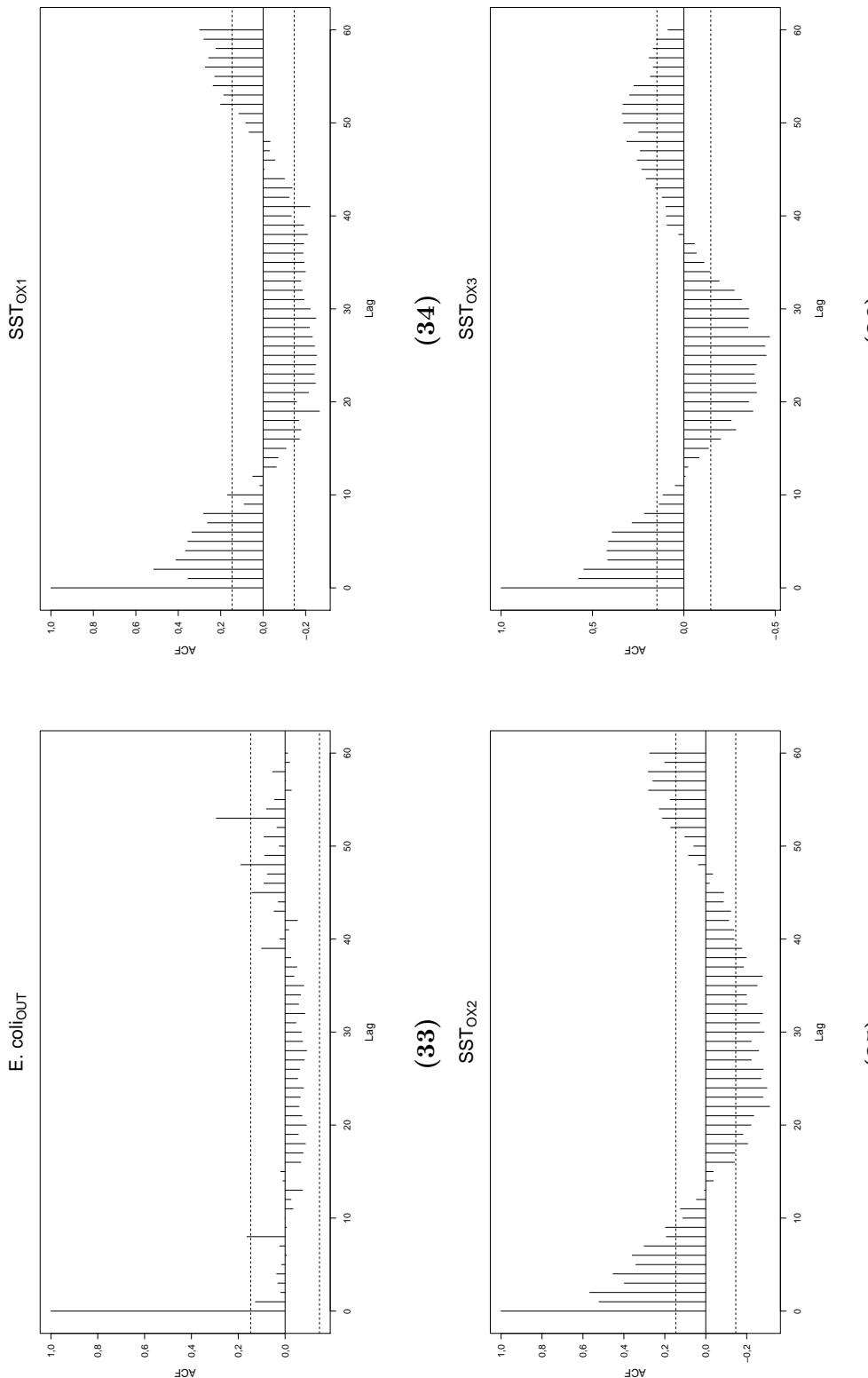
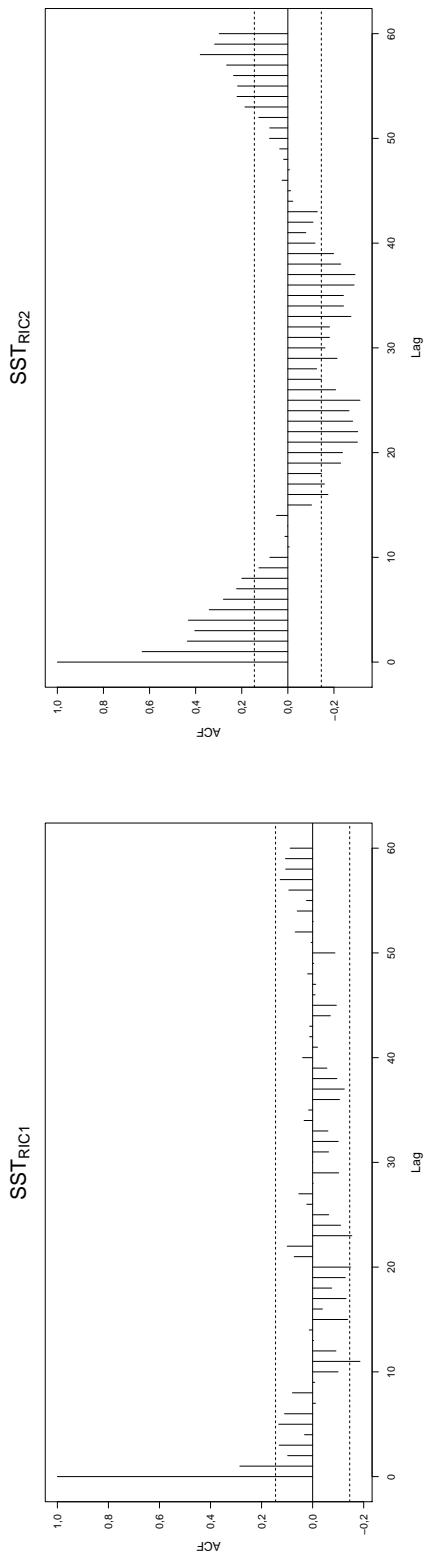
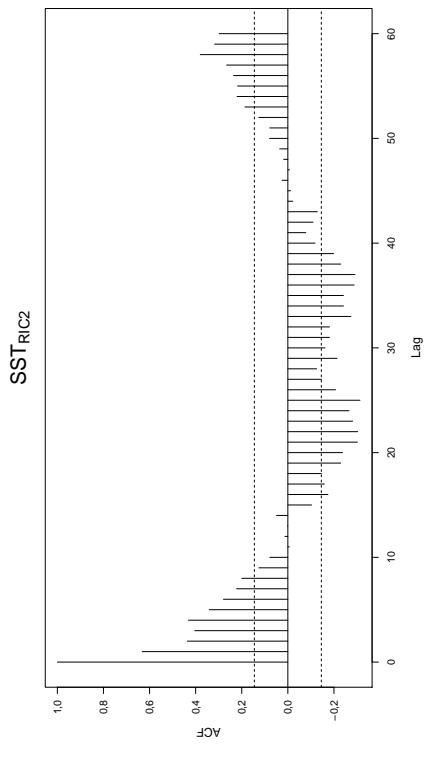


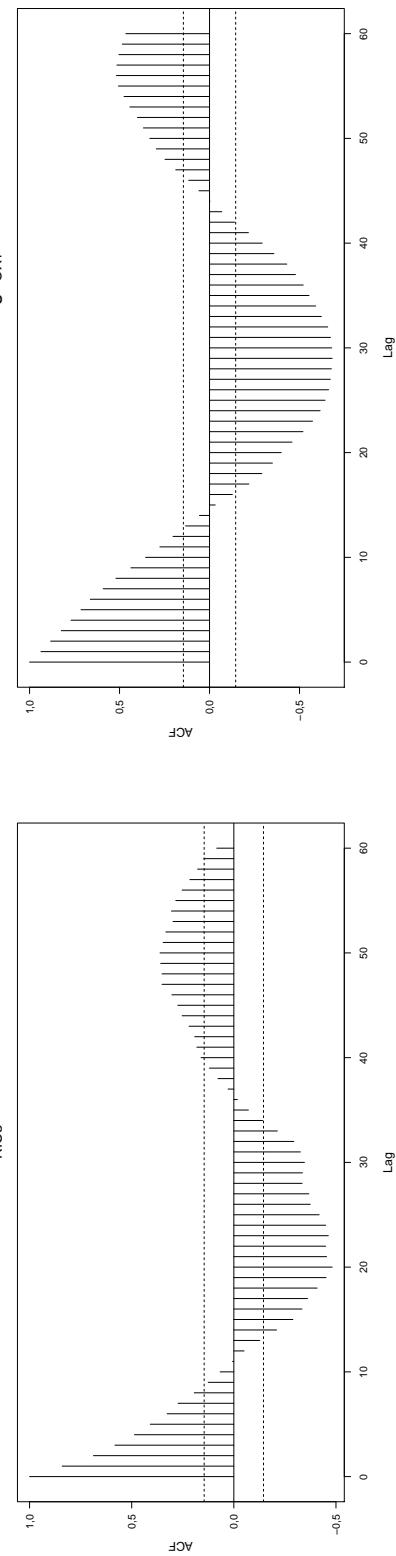
Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 9



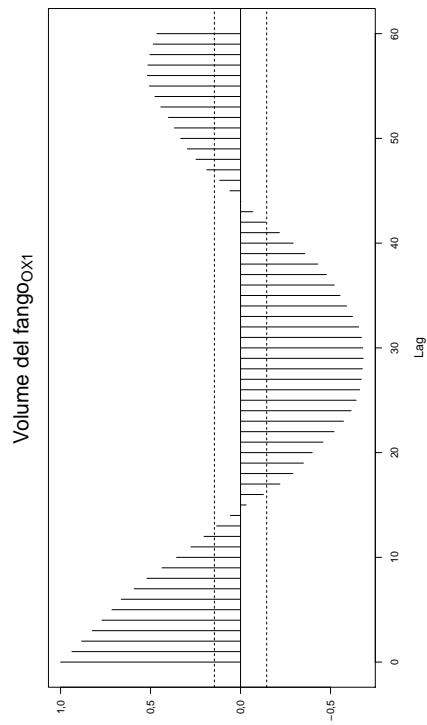
(37)



(38)



(39)



(40)

Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 10

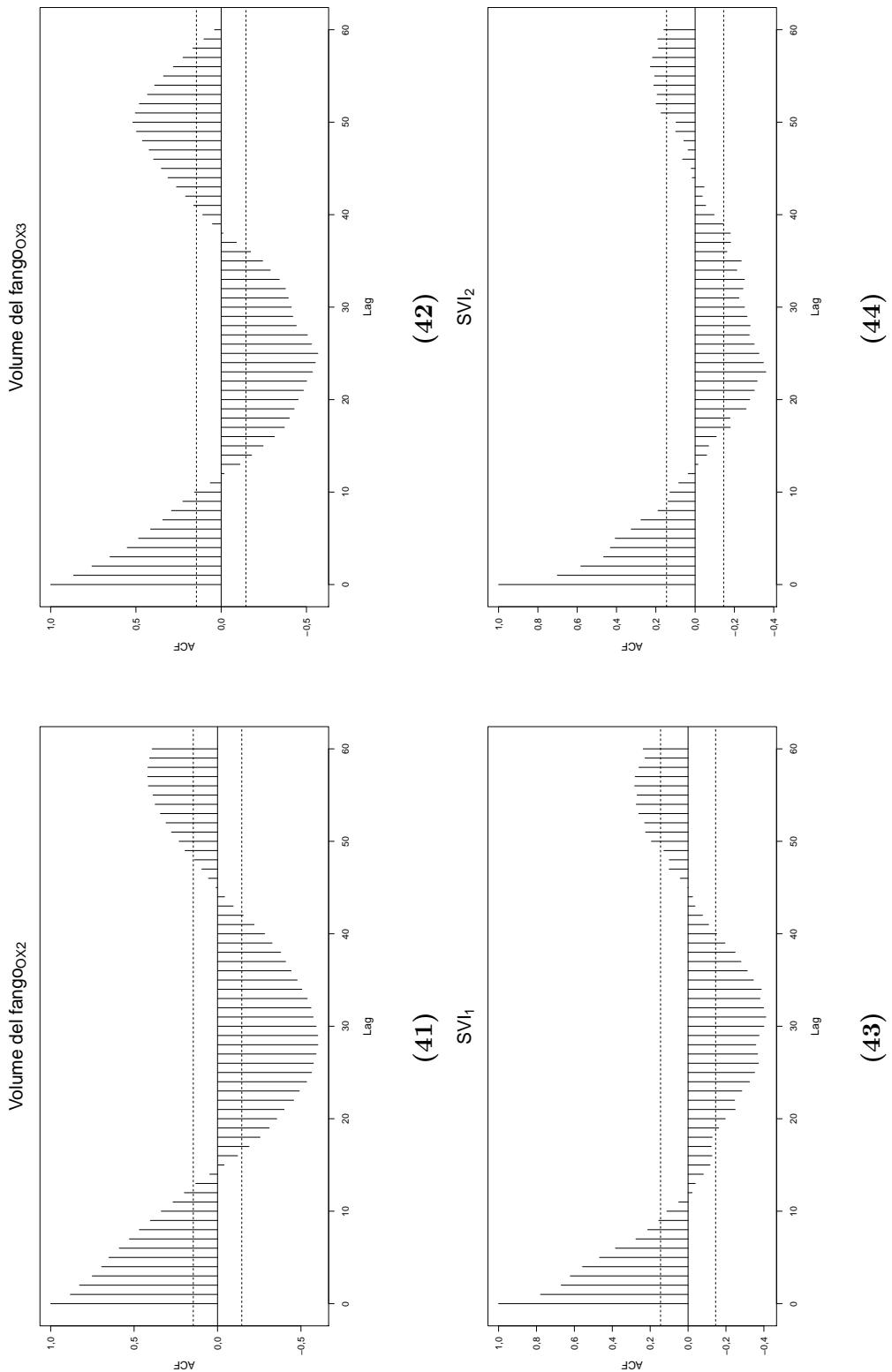
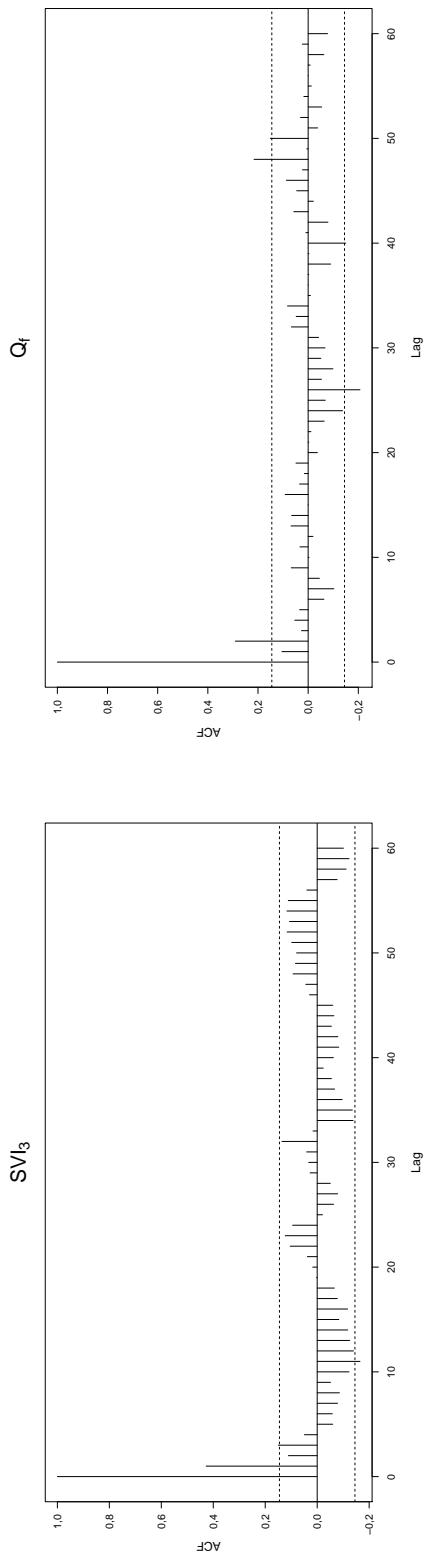
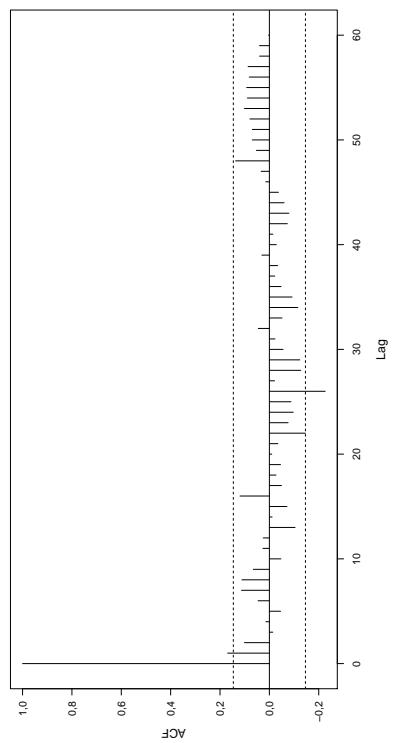


Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 11

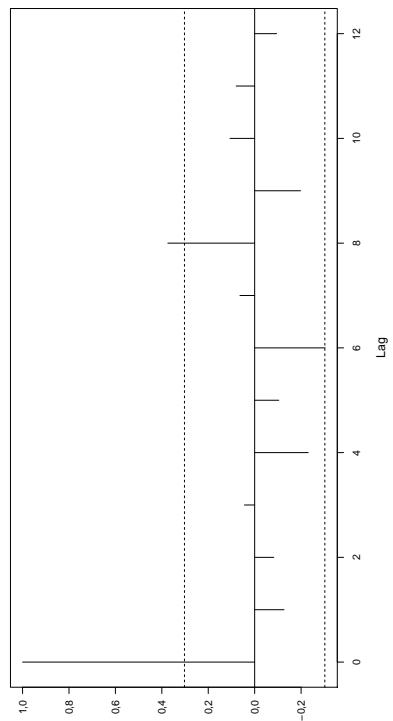


(45)
 SVl_3

(46)
 Q_f

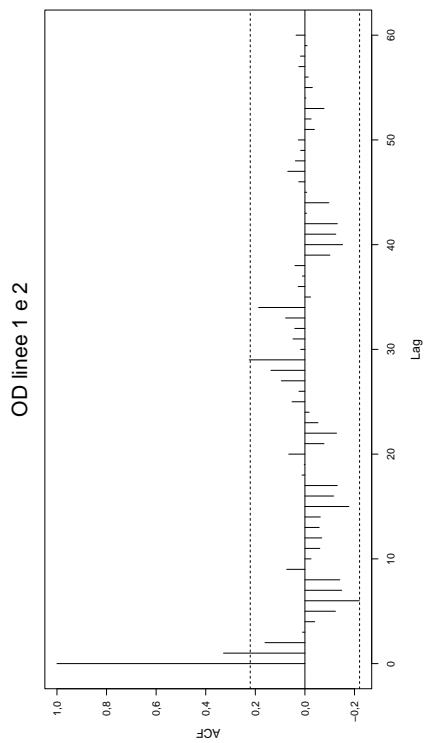


(47)
 C_f

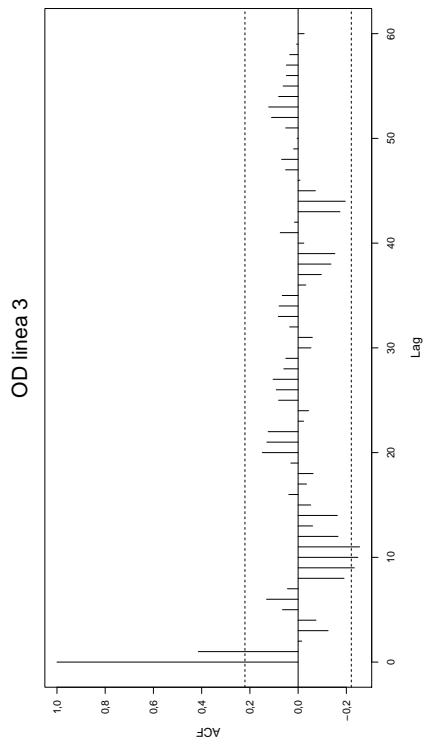


(48)
 SRT

Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 12



(49)



(50)

Figura 5.5.1: Correlogrammi impianto A - parte 13

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

IMPIANTO A - ingresso			IMPIANTO A - uscita		
	Periodicità (da ACF)	Periodo [settimane]		Periodicità (da ACF)	Periodo [settimane]
Q	-	-	pH	-	-
pH	Accennata	$\simeq 52$	T	Molto evidente	52
T	Molto evidente	52	Concentrazioni		
BOD₅	-	-	BOD₅	-	-
COD	-	-	COD	-	-
SST	-	-	SST	-	-
N_{tot}	-	-	N_{tot}	-	-
N-NH₄⁺	-	-	N-NH₄⁺	-	-
N-NO₂⁻	-	-	N-NO₂⁻	-	-
N-NO₃⁻	-	-	N-NO₃⁻	Evidente	$\simeq 52$
P_{tot}	-	-	P_{tot}	Evidente	48
E. coli	-	-	E. coli	-	-
Rapporti					
BOD₅/COD	-	-			
N_{tot}/BOD₅	-	-			
N_{tot}/COD	-	-			
P_{tot}/BOD₅	-	-			
P_{tot}/COD	-	-			
P_{tot}/N_{tot}	-	-			
Carichi					
BOD₅	-	-			
COD	-	-			
N_{tot}	-	-			
P_{tot}	-	-			
IMPIANTO A - parametri operativi					
	Periodicità (da ACF)	Periodo [settimane]			
SST_{OX1}	Evidente	$\simeq 52$			
SST_{OX2}	Evidente	$\simeq 52$			
SST_{OX3}	Molto evidente	52			
SST_{RIC1}	-	-			
SST_{RIC2}	Accennata	$\simeq 52$			
SST_{RIC3}	Molto evidente	52			
SSSOX₁	Molto evidente	52			
SSSOX₂	Molto evidente	52			
SSSOX₃	Molto evidente	52			
SVI₁	Evidente	52			
SVI₂	Evidente	52			
SVI₃	-	-			
Q_f	-	-			
C_f	-	-			
SRT	-	-			
OD - linee 1 e 2	-	-			
OD - linea 3	-	-			

Tabella 5.12: Periodicità individuate con l'analisi del correlogramma - impianto A. In GRIGIO sono segnati i parametri per cui era stata individuata una periodicità attraverso l'analisi esplorativa

Come indicato in Tabella 5.13, dai correlogrammi relativi all'impianto B si osservano periodicità annuali per la temperatura (Figura 5.5.2(3)(24) e di 45 settimane per portata e pH in ingresso (Figura 5.5.2(1)(2)). Il valore di queste ultime periodicità è abbastanza prossimo a 52 (stagionalità annuale) ed è possibile che sia influenzato dall'aggregazione dei dati di partenza. Non potendo, però, trarre conclusioni definitive al riguardo, sarebbe bene ripetere l'analisi quando si avranno più dati a disposizione.

Sebbene a prima vista la Figura 5.5.2(29) mostri un correlogramma dalla forma che suggerisce stagionalità, un'osservazione più attenta fa scorgere una certa irregolarità che non permette di trarre conclusioni riguardo alla periodicità della serie di dati.

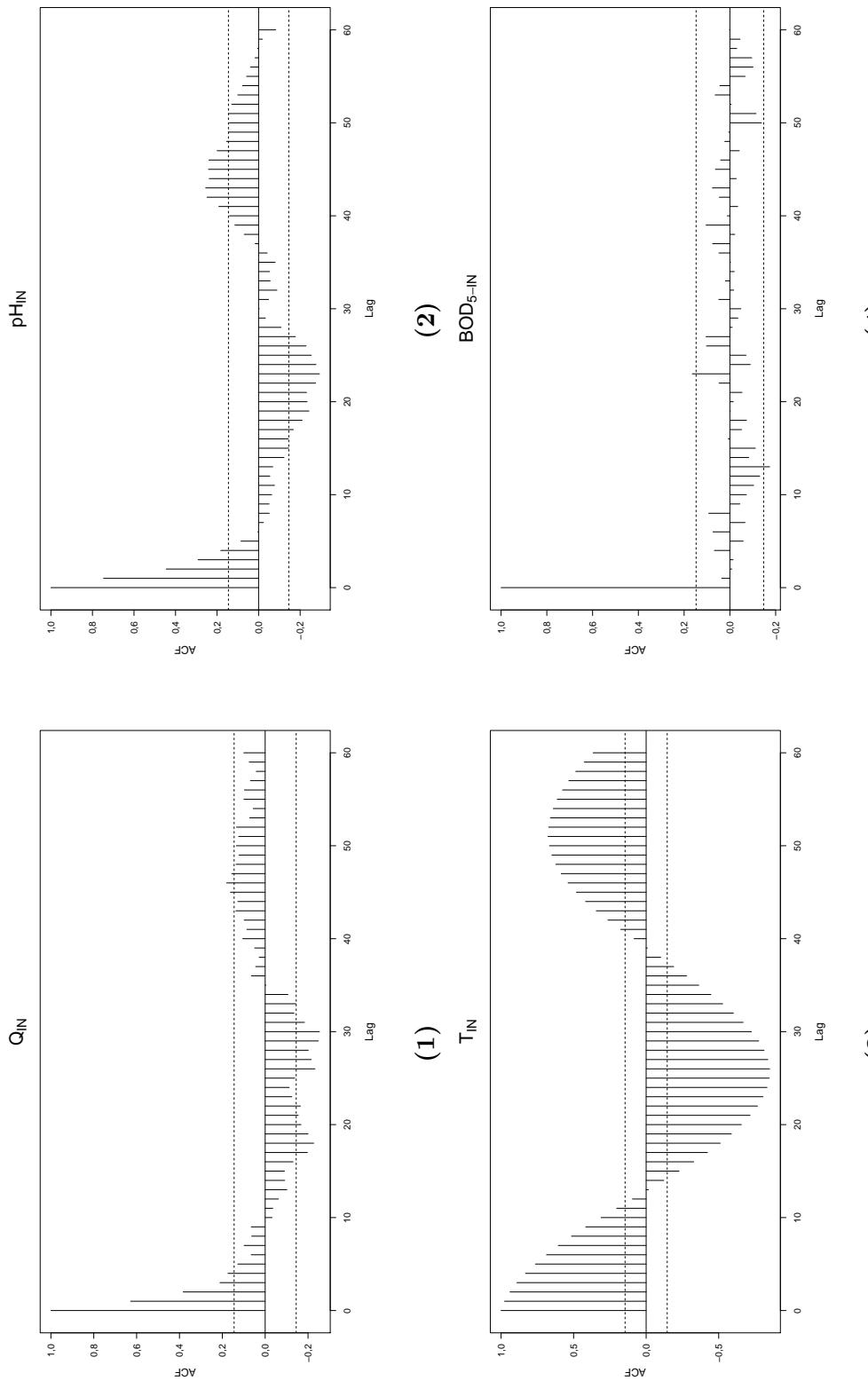


Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 1

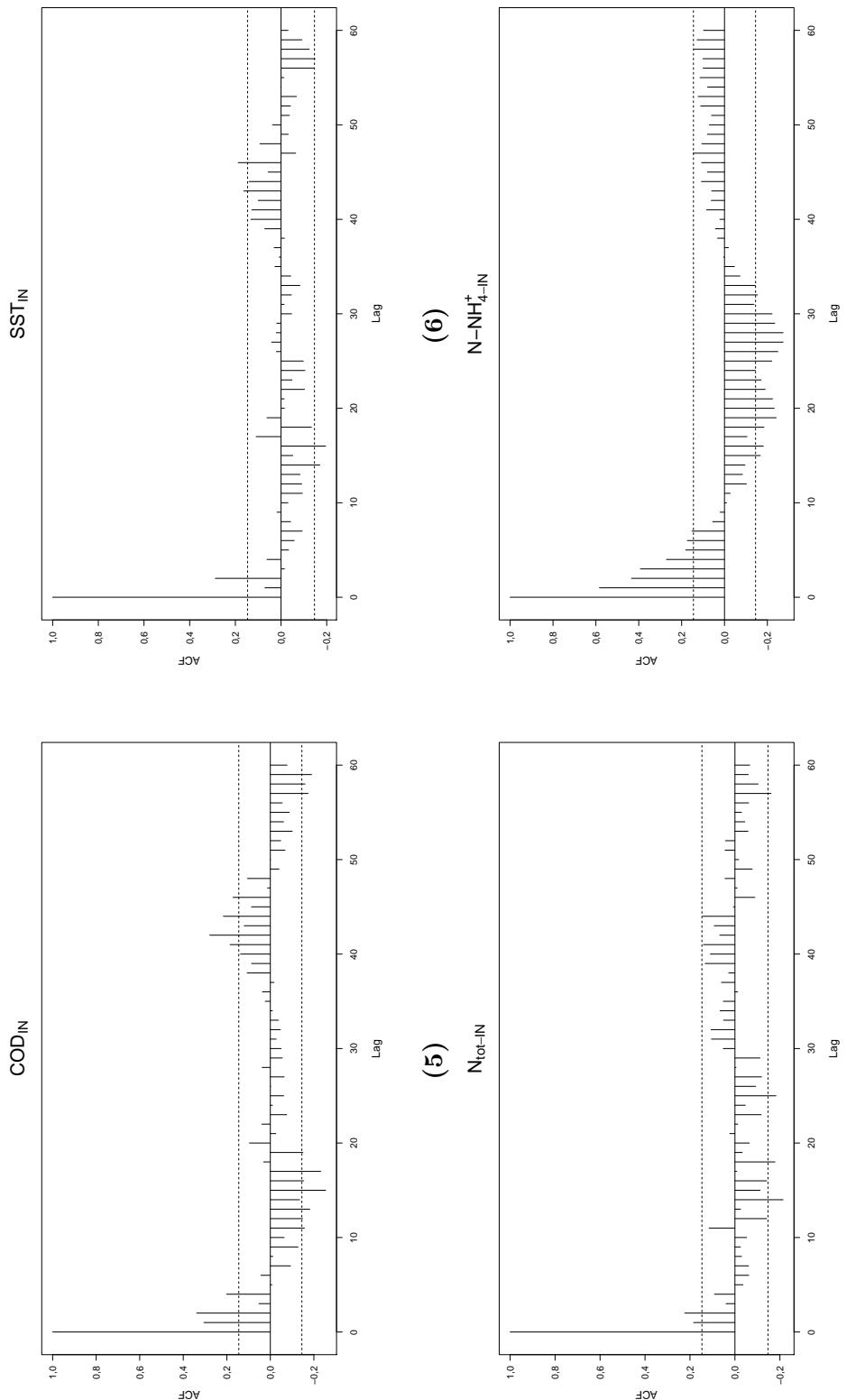


Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 2

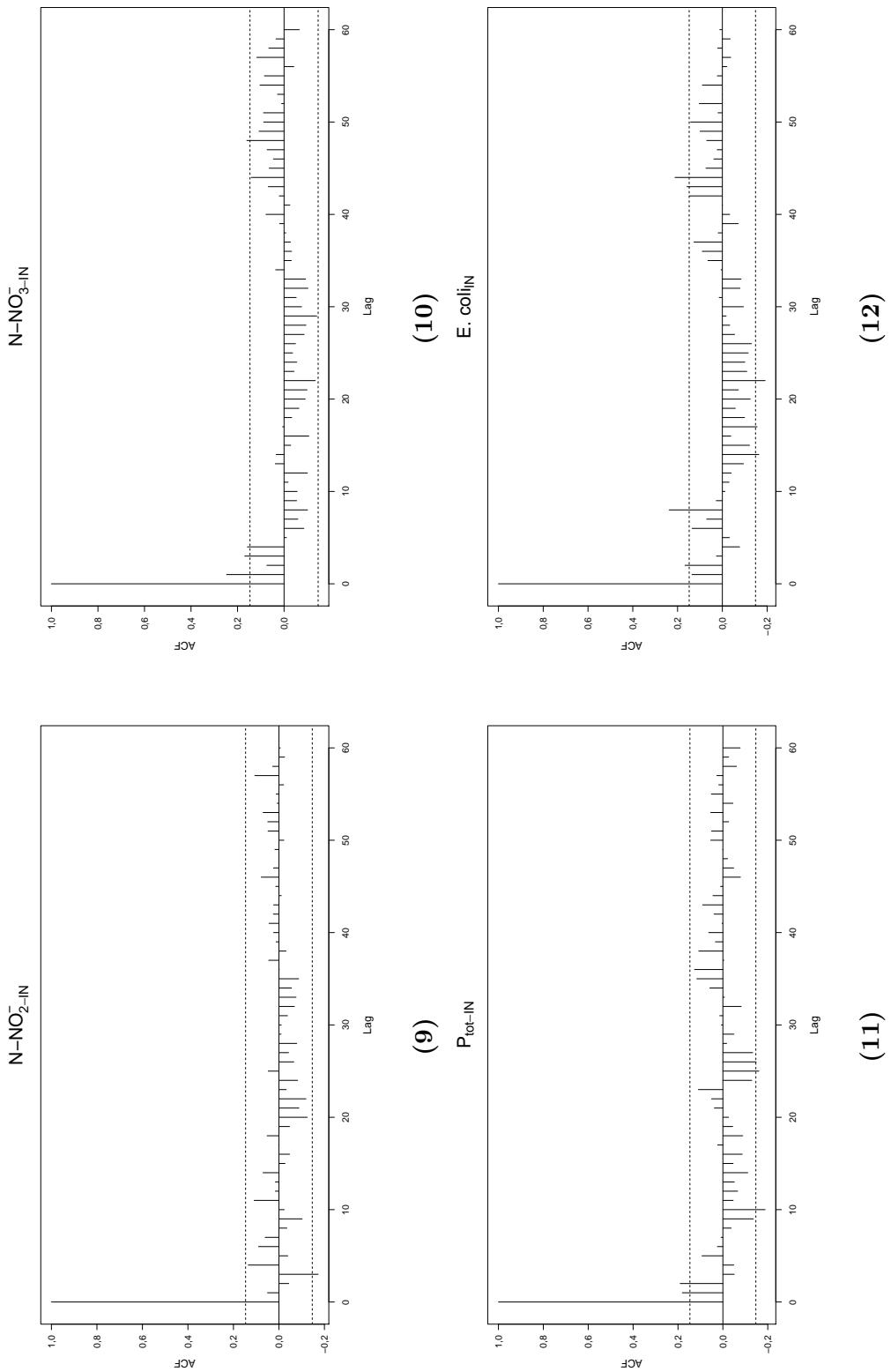
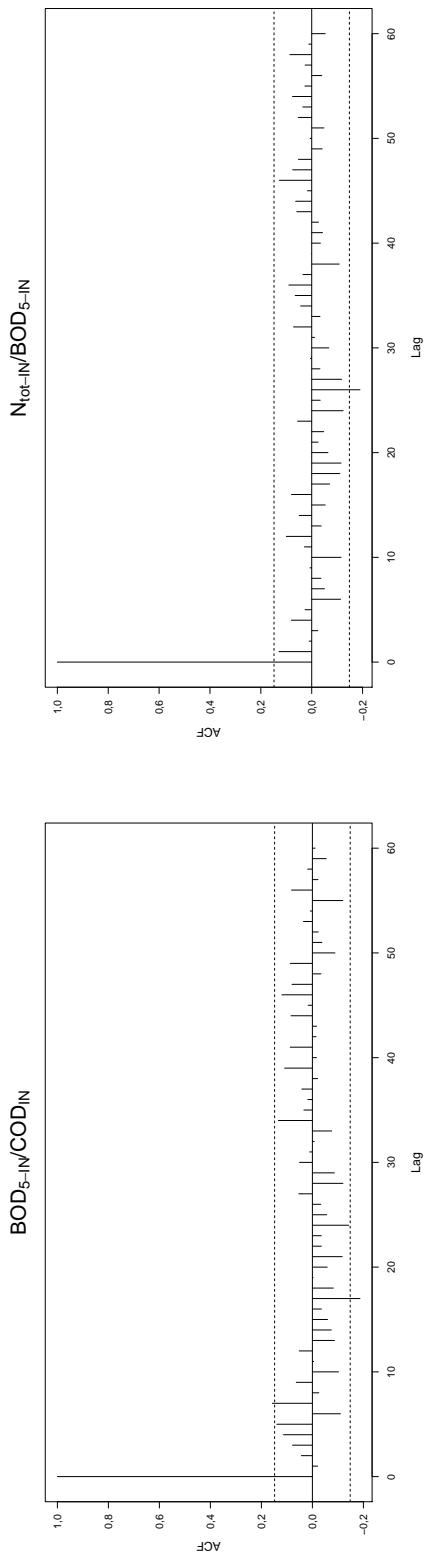
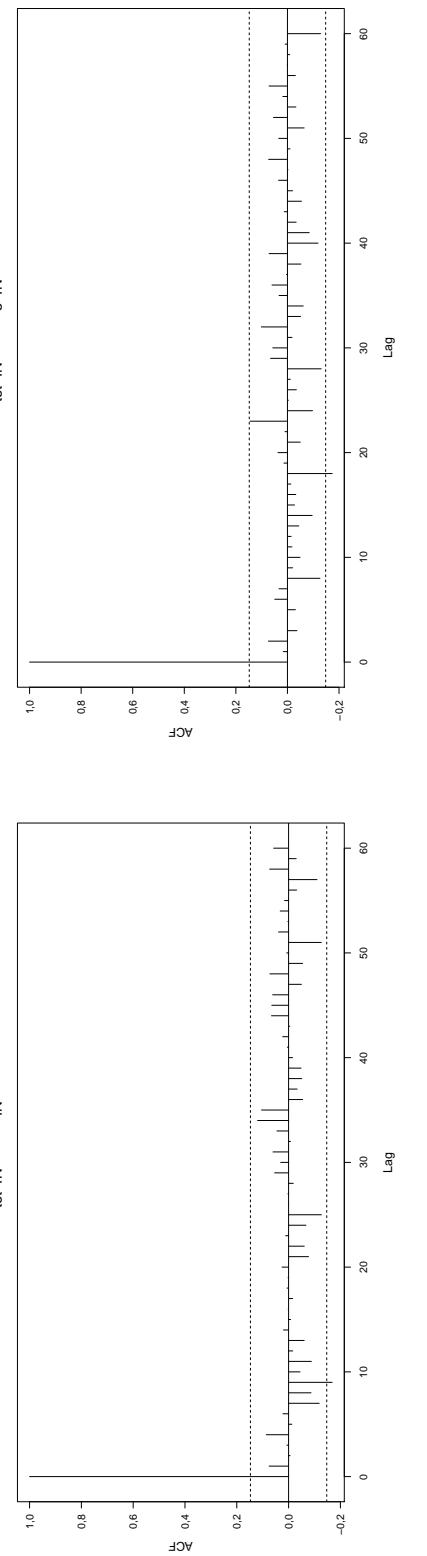


Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 3



(13)

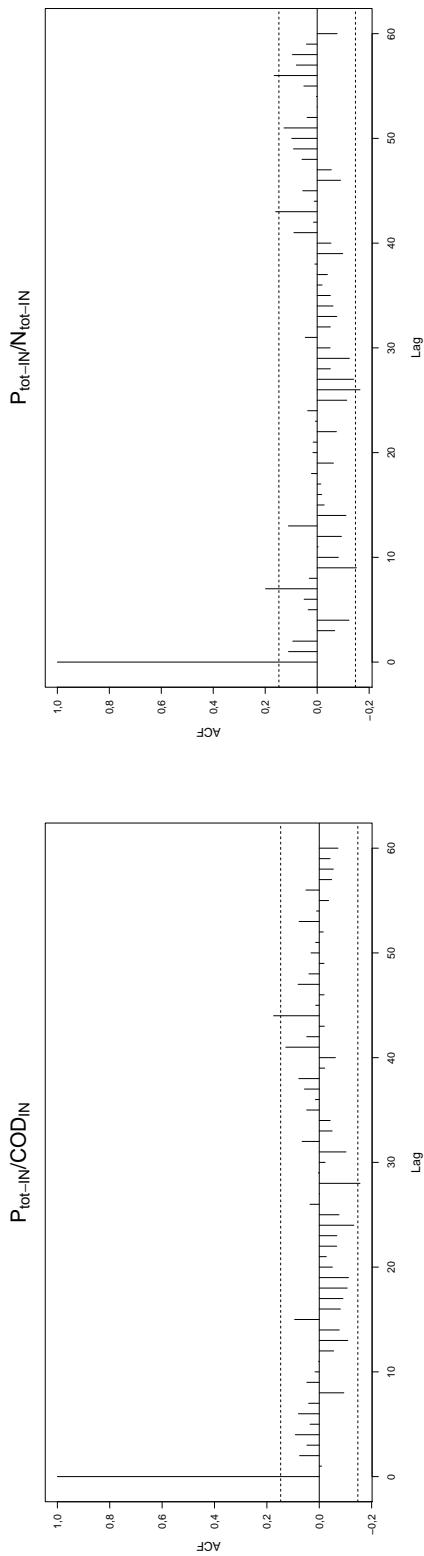
(14)



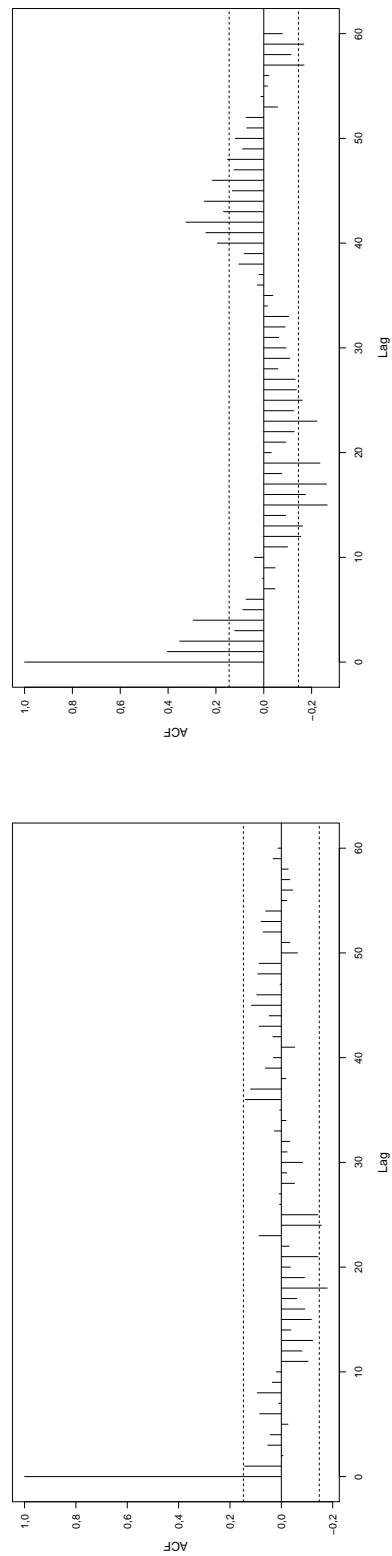
(15)

(16)

Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 4



(17)
Carico BOD_5-IN



(18)
Carico COD_{IN}

Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 5

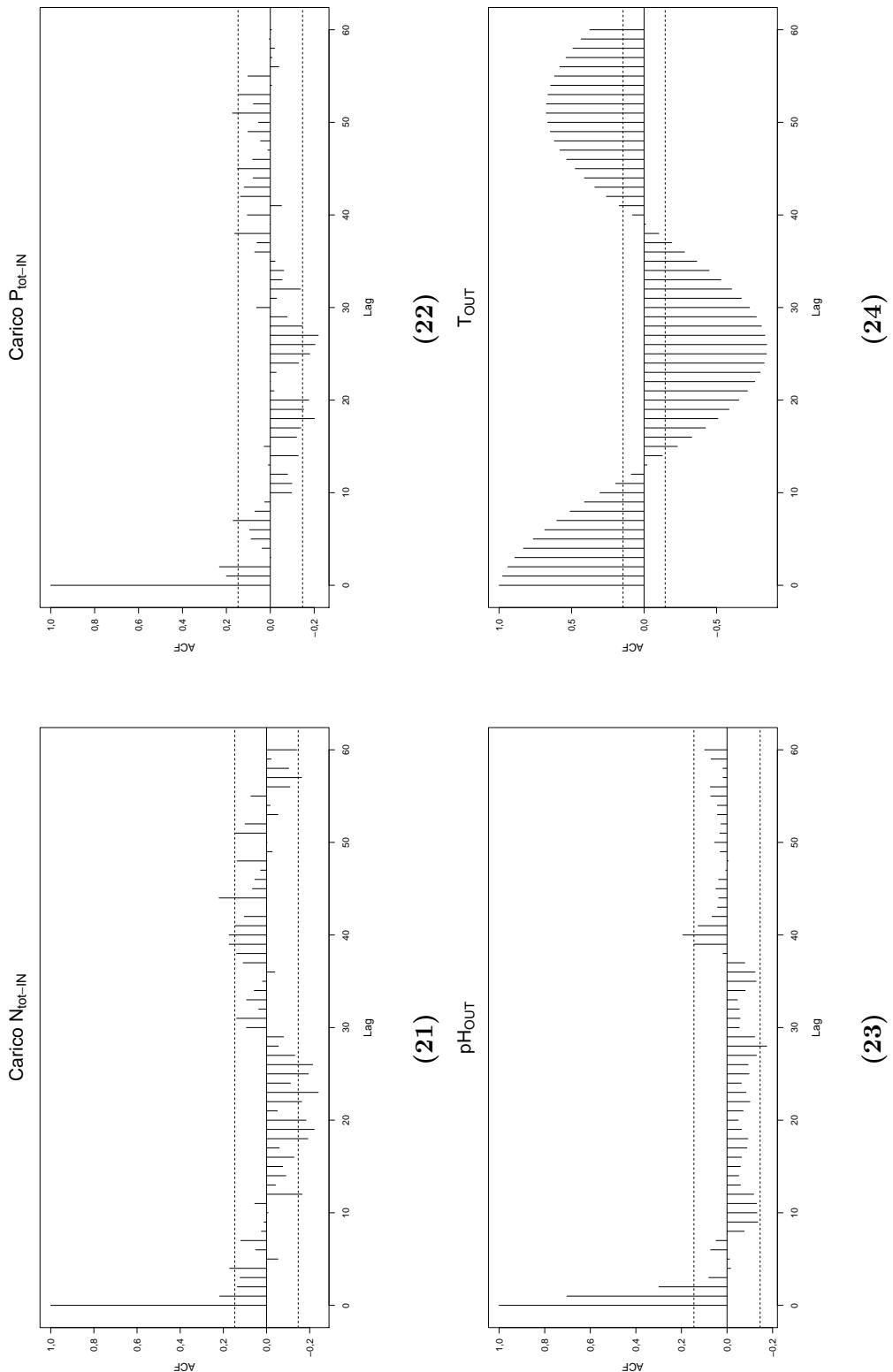
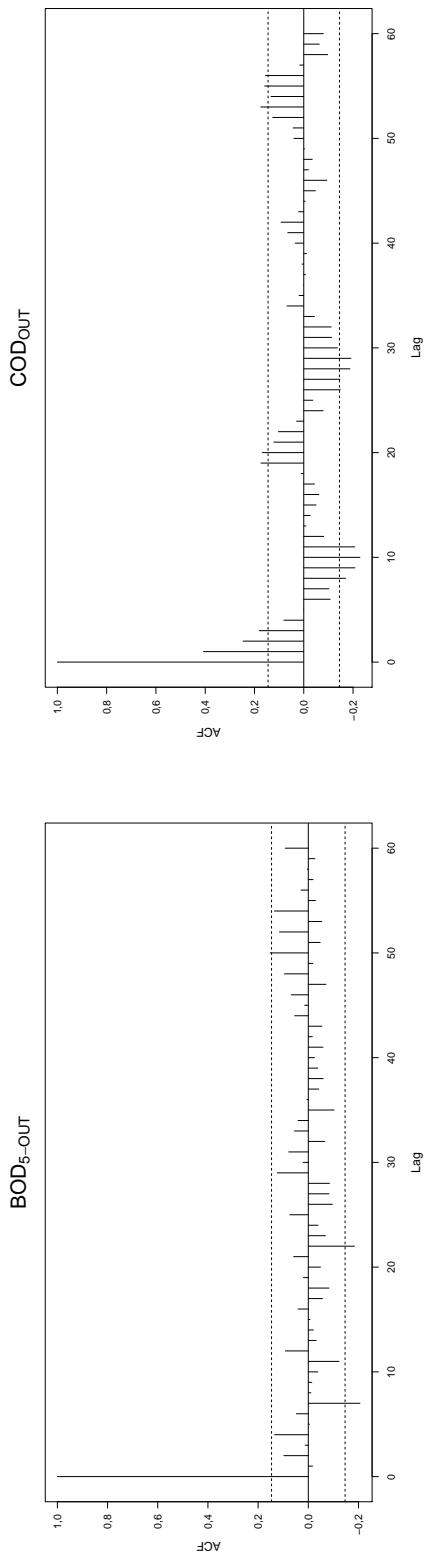
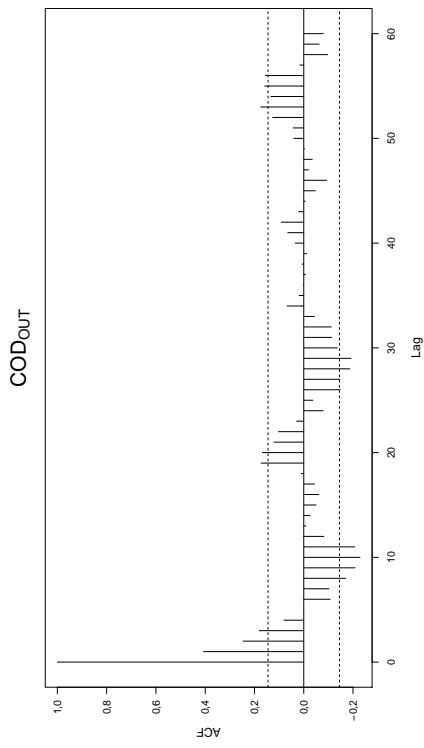


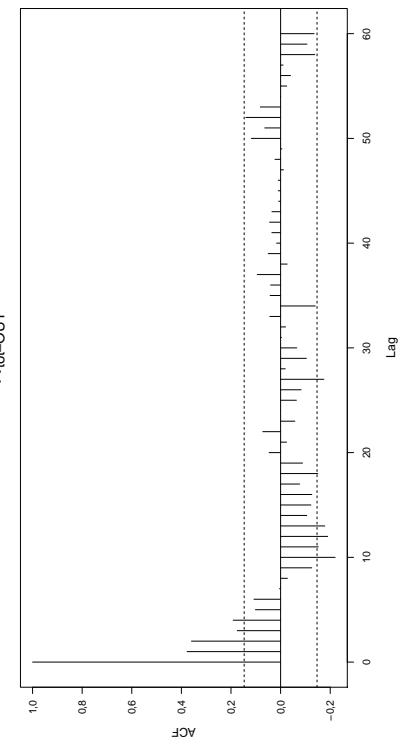
Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 6



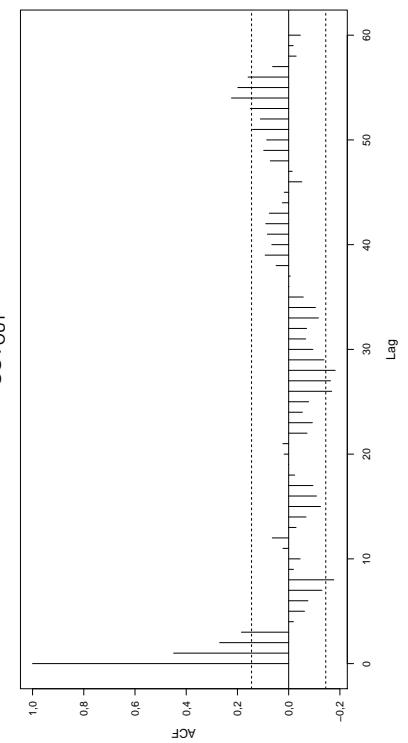
(25)



(26)

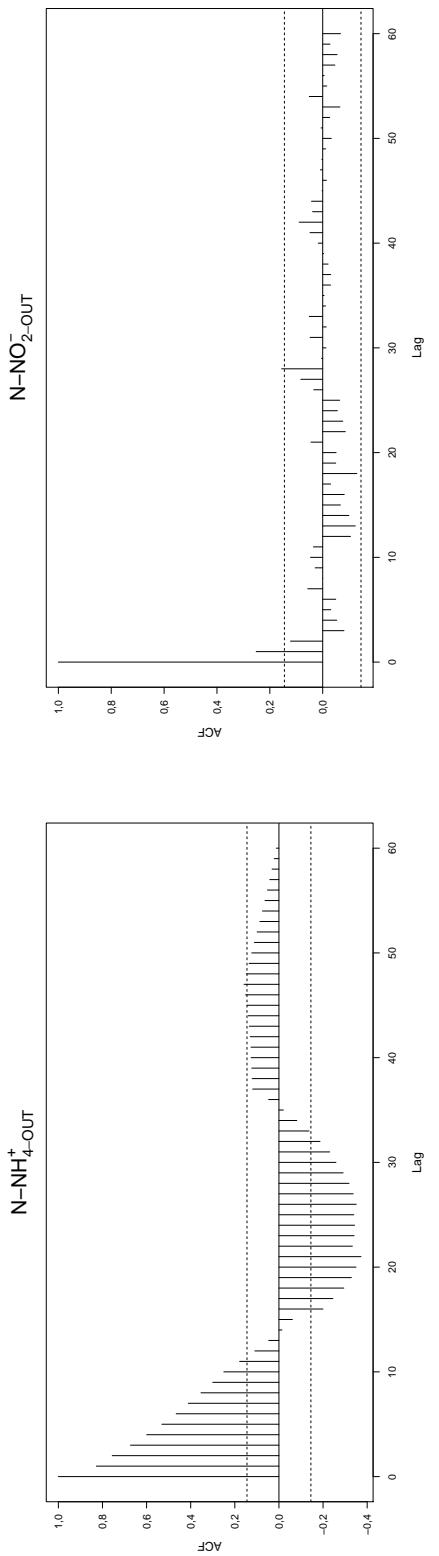


(28)

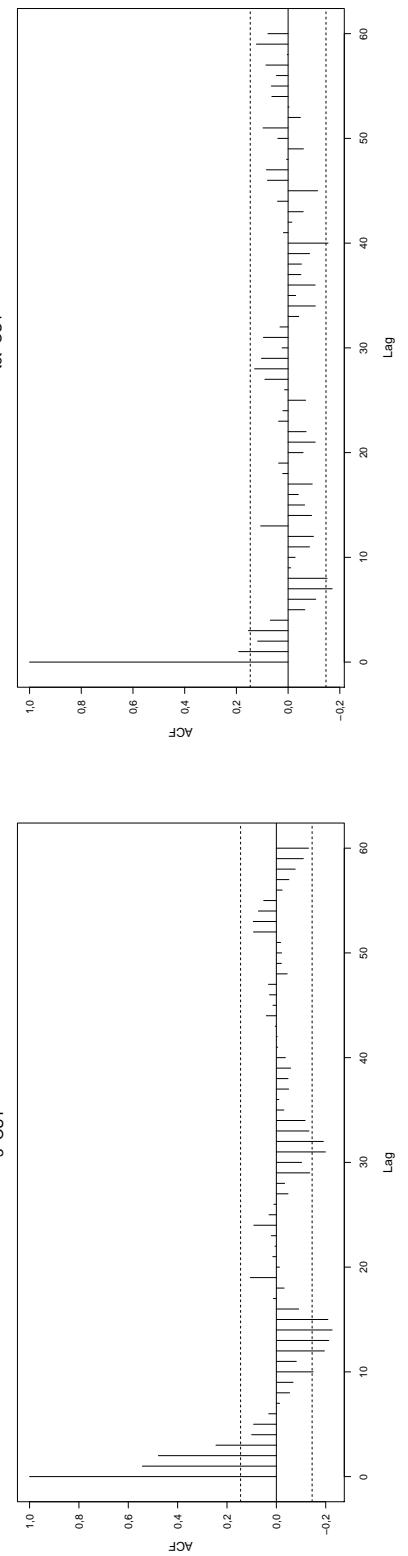


(27)

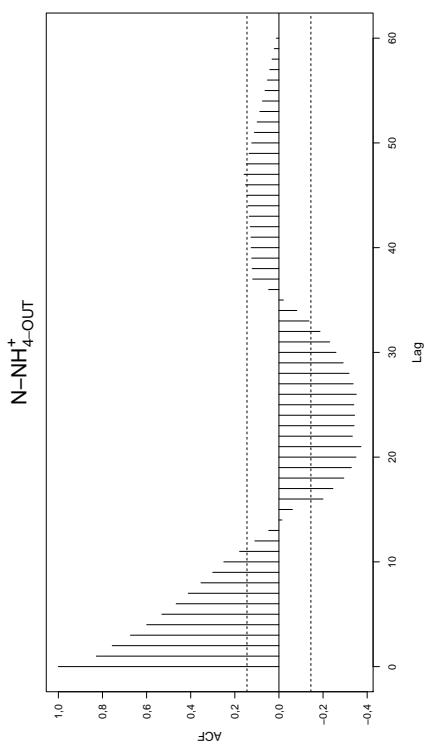
Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 7



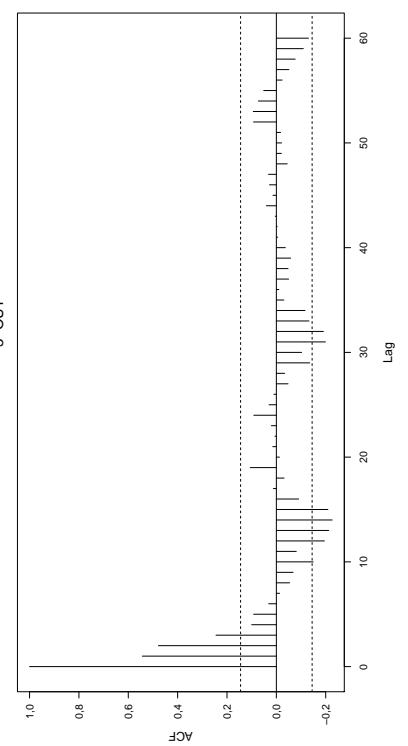
(29)



(30)

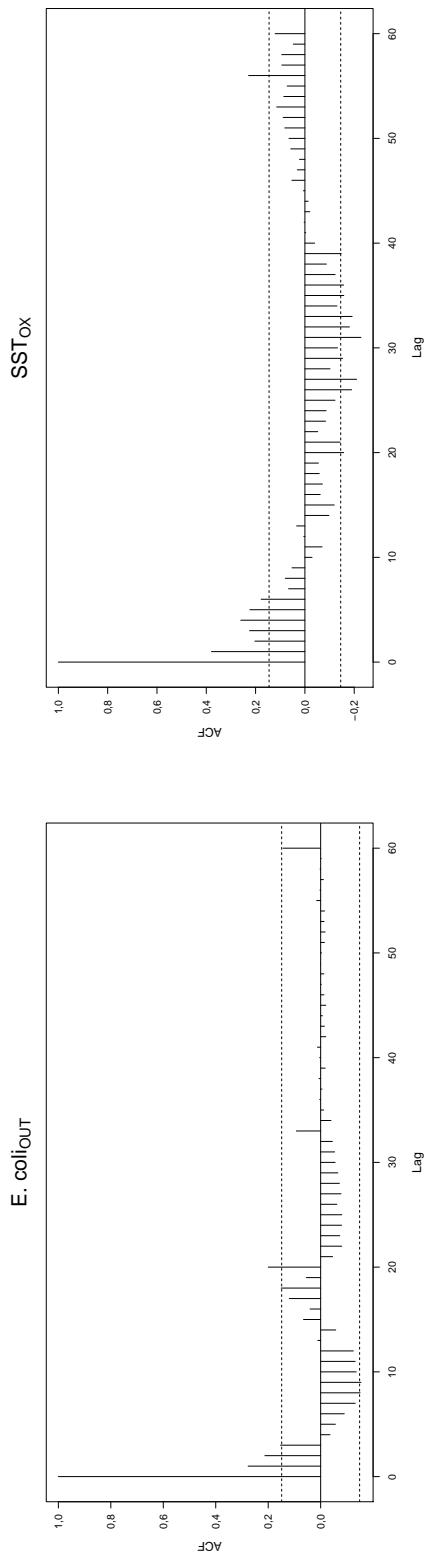


(29)

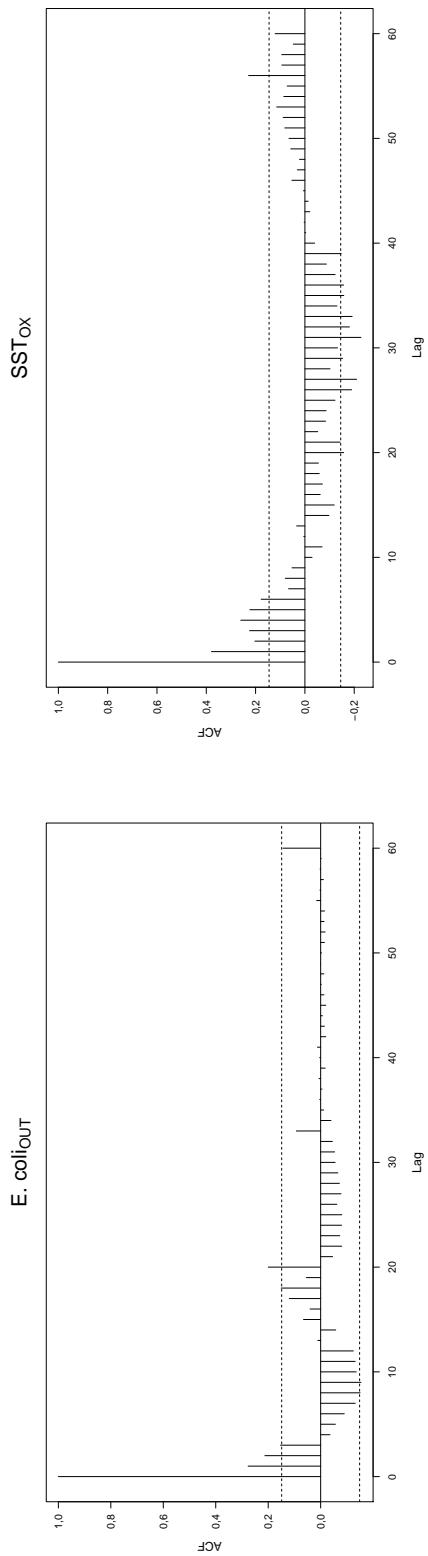


(31)

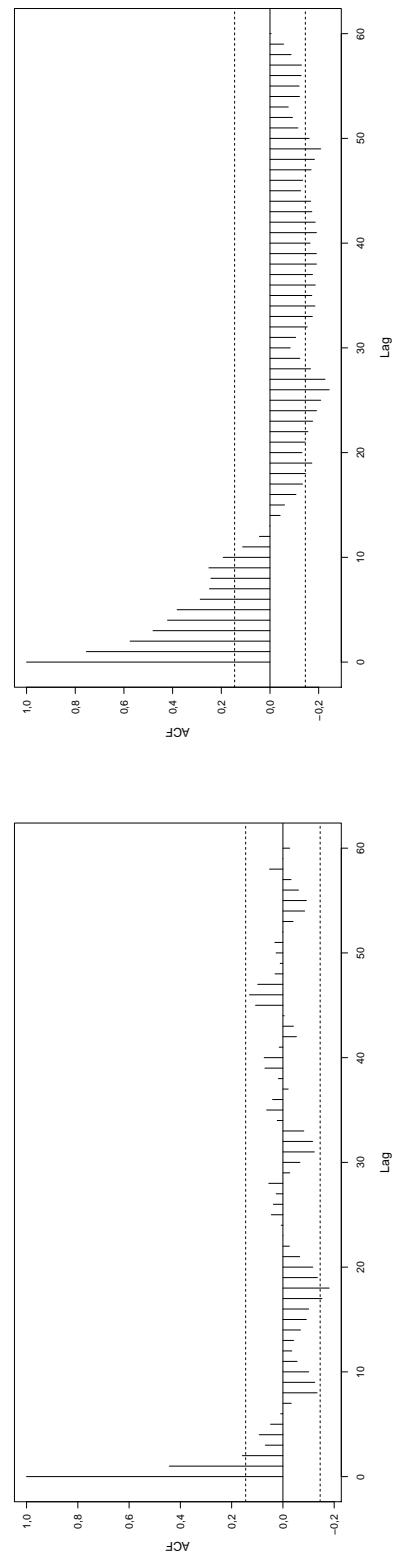
Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 8



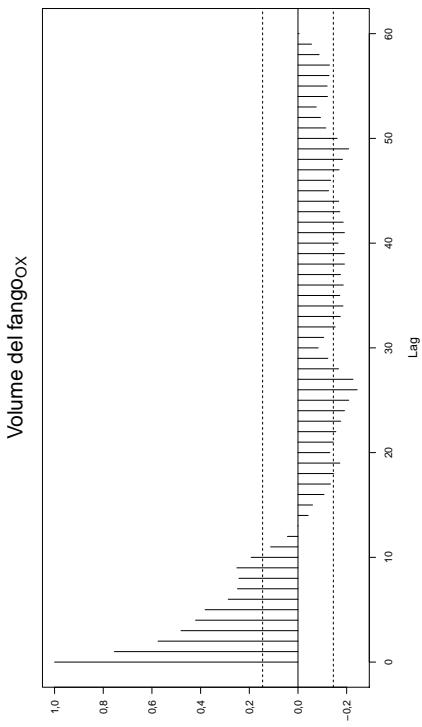
(33)



(34)



(35)



(36)

Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 9

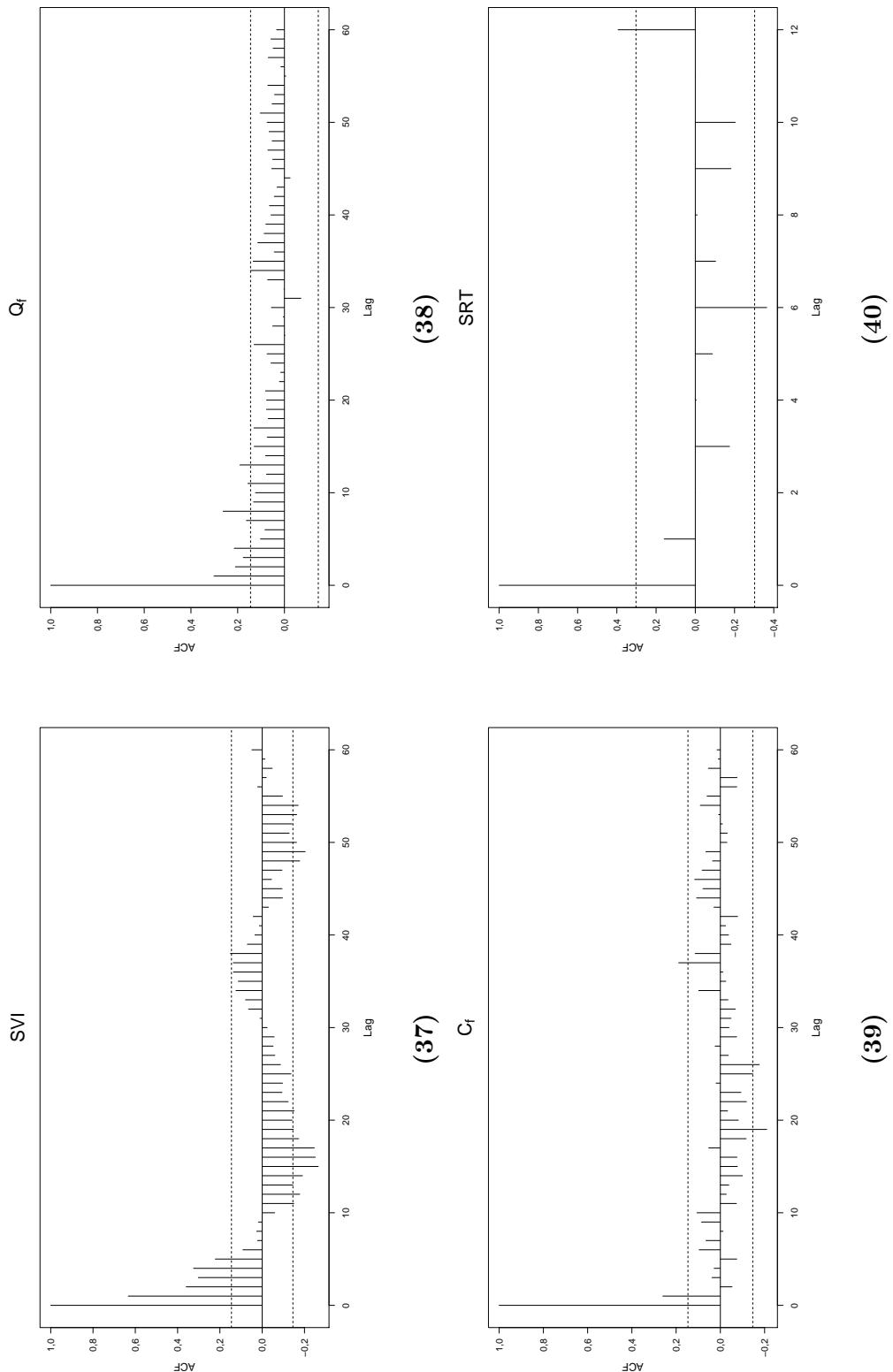


Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 10

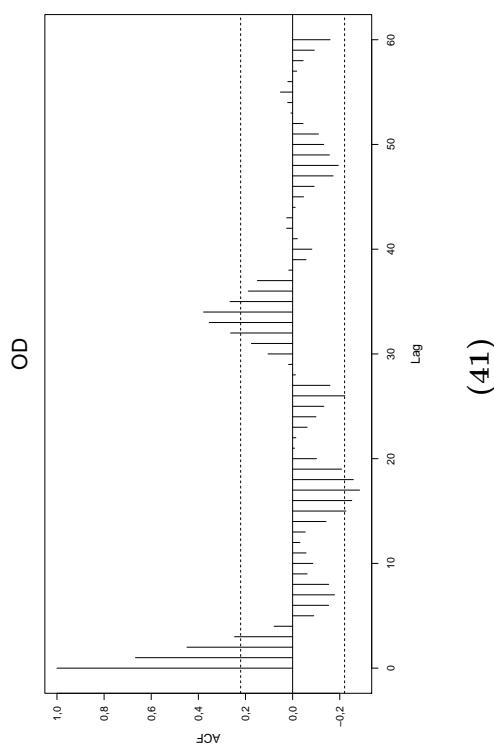


Figura 5.5.2: Correlogrammi impianto B - parte 11

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

IMPIANTO B - ingresso			IMPIANTO B - uscita		
	Periodicità (da ACF)	Periodo [settimane]		Periodicità (da ACF)	Periodo [settimane]
Q	Accennata	45	pH	-	-
pH	Accennata	45	T	Molto evidente	52
T	Molto evidente	52	Concentrazioni		
BOD₅	-	-	BOD₅	-	-
COD	-	-	COD	-	-
SST	-	-	SST	-	-
N_{tot}	-	-	N_{tot}	-	-
N-NH₄⁺	-	-	N-NH₄⁺	-	-
N-NO₂⁻	-	-	N-NO₂⁻	-	-
N-NO₃⁻	-	-	N-NO₃⁻	-	-
P_{tot}	-	-	P_{tot}	-	-
E. coli	-	-	E. coli	-	-
Rapporti			IMPIANTO B - parametri operativi		
BOD₅/COD	-	-	SST_{OX}	-	-
N_{tot}/BOD₅	-	-	SST_{RIC}	-	-
N_{tot}/COD	-	-	SSSOX	-	-
P_{tot}/BOD₅	-	-	SVI	-	-
P_{tot}/COD	-	-	Q_f	-	-
P_{tot}/N_{tot}	-	-	C_f	-	-
Carichi			SRT	-	-
BOD₅	-	-	OD	-	-
COD	-	-			
N_{tot}	-	-			
P_{tot}	-	-			

Tabella 5.13: Periodicità individuate con l’analisi del correlogramma - impianto B. In GRIGIO sono segnati i parametri per cui era stata individuata una periodicità attraverso l’analisi esplorativa

5.6 Analisi della correlazione

Per valutare la correlazione tra due serie di dati ci si è serviti del coefficiente di correlazione di Spearman (sottosezione 4.6.1) e della rappresentazione grafica sotto forma di *scatterplot*, ovvero la visualizzazione sul piano cartesiano della relazione che sussiste tra le variabili in ascissa e in ordinata.

I risultati di questa analisi sono mostrati in Figura 5.6.1 e Figura 5.6.2 e la loro interpretazione è riportata rispettivamente in Tabella 5.14 e Tabella 5.15. Essi confermano perfettamente le osservazioni che derivano dall’analisi esplorativa dei dati e, di conseguenza, le conclusioni a cui si giunge rimangono invariate (si veda la sezione 5.1). Si precisa che la correlazione determinata con il coefficiente di Spearman è calcolata sull’intero arco temporale considerato. L’analisi esplorativa dei dati, invece, permette di individuare correlazione anche su periodi limitati.

CAPITOLO 5. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

IMPIANTO A		
Parametri	r	Grado di correlazione
BOD _{5-IN} - COD _{IN}	0,75	Forte
COD _{IN} - 1/Q	0,00	Nulla
BOD _{5-IN} - 1/Q	0,07	Molto debole
COD _{IN} - SST _{IN}	0,81	Molto forte
BOD _{5-IN} - SST _{IN}	0,66	Forte
N _{tot-IN} - N-NH _{4-IN} ⁺	0,76	Forte
N _{tot-IN} - 1/Q	-0,02	Molto debole
CaricoBOD _{5-IN} - T _{IN}	-0,14	Molto debole
CaricoCOD _{IN} - T _{IN}	-0,18	Molto debole
BOD _{5-IN} - BOD _{5-OUT}	0,00	Nulla
COD _{IN} - COD _{OUT}	-0,10	Molto debole
SST _{IN} - SST _{OUT}	0,01	Molto debole
SST _{OUT} - Q	0,03	Molto debole
N _{tot-IN} - N _{tot-OUT}	0,06	Molto debole
P _{tot-IN} - P _{tot-OUT}	-0,05	Molto debole
pH _{IN} - pH _{OUT}	0,42	Moderata
T _{IN} - T _{OUT}	0,99	Molto forte
SST _{OX1} - CaricoCOD _{IN}	0,34	Debole
SST _{OX2} - CaricoCOD _{IN}	0,19	Molto debole
SST _{OX3} - CaricoCOD _{IN}	-0,03	Molto debole
SSS _{OX1} - SVI ₁	0,82	Molto forte
SSS _{OX2} - SVI ₂	0,72	Forte
SSS _{OX3} - SVI ₃	0,35	Debole

Tabella 5.14: Coefficienti di correlazione di Spearman e gradi di correlazione - impianto A

IMPIANTO B		
Parametri	r	Grado di correlazione
BOD _{5-IN} - COD _{IN}	0,80	Molto forte
COD _{IN} - 1/Q	-0,06	Molto debole
BOD _{5-IN} - 1/Q	-0,07	Molto debole
COD _{IN} - SST _{IN}	0,78	Forte
BOD _{5-IN} - SST _{IN}	0,68	Forte
N _{tot-IN} - N-NH _{4-IN} ⁺	0,38	Debole
N _{tot-IN} - 1/Q	0,07	Molto debole
CaricoBOD _{5-IN} - T _{IN}	0,10	Molto debole
CaricoCOD _{IN} - T _{IN}	0,05	Molto debole
BOD _{5-IN} - BOD _{5-OUT}	0,14	Molto debole
COD _{IN} - COD _{OUT}	0,16	Molto debole
SST _{IN} - SST _{OUT}	0,12	Molto debole
SST _{OUT} - Q	0,04	Molto debole
N _{tot-IN} - N _{tot-OUT}	0,23	Debole
P _{tot-IN} - P _{tot-OUT}	-0,02	Molto debole
pH _{IN} - pH _{OUT}	0,50	Moderata
T _{IN} - T _{OUT}	0,99	Molto forte
SST _{OX} - CaricoCOD _{IN}	-0,05	Molto debole
SSSOX - SVI	0,60	Forte

Tabella 5.15: Coefficienti di correlazione di Spearman e gradi di correlazione - impianto B

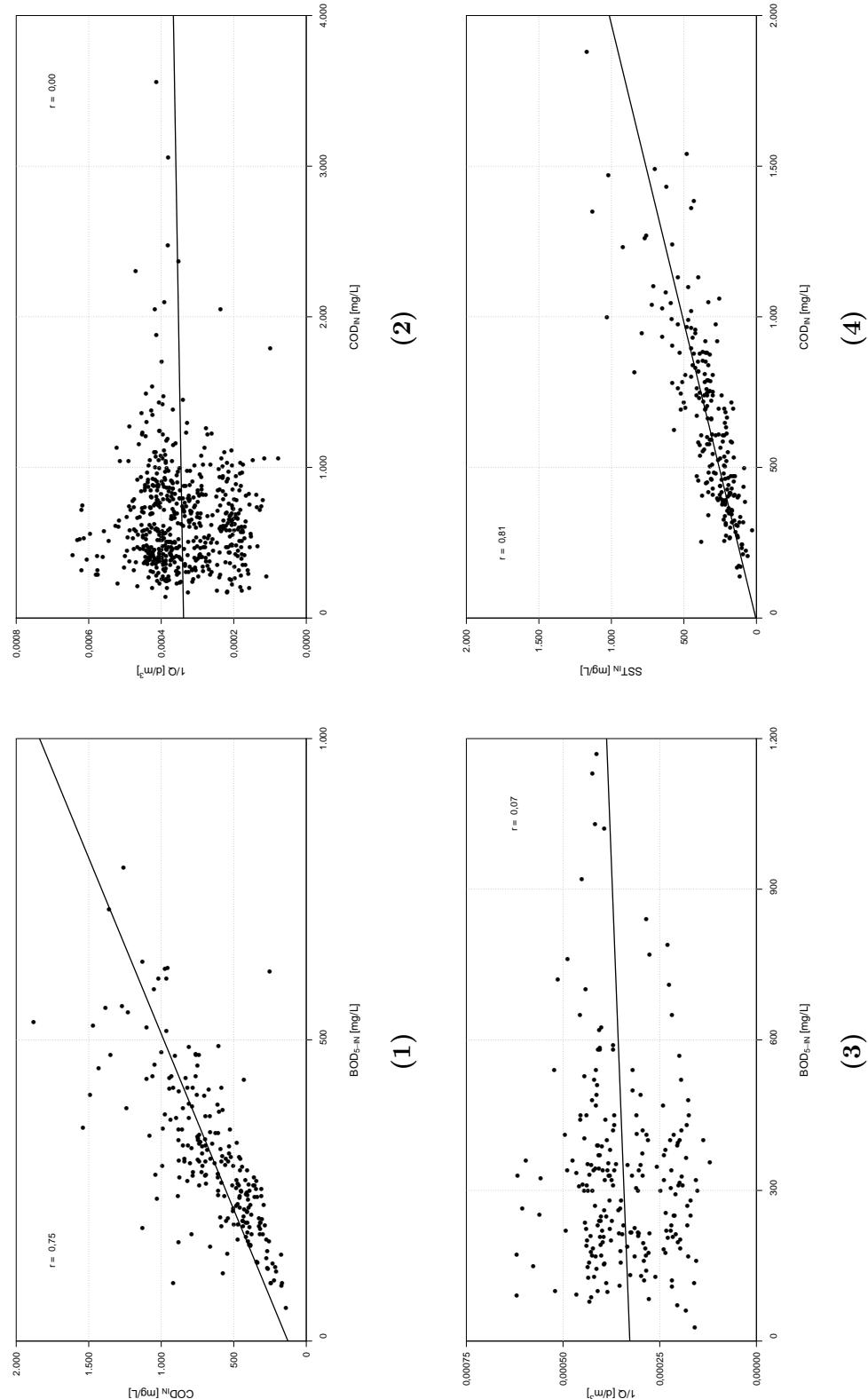


Figura 5.6.1: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto A - parte 1

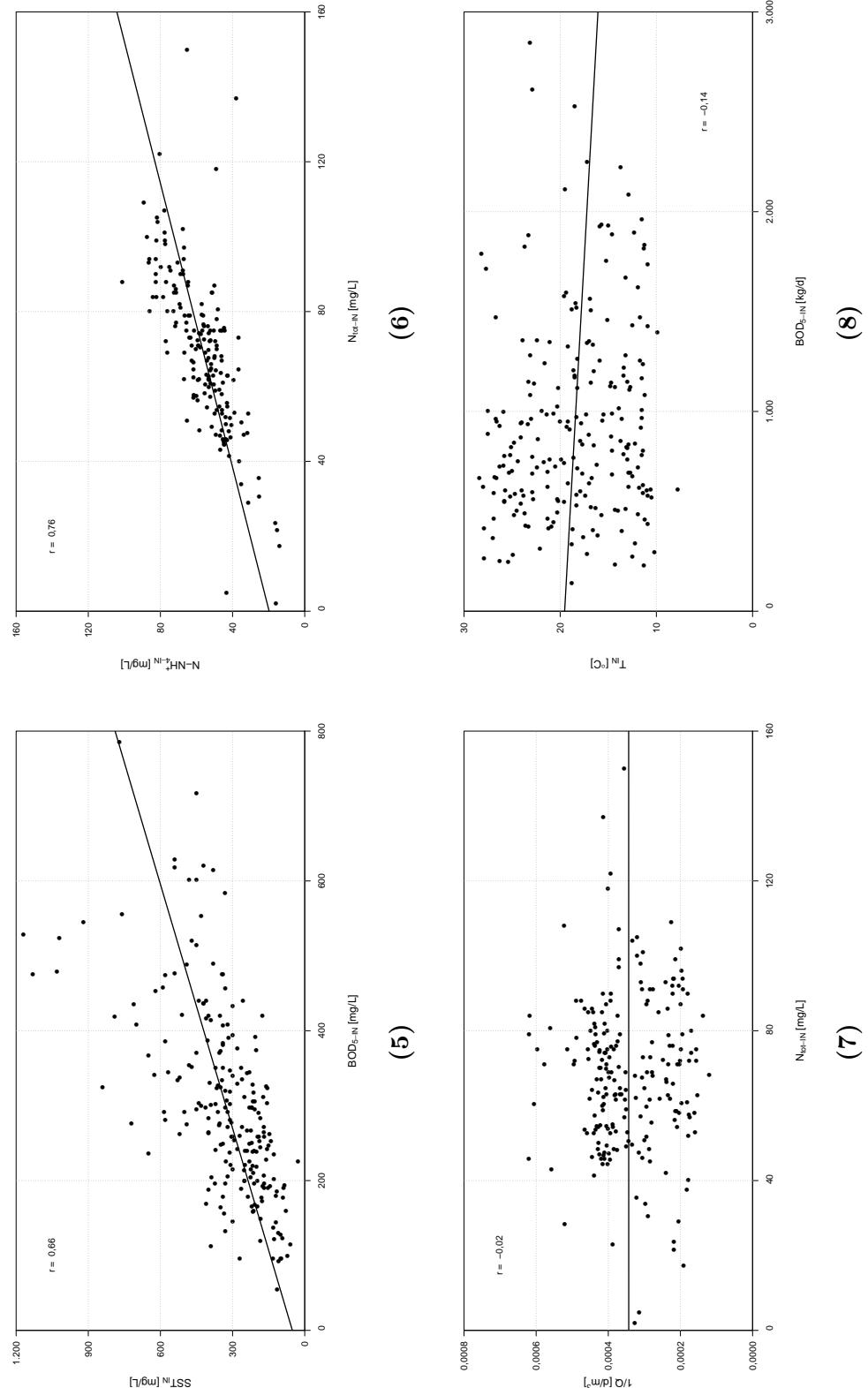


Figura 5.6.1: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto A - parte 2

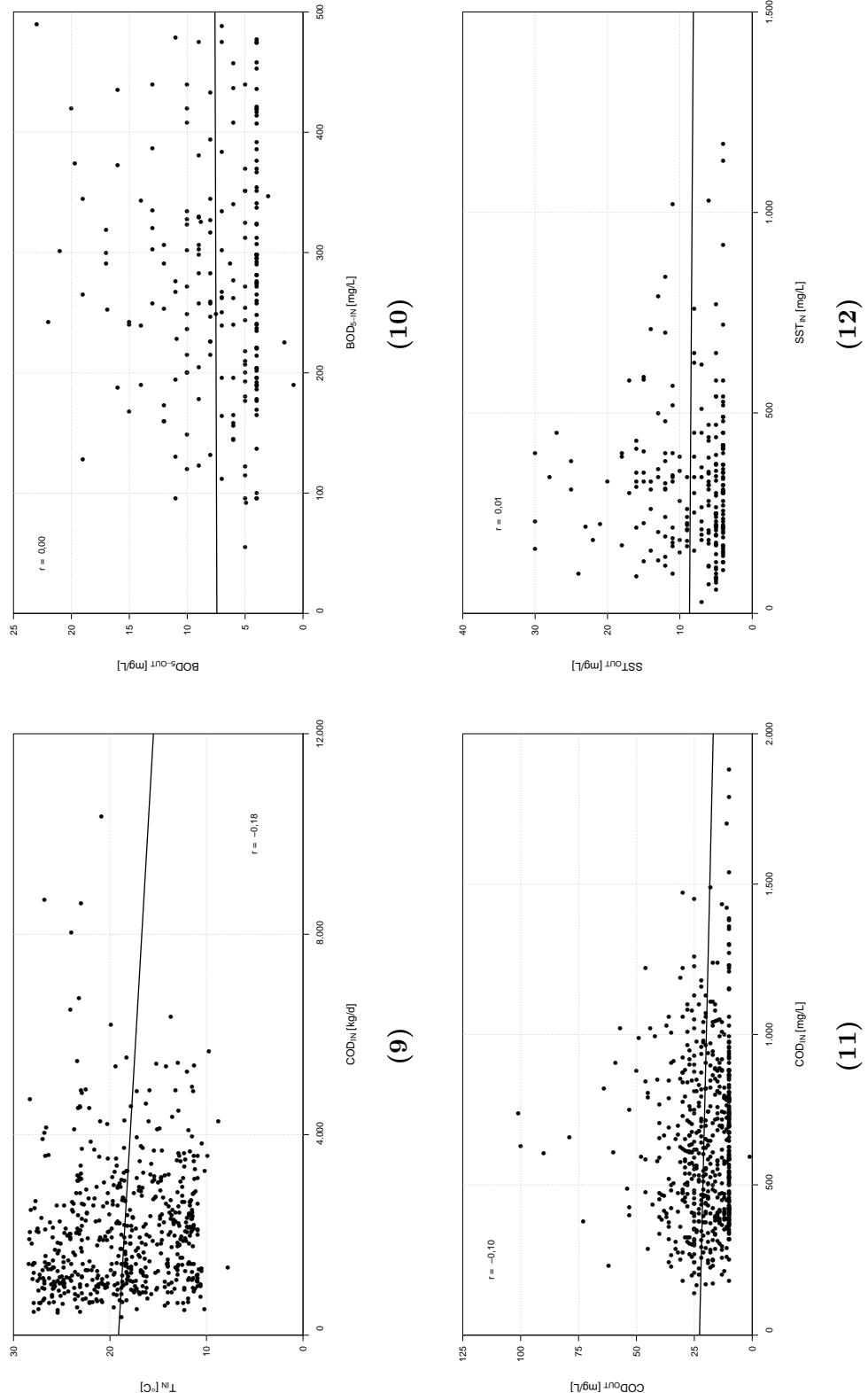
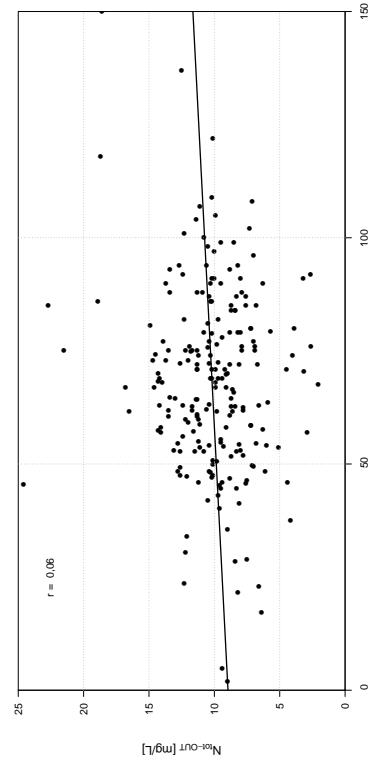
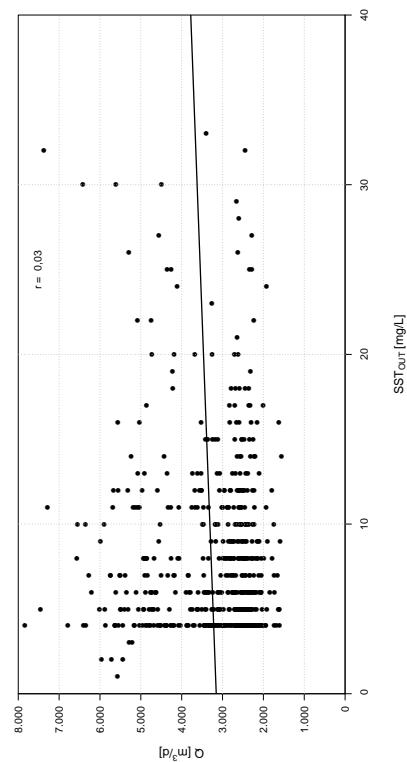


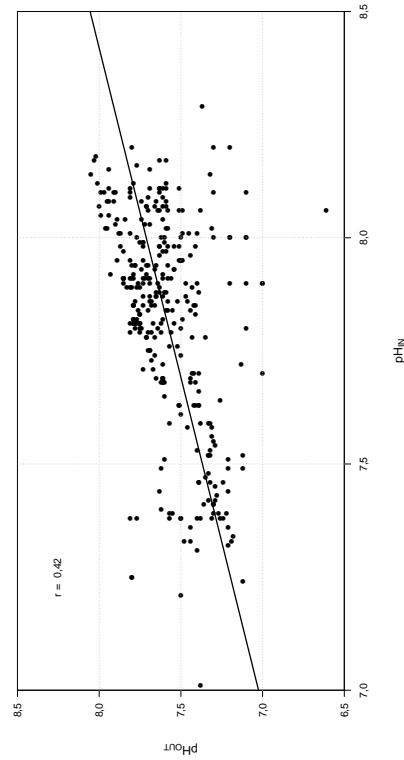
Figura 5.6.1: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto A - parte 3



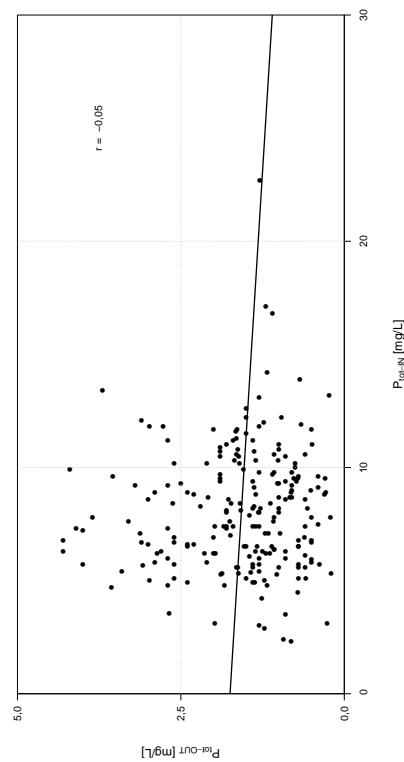
(13)



(14)

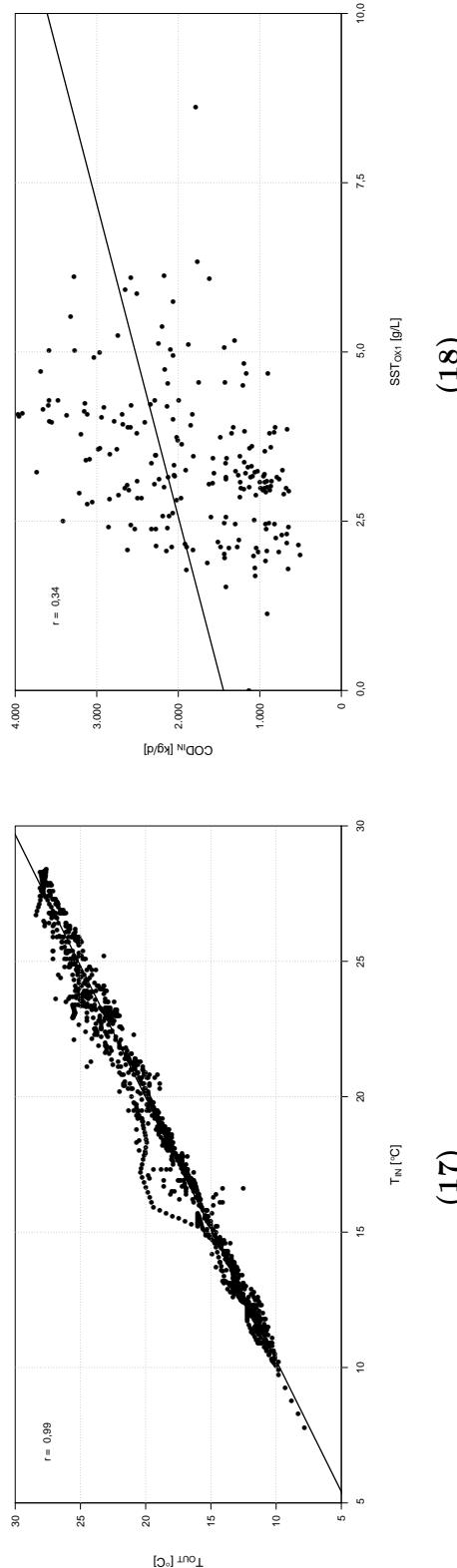


(15)



(16)

Figura 5.6.1: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto A - parte 4



185

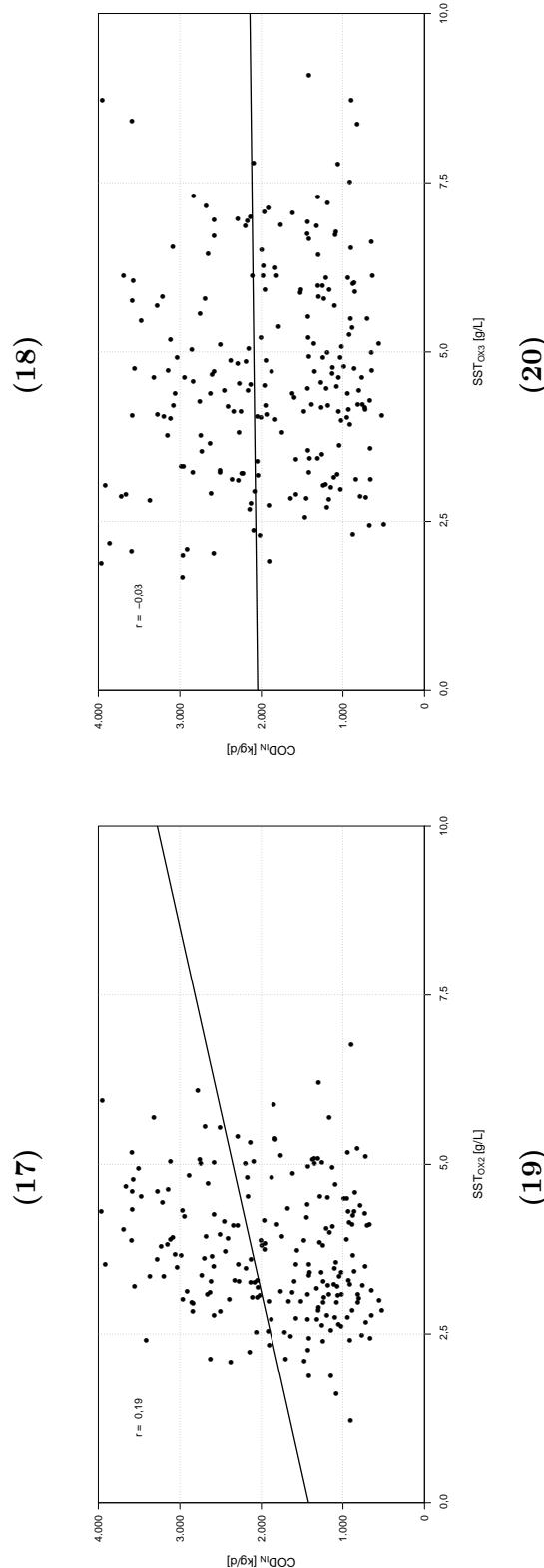


Figura 5.6.1: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto A - parte 5

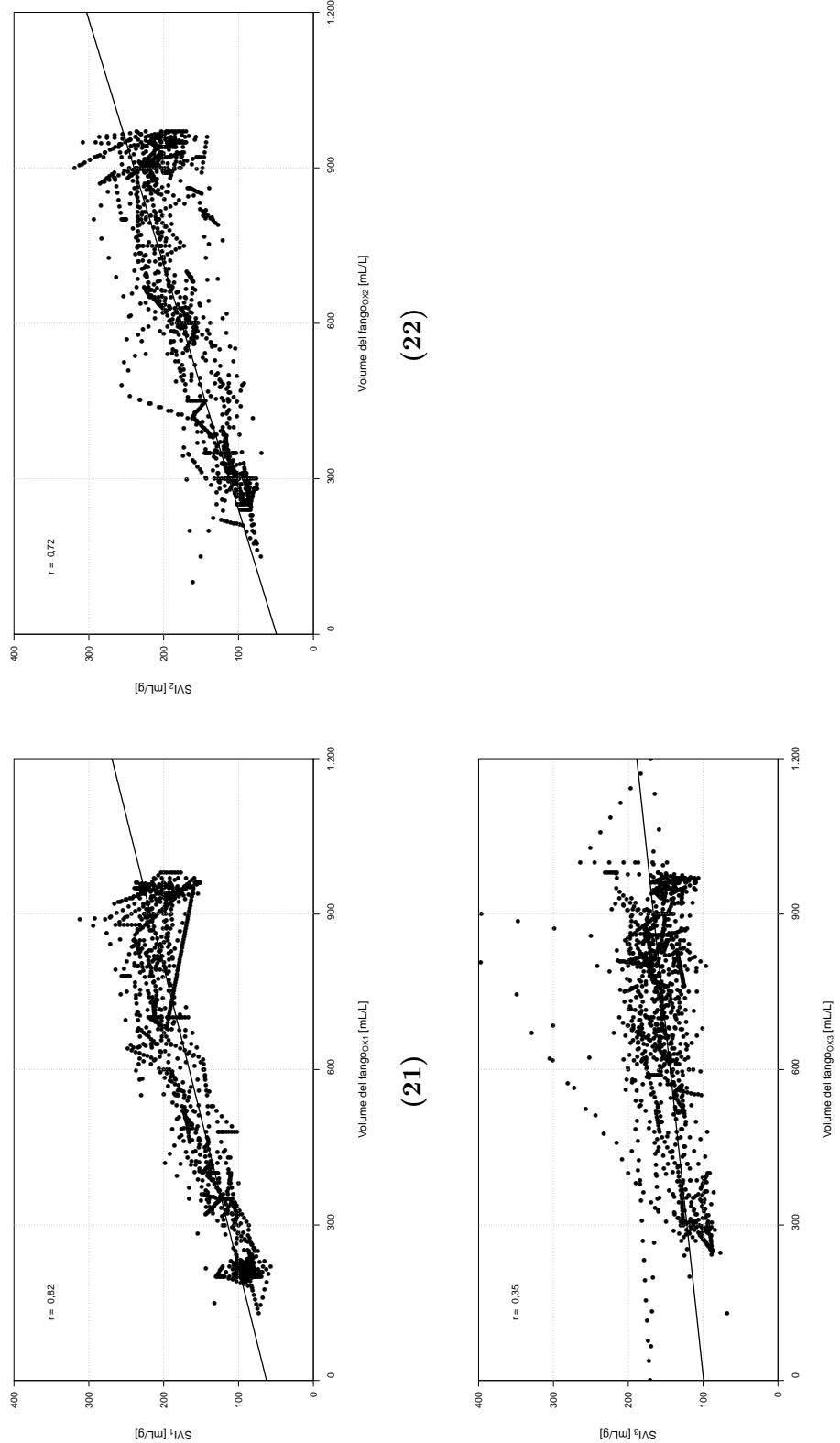


Figura 5.6.1: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto A - parte 6

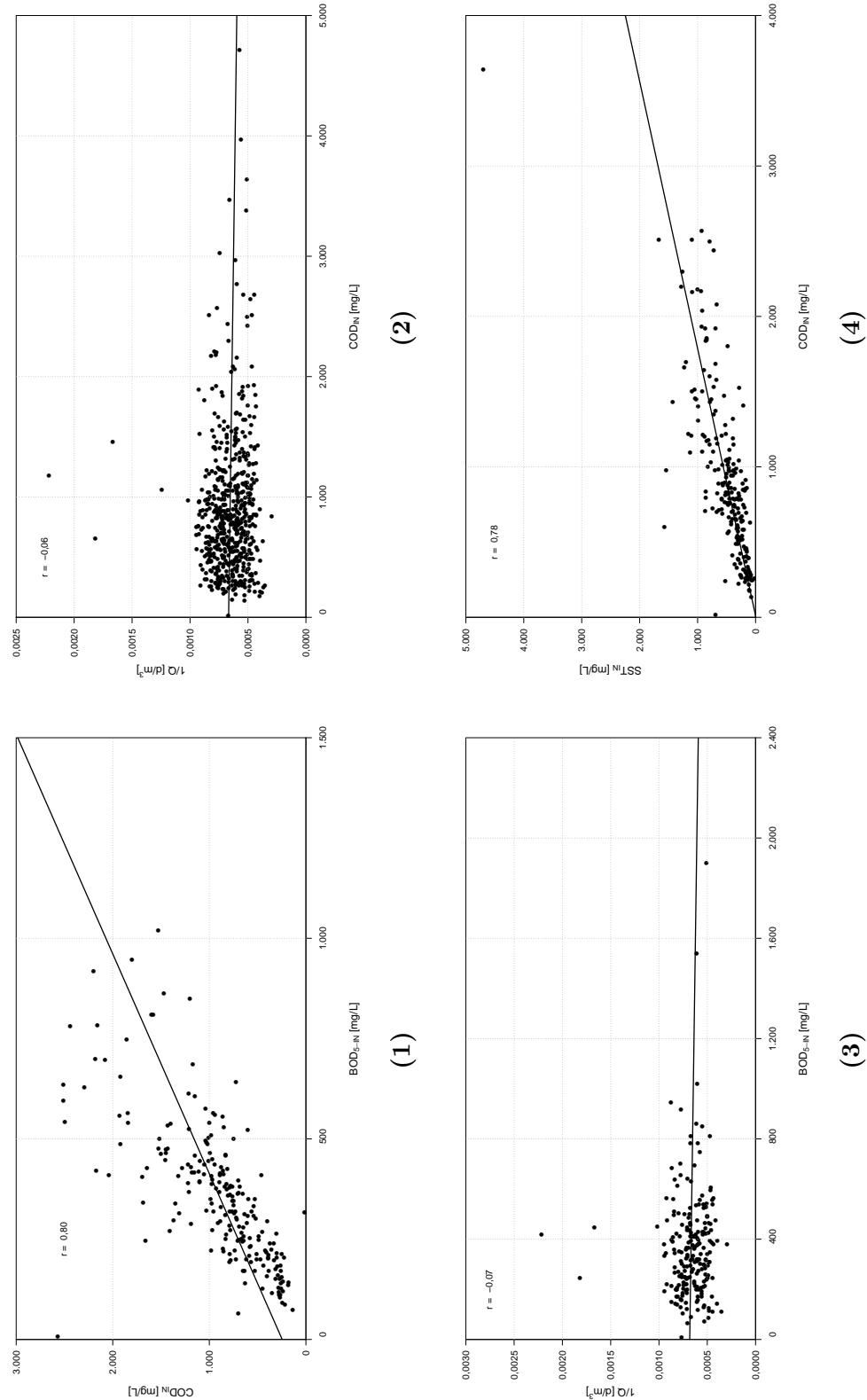


Figura 5.6.2: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto B - parte 1

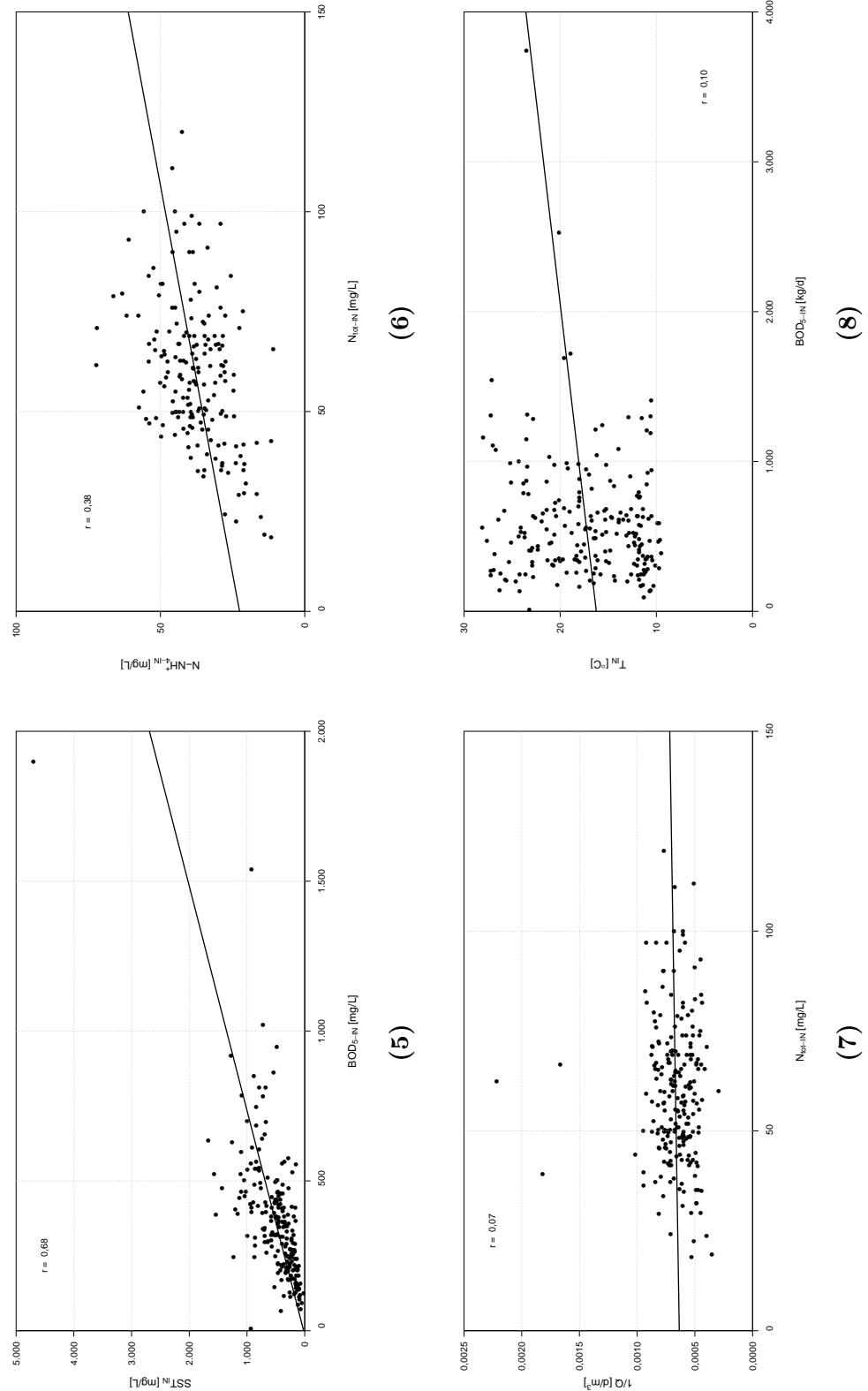


Figura 5.6.2: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto B - parte 2

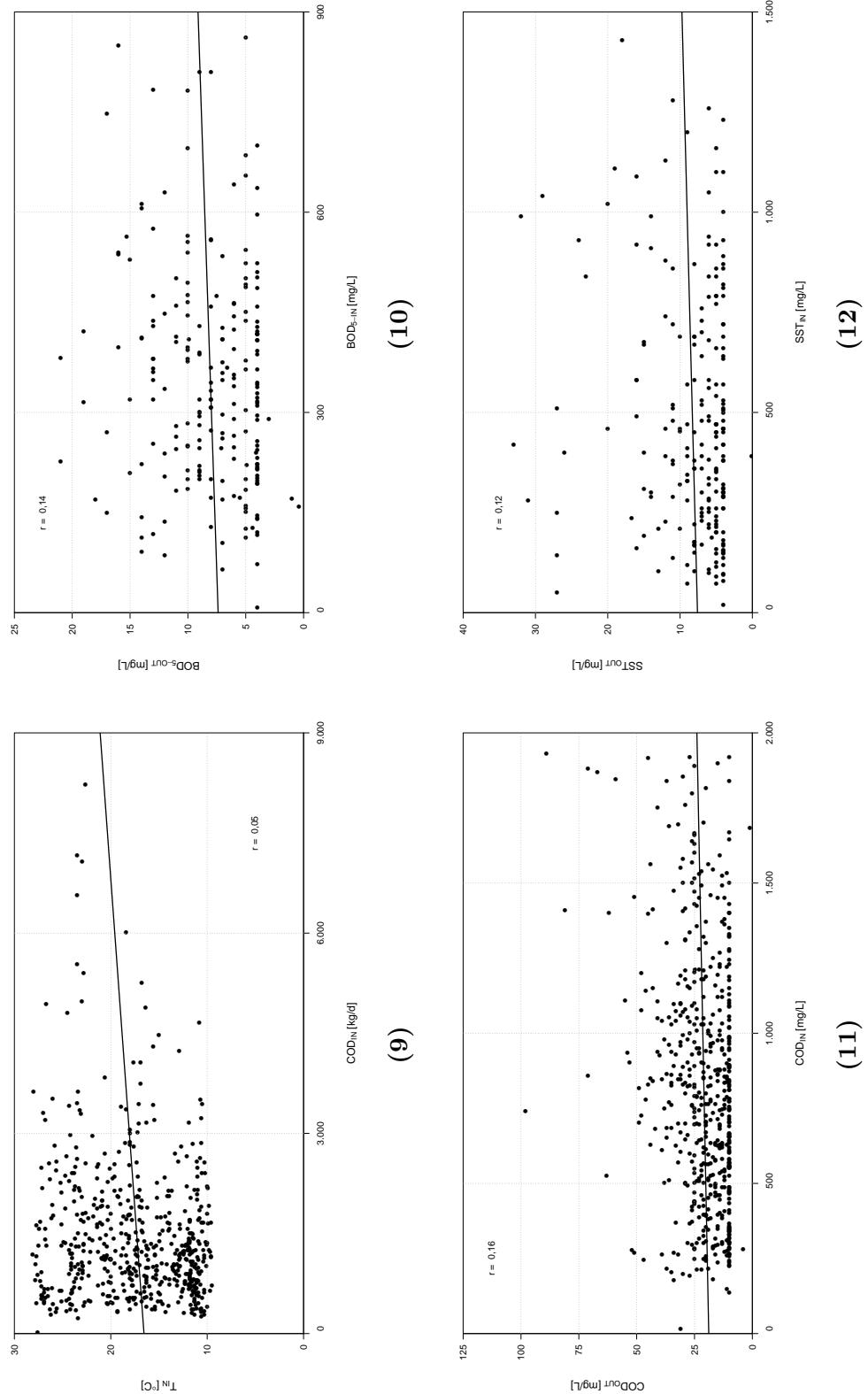


Figura 5.6.2: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto B - parte 3

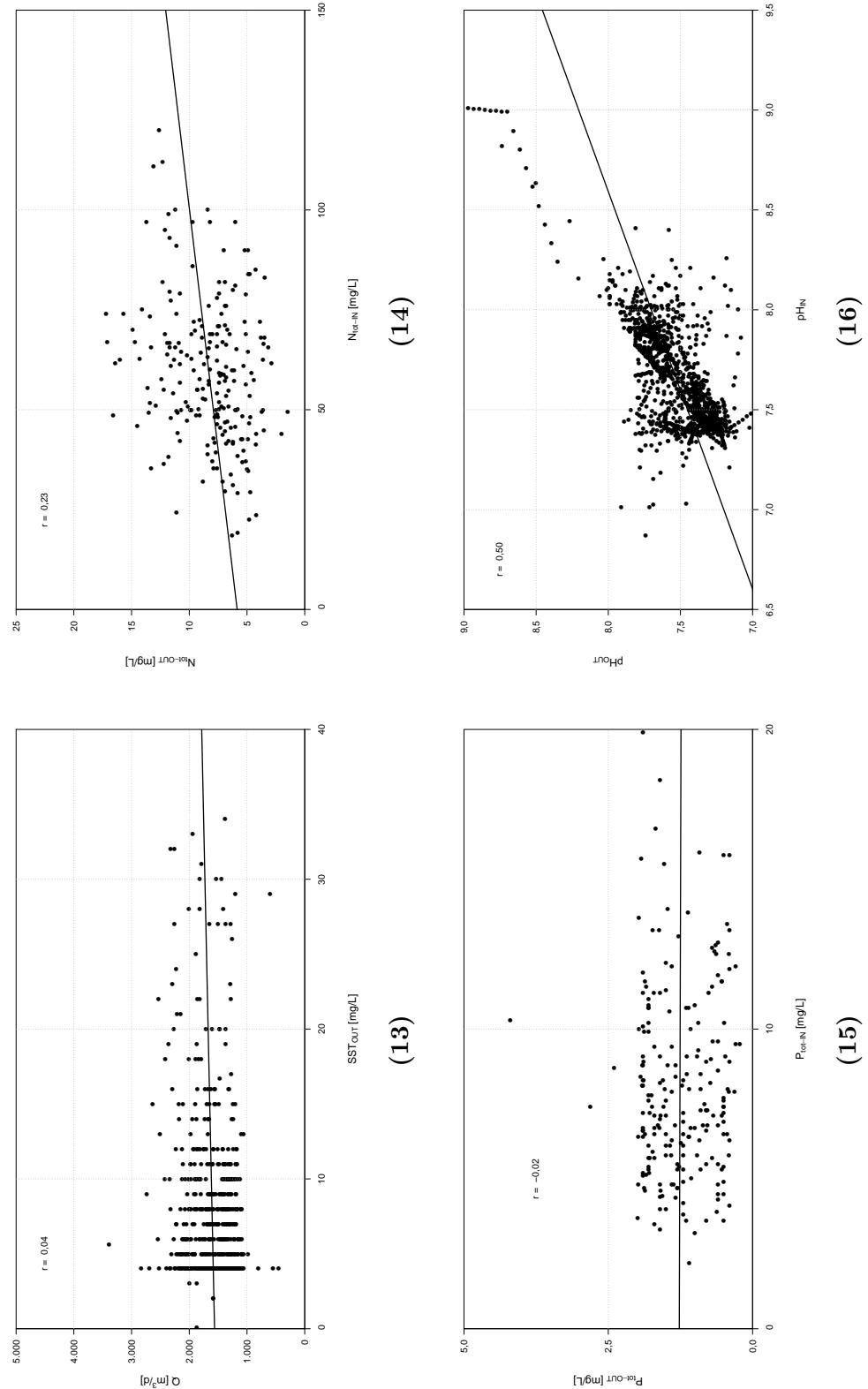
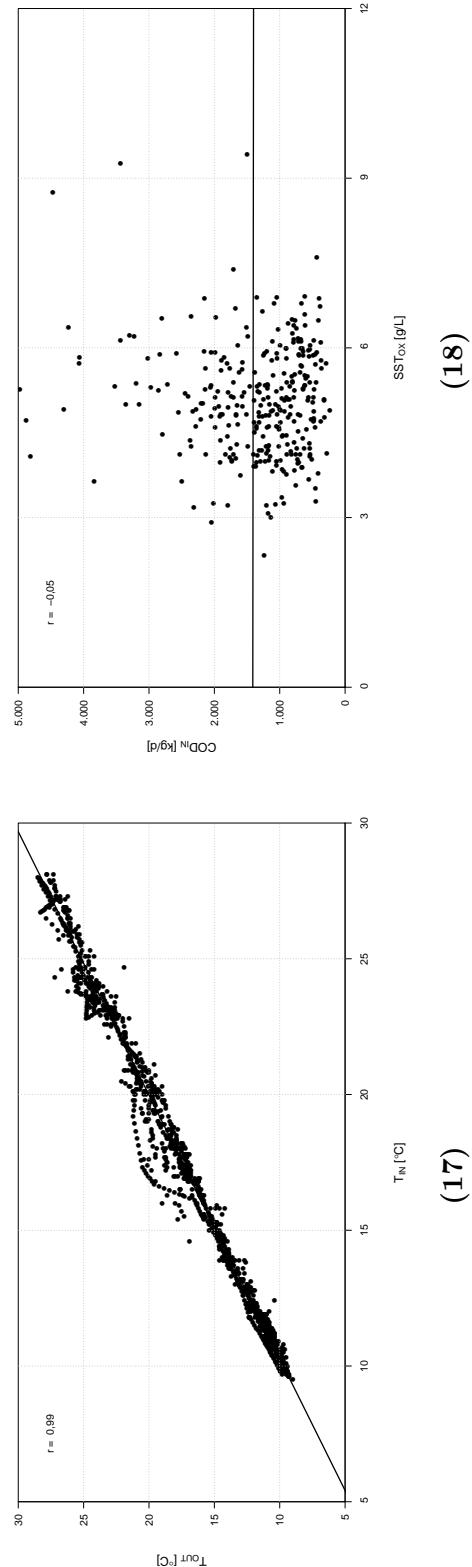
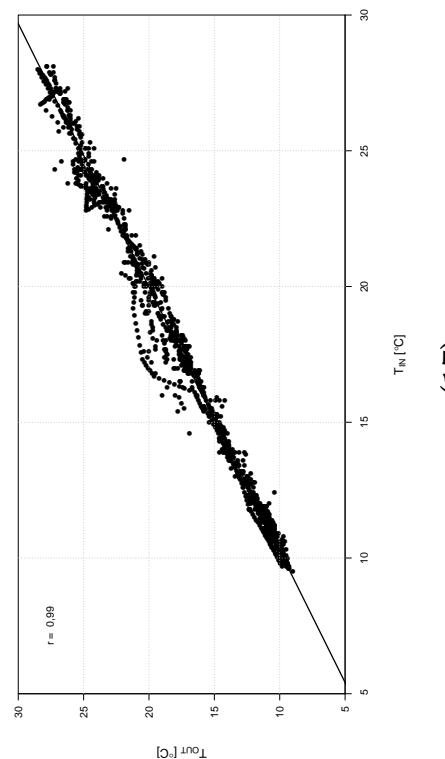


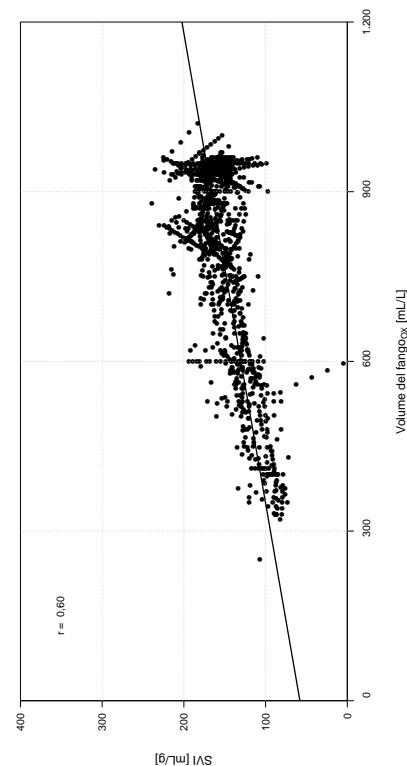
Figura 5.6.2: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto B - parte 4



(18)



(17)



(19)

Figura 5.6.2: Scatterplot e coefficiente di correlazione di Spearman impianto B - parte 5

Capitolo 6

Sviluppi futuri

L'elaborazione dei dati a disposizione non è da ritenersi conclusa con i metodi applicati in questo lavoro. Numerose sono infatti le alternative ai metodi che si è scelto di utilizzare e potrebbe essere interessante confrontare i risultati ottenuti con quelli di procedure diverse.

Innanzitutto, per avvalorare le conclusioni è cui si è giunti, sarebbe opportuno continuare a monitorare gli impianti di depurazione in esame in modo tale da poter applicare le stesse analisi a un numero maggiore di dati.

Si consiglia di approfondire le analisi statistiche, integrandole con test delle ipotesi o test di significatività, al fine di determinare il livello di attendibilità dei risultati ottenuti. Questo approccio presenta lo svantaggio di complicare l'analisi poiché richiede il soddisfacimento di ipotesi aggiuntive e numerose elaborazioni numeriche. Tuttavia, il vantaggio che se ne ricava è quello di avere maggiore confidenza nell'interpretazione del risultato finale.

Infine, potrebbe essere interessante valutare l'applicazione di altri metodi statistici per l'investigazione dei dati, sia per confrontarli con quelli utilizzati che per ricavare informazioni aggiuntive. Alcuni esempi sono:

- Analisi delle Componenti Principali (PCA - *Principal Components Analysis*): metodo multivariato per l'individuazione della correlazione tra le variabili;
- Analisi di Fourier delle *time series*: calcolo, rappresentazione ed elaborazione di un periodogramma per l'individuazione della periodicità;
- Modelli AR (*AutoRegressive*), ARMA (*AutoRegressive Moving Average*) e ARIMA (*AutoRegressive Integrated Moving Average*): modellazione della *time series* nell'ottica di formulare previsioni sul comportamento futuro del sistema.

Conclusioni

In questo lavoro si sono studiate le condizioni di funzionamento di due impianti di depurazione a fanghi attivi per mezzo di indagini statistiche, sia convenzionali che più avanzate, condotte sui dati gestionali misurati all'interno degli impianti stessi. Secondo l'approccio convenzionale, i dati sono stati interpretati per mezzo dell'analisi esplorativa, ovvero ricavando informazioni dalla loro rappresentazione grezza, e tramite alcuni parametri della statistica descrittiva, quali media e percentili. In aggiunta, si sono applicati dei metodi statistici per verificare la correttezza e l'oggettività delle conclusioni a cui si è giunti con i metodi convenzionali.

Per quanto riguarda l'impianto A, nelle condizioni invernali, che sono le più critiche a causa della bassa temperatura, la portata mediana è di $2.500 \text{ m}^3/\text{d}$, corrispondente a circa 20.000 AE, ed è di molto inferiore alla potenzialità autorizzata. Il liquame è fortemente concentrato con valori di concentrazione di COD compresi tra 500 e 1.000 mg/L e concentrazioni di azoto comprese tra 60 e 90 mg/L. Le caratteristiche del liquame sono sbilanciate verso i nutrienti e in particolare verso il fosforo. In generale le concentrazioni in ingresso mostrano una lieve tendenza alla diminuzione, mentre le concentrazioni in uscita rispettano sempre i limiti allo scarico. Nonostante la portata trattata sia notevolmente inferiore alla potenzialità autorizzata e nonostante l'età del fango e il carico del fango siano tali da garantire un'adeguata nitrificazione, nei mesi invernali si osserva un calo del rendimento di nitrificazione. La conseguenza di ciò è un incremento della concentrazione di azoto ammoniacale in uscita che, oltre a richiedere del tempo per tornare ad assumere i valori usuali, potrebbe portare al mancato rispetto del limite dell'azoto totale qualora non si raggiungesse la soglia minima del 75% relativa alla rimozione di azoto totale a livello di bacino. Si segnala inoltre che la concentrazione media di azoto organico in uscita è pari a 1,84 mg/L, valore superiore rispetto a ciò che si rileva abitualmente (circa 1 mg/L). Una possibile spiegazione è legata alle posizioni in cui si introducono i ricircoli provenienti dalla linea fanghi; generalmente il punto di immissione è in testa all'impianto, ma, in questo caso, il surnatante dell'ispezzimento è immesso a metà della vasca di ossidazione e il centrato alla fine. Di conseguenza, i ricircoli non subiscono un trattamento biologico completo. L'impianto lavora su tre linee biologiche parallele e, come dimostrato

dalla concentrazione di solidi in vasca di ossidazione, tra di esse è presente uno squilibrio. Nella vasche di ossidazione, l'ossigeno dissolto dovrebbe mantenersi attorno al valore di concentrazione stabilito come set point, ma l'utilizzo di compressori sovradimensionati fa sì che le concentrazioni siano spesso superiori a tale valore anche a regime di funzionamento minimo dei compressori.

Nel caso dell'impianto B, la portata mediana è di 1.600 m³/d, a fronte di 2.000 m³/d di portata di progetto. La potenzialità autorizzata di 10.000 AE, invece, rappresenta circa il 50° percentile della distribuzione di carico di COD in ingresso. Il liquame è a media-forte concentrazione con valori di COD compresi tra 500 e 1.500 mg/L e valori medi di azoto totale di 60 mg/L. Inoltre, le sue caratteristiche sono sbilanciate verso il fosforo. L'effluente è caratterizzato da concentrazioni di inquinanti sempre compatibili con i limiti allo scarico. Il rendimento del processo di nitrificazione, a differenza di quanto avviene per l'impianto A, non risente dell'influenza negativa delle basse temperature. Sebbene il ricircolo del surnatante e del centratore della linea fanghi sia introdotto in testa alla denitrificazione, la concentrazione di azoto organico in uscita assume una valore medio di 1,62 mg/L che è maggiore del valore tipico di 1 mg/L. In vasca di ossidazione si ha una concentrazione di ossigeno molto variabile perché i compressori forniscono aria in eccesso e quindi non si riesce a mantenere il valore di set point.

Queste conclusioni derivano dall'utilizzo parallelo dei metodi convenzionali e di quelli più avanzati. Nella maggior parte dei casi, l'applicazione di metodi diversi ha portato a risultati coerenti. Ciò che è stato osservato con l'analisi visuale dei dati è quasi sempre stato confermato dalle analisi statistiche più approfondite. Queste ultime, oltre che essere una conferma, hanno permesso di individuare caratteristiche dei dati che non si erano scorte con l'analisi precedente. Inoltre, esse hanno il vantaggio di restituire informazioni più oggettive poiché fornite in termini quantitativi e non qualitativi.

Dopo aver trattato gli *outliers*, distinguendo i valori anomali da modificare o eliminare da quelli da conservare, l'individuazione del trend è stata condotta per mezzo della regressione lineare e del metodo LOESS. Questa analisi ha permesso di quantificare trend già evidenti dall'analisi visuale, come nel caso dell'andamento decrescente della portata e dei carichi in ingresso nell'anno 2015 per l'impianto A e delle concentrazioni in ingresso di BOD₅, COD, SST e fosforo totale per l'impianto B. Per altri parametri, come concentrazione in ingresso di azoto totale e di fosforo totale dell'impianto A e concentrazione in ingresso di azoto totale dell'impianto B, è stato possibile notare che quello che sembrava essere un trend debolmente decrescente dallo studio della rappresentazione grafica, in realtà è un trend più marcato. Inoltre, in molto casi, soprattutto per quanto riguarda le concentrazioni in uscita degli inquinanti per entrambi gli impianti, la regressione lineare ha evidenziato dei trend che non erano stati notati con l'analisi esplorativa.

I trend individuati sono stati rimossi dalle *time series* al fine di ricercare eventuali periodicità per mezzo della funzione di autocorrelazione. Esso ha generalmente confermato quanto già osservato tramite l'analisi visuale dei dati, come è particolarmente evidente nel caso delle temperature in ingresso e in uscita per entrambi gli impianti. Solamente per l'impianto A, invece, l'autocorrelazione ha evidenziato la presenza di periodicità che non si erano viste con l'analisi visuale. Alcuni esempi sono le concentrazioni in uscita di azoto nitrico e di fosforo totale e le concentrazioni di solidi sospesi nel ricircolo dei fanghi nella linea 3.

Infine, la correlazione, che con l'analisi visuale era stata valutata semplicemente rappresentando in uno stesso grafico più parametri e controllando che essi avessero indicativamente variazioni concordi, è stata quantificata per mezzo del coefficiente di correlazione di Spearman. Benché questo metodo non abbia condotto a risultati diversi da quelli già ottenuti, ha permesso di confermare a livello oggettivo ciò che, invece, poteva dipendere dalla sensibilità dell'osservatore.

In conclusione, si ritiene che l'analisi esplorativa debba essere affiancata e arricchita dai metodi statistici più avanzati.

Numerosi sono gli approcci che possono ancora essere utilizzati per rendere più dettagliato e più significativo lo studio dei dati e ci si auspica che essi vengano approfonditi in lavori futuri.

Appendice A

Configurazione R e RStudioTM

Si riporta in questa appendice la configurazione delle risorse computazionali utilizzate per l'elaborazione numerica e grafica dei dati al solo scopo di favorire la ripetibilità delle elaborazioni. Si precisa che se si riproducono le elaborazioni descritte in questo lavoro utilizzando risorse differenti da quelle di seguito elencate, si potrebbero ottenere risultati leggermente diversi.

Sistema operativo Windows 10 Pro, 64 bit

Ambiente di sviluppo RStudioTM Version 1.1.453

Linguaggio di programmazione R Version 3.5.0

Pacchetti

- datasets Version 3.5.0
- fBasics Version 3042.89
- graphics Version 3.5.1
- grDevices Version 3.5.0
- hydroTSM Version 0.5-1
- imputeTS Version 2.7
- ineq Version 0.2-13
- methods Version 3.5.0
- plotrix Version 3.7-2

- RColorBrewer Version 1.1-2
- scales Version 1.0.0
- stats Version 3.5.0
- tsbox Version 0.0.3
- TTR Version 0.23.3
- utils Version 3.5.0
- xts Version 0.10-2
- zoo Version 1.8-1

Bibliografia

- [Aguinis et al., 2013] Aguinis, H., Gottfredson, R. K., and Joo, H. (2013). Best-practice recommendations for defining, identifying, and handling outliers. *Organizational Research Methods*, 16(2):270–301.
- [Alexandrov et al., 2012] Alexandrov, T., Bianconcini, S., Dagum, E. B., Maass, P., and McElroy, T. S. (2012). A review of some modern approaches to the problem of trend extraction. *Econometric Reviews*, 31(6):593–624.
- [Anderson, 1994] Anderson, T. (1994). *The Statistical Analysis of Time Series*. Wiley Classics Library. Wiley.
- [Bonomo, 2008] Bonomo, L. (2008). *Trattamenti delle acque reflue*. Collana di istruzione scientifica: Serie di ambiente e territorio. McGraw-Hill Companies.
- [Brown and Berthouex, 2002] Brown, L. and Berthouex, P. (2002). *Statistics for Environmental Engineers, Second Edition*. Taylor & Francis.
- [Chowdhury et al., 2015] Chowdhury, A. K., Debsarkar, A., and Chakrabarty, S. (2015). Novel methods for assessing urban air quality: Combined air and noise pollution approach. *Journal of Atmospheric Pollution*, 3(1):1–8.
- [Cleveland, 1979] Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74(368):829–836.
- [Collivignarelli and Bertanza, 2012] Collivignarelli, C. and Bertanza, G. (2012). *Ingegneria sanitaria-ambientale*. CittàStudi.
- [Erickson et al., 2017] Erickson, R. A., Gray, B. R., and Eager, E. A. (2017). Estimating linear temporal trends from aggregated environmental monitoring data. *Ecological Indicators*, 74:62 – 72.
- [Hartley, 2013] Hartley, K. (2013). *Tuning Biological Nutrient Removal Plants*. IWA Publishing.

- [ISPRA, 2013] ISPRA (2013). *Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici, ISPRA - Manuali e Linee Guida 84/2013, Roma.*
- [Italia, 2006] Italia (2006). *Decreto Legislativo 5 aprile 2006, n.152, Norme in materia ambientale.* Gazzetta Ufficiale N.88, 14/04/06, supplemento ordinario.
- [Kang, 2013] Kang, H. (2013). The prevention and handling of the missing data. 64:402–6.
- [Moritz et al., 2015] Moritz, S., Sardá, A., Bartz-Beielstein, T., Zaefferer, M., and Stork, J. (2015). Comparison of different methods for univariate time series imputation in r. *CoRR*, abs/1510.03924.
- [Nopiah et al., 2012] Nopiah, Z., Lennie, A., Abdullah, S., Nuawi, M., Nuryazmin, A., and Baharin, M. (2012). The Use of Autocorrelation Function in the Seasonality Analysis for Fatigue Strain Data. *Journal of Asian Scientific Research*, 2(11):782–788.
- [Priestley, 1981] Priestley, M. (1981). *Spectral Analysis and Time Series.* Number v. 1-2 in Probability and mathematical statistics. Academic Press.
- [R Core Team, 2018] R Core Team (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- [Reddy, 2005] Reddy, P. (2005). *A Text Book of Hydrology.* Laxmi Publications.
- [RegioneVeneto, 2018] RegioneVeneto (2018). *Allegato A3 alla Deliberazione del Consiglio Regionale n. 107 del 5 novembre 2009 e successive modifiche e integrazioni.* Norme Tecniche di Attuazione del PTA.
- [Ross and Morandin, 2008] Ross, S. and Morandin, F. (2008). *Probabilità e statistica per l'ingegneria e le scienze.* Idee & strumenti. Maggioli.
- [Sharma, 2005] Sharma, A. (2005). *Text Book Of Correlations And Regression.* DPH mathematics series. Discovery Publishing House.
- [Vismara, 1998] Vismara, R. (1998). *Depurazione biologica: teoria e processi.* Hoepli.
- [Wu et al., 2007] Wu, Z., Huang, N. E., Long, S. R., and Peng, C.-K. (2007). On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(38):14889–14894.