



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Scienze Forestali e Ambientali

Potenzialità depurative di un sistema di  
fitodepurazione intensificato e a carico intermittente  
per il trattamento di acque reflue domestiche

Relatore

Dr. Nicola Dal Ferro

Correlatore

Prof. Maurizio Borin

Laureando

Thomas Rossi

Matricola n. 1155247

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

# INDICE

|                                                                                    |                |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>RIASSUNTO.....</b>                                                              | <b>pag. 7</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                               | <b>pag. 9</b>  |
| <b>CAPITOLO 1: INTRODUZIONE.....</b>                                               | <b>pag. 11</b> |
| 1.1 INQUINAMENTO DELLE ACQUE.....                                                  | pag. 12        |
| 1.1.1 Definizione                                                                  |                |
| 1.1.2 Tipi di inquinamento                                                         |                |
| 1.1.3 Origine dell'inquinamento                                                    |                |
| 1.2 ACQUE REFLUE.....                                                              | pag. 13        |
| 1.2.1 Definizione                                                                  |                |
| 1.2.2 Tipologie di acque reflue                                                    |                |
| 1.2.3 Acque reflue assimilate alle acque domestiche                                |                |
| 1.2.4 Acque reflue domestiche                                                      |                |
| 1.2.5 Caratteristiche delle acque di scarico delle cucine                          |                |
| 1.3 GESTIONE SOSTENIBILE DELLE ACQUE REFLUE DOMESTICHE.....                        | pag. 20        |
| 1.3.1 Consumi idrici                                                               |                |
| 1.3.2 Riutilizzo delle acque reflue domestiche                                     |                |
| 1.3.3 Limiti di scarico                                                            |                |
| 1.3.4 Una possibile soluzione: trattamenti naturali                                |                |
| 1.4 FITODEPURAZIONE.....                                                           | pag. 28        |
| 1.4.1 Definizione                                                                  |                |
| 1.4.2 Meccanismi di rimozione degli inquinanti                                     |                |
| 1.4.3 Scala di lavoro e tipologie di impianto                                      |                |
| 1.4.4 Rendimenti depurativi                                                        |                |
| 1.4.5 Impianti adatti per la fitodepurazione di singoli edifici in ambiente urbano |                |
| 1.5 SCOPO DELLA TESI.....                                                          | pag. 36        |
| <b>CAPITOLO 2: MATERIALI E METODI.....</b>                                         | <b>pag. 37</b> |
| 2.1 DESCRIZIONE DEL SITO SPERIMENTALE.....                                         | pag. 37        |
| 2.1.1 Struttura dell'impianto                                                      |                |
| 2.1.2 Vegetazione                                                                  |                |
| 2.1.3 Alimentazione dell'impianto                                                  |                |
| 2.2 GESTIONE E MONITORAGGIO.....                                                   | pag. 43        |
| 2.2.1 Analisi dei volumi                                                           |                |
| 2.2.2 Analisi dei parametri chimico-fisici                                         |                |
| 2.2.3 Analisi della vegetazione                                                    |                |
| 2.2.4 Elaborazione dei dati                                                        |                |
| 2.2.5 Analisi statistica                                                           |                |

|                                                                                 |                |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>CAPITOLO 3: RISULTATI E DISCUSSIONE.....</b>                                 | <b>pag. 53</b> |
| 3.1 BILANCIO IDRICO.....                                                        | pag. 53        |
| 3.2 PARAMETRI CHIMICO-FISICI.....                                               | pag. 54        |
| 3.2.1 pH                                                                        |                |
| 3.2.2 Conducibilità elettrica                                                   |                |
| 3.2.3 Ossigeno disciolto                                                        |                |
| 3.2.4 Potenziale di ossidoriduzione                                             |                |
| 3.2.5 Temperatura                                                               |                |
| 3.3 PARAMETRI CHIMICI RELATIVI ALLE SOSTANZE PRESENTI<br>NELL'ACQUA REFLUA..... | pag. 68        |
| 3.3.1 Solidi sospesi totali                                                     |                |
| 3.3.2 Sostanza organica BOD <sub>5</sub> E COD                                  |                |
| 3.3.3 Tensioattivi anionici                                                     |                |
| 3.3.4 Azoto                                                                     |                |
| 3.3.5 Fosforo                                                                   |                |
| 3.4 BILANCIO DI MASSA.....                                                      | pag. 78        |
| 3.4.1 Sostanza organica BOD <sub>5</sub> E COD                                  |                |
| 3.4.2 Tensioattivi anionici                                                     |                |
| 3.4.3 Azoto                                                                     |                |
| 3.4.4 Fosforo                                                                   |                |
| 3.5 VEGETAZIONE.....                                                            | pag. 87        |
| 3.5.1 Fenologia e sviluppo vegetativo                                           |                |
| 3.5.2 Biomassa vegetale                                                         |                |
| 3.6 CONFRONTO CON IL MONITORAGGIO DELL'ANNO 2017.....                           | pag. 96        |
| <b>CAPITOLO 4: CONCLUSIONI.....</b>                                             | <b>pag. 97</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>                                                        | <b>pag. 99</b> |

## INDICE FIGURE

|                                                                                                                  |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Figura 1: Principali fonti di inquinamento delle acque.....                                                      | pag. 13 |
| Figura 2: Andamento del BOD5 nelle acque nere e grigie. ....                                                     | pag. 17 |
| Figura 3: Prelievi ed utilizzo di acqua per le principali attività umane. Italia, 2012.....                      | pag. 20 |
| Figura 4: Perdite idriche delle reti di distribuzione di acqua potabile.....                                     | pag. 21 |
| Figura 5: Consumi medi d'acqua potabile, delle principali attività domestiche. ....                              | pag. 21 |
| Figura 6: Fitodepurazione.....                                                                                   | pag. 28 |
| Figura 7: Principali processi con cui le piante contribuiscono alla depurazione delle acque.....                 | pag. 30 |
| Figura 8: Schema di un impianto a flusso superficiale.....                                                       | pag. 31 |
| Figura 9: Schema di un impianto a flusso sottosuperficiale orizzontale.....                                      | pag. 32 |
| Figura 10: Schema di un impianto a flusso sottosuperficiale verticale.....                                       | pag. 32 |
| Figura 11: Schema di un impianto ibrido, in serie.....                                                           | pag. 32 |
| Figura 12: Schema di gestione sostenibile delle acque reflue domestiche.....                                     | pag. 34 |
| Figura 13: Campus di Agripolis. ....                                                                             | pag. 37 |
| Figura 14: Immagine del sito sperimentale.....                                                                   | pag. 38 |
| Figura 15: Schema del sito sperimentale.....                                                                     | pag. 38 |
| Figura 16: Immagine di una vasca vegetata.....                                                                   | pag. 39 |
| Figura 17: <i>Mentha aquatica</i> .....                                                                          | pag. 40 |
| Figura 18: <i>Oenanthe javanica</i> .....                                                                        | pag. 40 |
| Figura 19: <i>Lysimachia nummularia</i> .....                                                                    | pag. 41 |
| Figura 20: Schema di funzionamento di una vasca settica tricamerale.....                                         | pag. 41 |
| Figura 21: Planimetria della cucina della mensa del campus di Agripolis.....                                     | pag. 42 |
| Figura 22: Dinamica del flusso idrico all'interno dei letti vegetati.....                                        | pag. 43 |
| Figura 23: Sonda multiparametrica Hach HQ40D.....                                                                | pag. 45 |
| Figura 24: Misurazione di pH e conducibilità elettrica, con la sonda HQ40D.....                                  | pag. 45 |
| Figura 25: Torbidimetro Hach 2100P.....                                                                          | pag. 45 |
| Figura 26: Analisi della torbidità.....                                                                          | pag. 45 |
| Figura 27: Contenitore per la determinazione del BOD5.....                                                       | pag. 46 |
| Figura 28: Inserimento dei campioni in stufa.....                                                                | pag. 47 |
| Figura 29: Tappo OxiTop.....                                                                                     | pag. 47 |
| Figura 30: Spettrofotometro Hach DR2800.....                                                                     | pag. 47 |
| Figura 31: Stufa Hach HT200S.....                                                                                | pag. 48 |
| Figura 32: Particolare della colorazione gialla assunta dal bicromato di potassio durante l'analisi del COD..... | pag. 48 |
| Figura 33: Caricamento delle cuvette in forno.....                                                               | pag. 48 |
| Figura 34: Lettura della cuvetta allo spettrofotometro per la determinazione dei tensioattivi.....               | pag. 49 |
| Figura 35: Dettaglio della formazione di schiuma all'interno della cuvetta.....                                  | pag. 49 |
| Figura 36: Punto di prelievo della vegetazione per la misura della biomassa.....                                 | pag. 50 |
| Figura 37: Operazioni di campionamento della vegetazione per determinare la biomassa.....                        | pag. 50 |
| Figura 38: Mulino Retsch ZM200.....                                                                              | pag. 51 |
| Figura 39: Operazione di macinazione dei campioni secchi di vegetazione.....                                     | pag. 51 |
| Figura 40: Particolare dell'interno del mulino.....                                                              | pag. 51 |
| Figura 41: Dinamica temporale del pH, delle tre specie vegetali, per le acque di input ed output.....            | pag. 54 |
| Figura 42: Dinamica temporale del pH, delle tre specie vegetali, per il livello "Up".....                        | pag. 55 |
| Figura 43: Dinamica temporale del pH, delle tre specie vegetali, per il livello "Med".....                       | pag. 55 |
| Figura 44: Dinamica temporale del pH, delle tre specie vegetali, per il livello "Down".....                      | pag. 56 |
| Figura 45: Dinamica temporale della EC, delle tre specie vegetali, per le acque di input ed output.....          | pag. 57 |
| Figura 46: Dinamica temporale della EC, delle tre specie vegetali, per il livello "Up".....                      | pag. 58 |
| Figura 47: Dinamica temporale della EC, delle tre specie vegetali, per il livello "Med".....                     | pag. 58 |
| Figura 48: Dinamica temporale della EC, delle tre specie vegetali, per il livello "Down".....                    | pag. 59 |



|                                                                                                                                                                                                       |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Figura 49: Dinamica temporale dell'O <sub>2</sub> , delle tre specie vegetali, per le acque di input ed output.....                                                                                   | pag. 60 |
| Figura 50: Dinamica temporale dell'O <sub>2</sub> , delle tre specie vegetali, per il livello "Up".....                                                                                               | pag. 61 |
| Figura 51: Dinamica temporale dell'O <sub>2</sub> , delle tre specie vegetali, per il livello "Med".....                                                                                              | pag. 61 |
| Figura 52: Dinamica temporale dell'O <sub>2</sub> , delle tre specie vegetali, per il livello "Down".....                                                                                             | pag. 62 |
| Figura 53: Dinamica temporale del potenziale redox , delle tre specie vegetali, per le acque di input ed output.....                                                                                  | pag. 63 |
| Figura 54: Dinamica temporale del potenziale redox , delle tre specie vegetali, per il livello "Up".....                                                                                              | pag. 63 |
| Figura 55: Dinamica temporale del potenziale redox , delle tre specie vegetali, per il livello "Med".....                                                                                             | pag. 64 |
| Figura 56: Dinamica temporale del potenziale redox , delle tre specie vegetali, per il livello "Down"....                                                                                             | pag. 64 |
| Figura 57: Dinamica temporale della temperatura, per le acque di input ed output.....                                                                                                                 | pag. 65 |
| Figura 58: Dinamica temporale della temperatura, delle tre specie vegetali, per il livello "Up".....                                                                                                  | pag. 66 |
| Figura 59: Dinamica temporale della temperatura, delle tre specie vegetali, per il livello "Med".....                                                                                                 | pag. 66 |
| Figura 60: Dinamica temporale della temperatura, delle tre specie vegetali, per il livello "Down".....                                                                                                | pag. 67 |
| Figura 61: Concentrazioni di solidi sospesi totali (TSS) in entrata e uscita dall'impianto.....                                                                                                       | pag. 68 |
| Figura 62: Differenze nel colore del refluo in entrata (A) e uscita dall'impianto, da <i>mentha</i> (B),<br><i>oenanthe</i> (C) e <i>lysimachia</i> (D).....                                          | pag. 69 |
| Figura 63: Concentrazioni di sostanza organica (COD) in entrata e uscita dall'impianto. ....                                                                                                          | pag. 70 |
| Figura 64: Concentrazioni di sostanza organica (BOD <sub>5</sub> ) in entrata e uscita dall'impianto.....                                                                                             | pag. 71 |
| Figura 65: Concentrazioni dei tensioattivi anionici (MBAS) in entrata e uscita dall'impianto.....                                                                                                     | pag. 72 |
| Figura 66: Concentrazioni di azoto Kjeldahl (TKN) in entrata e uscita dall'impianto.....                                                                                                              | pag. 73 |
| Figura 67: Concentrazioni di azoto nitrico (N-NO <sub>3</sub> ) in entrata e uscita dall'impianto.....                                                                                                | pag. 75 |
| Figura 68: Concentrazioni di azoto ammoniacale (N-NH <sub>4</sub> ) in entrata e uscita dall'impianto.....                                                                                            | pag. 76 |
| Figura 69: Concentrazioni di ortofosfato (P-PO <sub>4</sub> ) in entrata e uscita dall'impianto.....                                                                                                  | pag. 77 |
| Figura 70: Concentrazioni di fosforo totale (P <sub>tot</sub> ) in entrata e uscita dall'impianto.....                                                                                                | pag. 78 |
| Figura 71: Quantità per unità di superficie di sostanza organica (COD), in entrata e uscita<br>dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.....                                      | pag. 79 |
| Figura 72: Quantità per unità di superficie di sostanza organica (BOD <sub>5</sub> ), in entrata e uscita<br>dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.....                        | pag. 80 |
| Figura 73: Quantità per unità di superficie di tensioattivi anionici (MBAS), in entrata e uscita<br>dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.....                                 | pag. 81 |
| Figura 74: Quantità per unità di superficie di azoto Kjeldahl (TKN), in entrata e uscita<br>dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.....                                         | pag. 82 |
| Figura 75: Quantità per unità di superficie di azoto nitrico (N-NO <sub>3</sub> ), in entrata e uscita<br>dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.....                           | pag. 83 |
| Figura 76: Quantità per unità di superficie di azoto ammoniacale (N-NH <sub>4</sub> ), in entrata e uscita<br>dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.....                       | pag. 84 |
| Figura 77: Quantità per unità di superficie di ortofosfato (P-PO <sub>4</sub> ), in entrata e uscita<br>dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.....                             | pag. 85 |
| Figura 78: Quantità per unità di superficie di fosforo totale (P <sub>tot</sub> ), in entrata e uscita<br>dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.....                           | pag. 86 |
| Figura 79: Sviluppo vegetativo e ciclo fenologico delle tre specie vegetali.....                                                                                                                      | pag. 87 |
| Figura 80: Ripresa vegetativa delle piante nel mese di marzo.....                                                                                                                                     | pag. 88 |
| Figura 81: Particolare della fioritura di <i>lysimachia</i> .....                                                                                                                                     | pag. 88 |
| Figura 82: Sviluppo della vegetazione in data 08/05/2018. A sinistra linea1-2;<br>al centro linea 3-4; a destra linea 5-6.....                                                                        | pag. 89 |
| Figura 83: Sviluppo della vegetazione nel mese di giugno. A sinistra linea1-2;<br>al centro linea 3-4; a destra linea 5-6.....                                                                        | pag. 89 |
| Figura 84: Particolare della fioritura di <i>oenanthe</i> e morte della pianta di <i>lysimachia</i> nella<br>vasca "UP linea 3".....                                                                  | pag. 90 |
| Figura 85: Immagine della fioritura di <i>mentha</i> , della morte della pianta di <i>lysimachia</i> nella<br>vasca "MED linea 3" e delle condizioni della vegetazione a fine luglio (linea 5-6)..... | pag. 90 |
| Figura 86: Miglioramento delle condizioni delle piante a settembre.....                                                                                                                               | pag. 91 |

## INDICE TABELLE

|                                                                                                                                                |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Tabella 1 : Allegato A del DPR 227/2011 "Criteri di assimilazione delle acque reflue domestiche".....                                          | pag. 14 |
| Tabella 2 : Allegato A del DPR 227/2011 "Attività che generano acque reflue assimilate alle acque reflue domestiche".....                      | pag. 15 |
| Tabella 3 : Apporti unitari e concentrazioni nelle acque grigie e nelle acque nere.....                                                        | pag. 16 |
| Tabella 4: Caratteristiche delle acque grigie.....                                                                                             | pag. 17 |
| Tabella 5 : Composizione qualitativa delle acque grigie, provenienti da fonti diverse.....                                                     | pag. 18 |
| Tabella 6 : Caratteristiche qualitative delle acque grigie, provenienti da fonti diverse.....                                                  | pag. 18 |
| Tabella 7 : Limiti di emissione in corpi idrici superficiali, per gli impianti di acque reflue urbane.....                                     | pag. 23 |
| Tabella 8 : Limiti di emissione in corpi idrici superficiali, in aree sensibili, per gli impianti di acque reflue urbane.....                  | pag. 23 |
| Tabella 9: Valori limite di emissione in acque superficiali, fognatura e suolo.....                                                            | pag. 23 |
| Tabella 10: Limiti di emissione in acque superficiali, relativi ad impianti con potenzialità depurativa inferiore a 2000 a.e., in Veneto.....  | pag. 24 |
| Tabella 11: Limiti di emissione per il riutilizzo delle acque reflue.....                                                                      | pag. 25 |
| Tabella 12: Superfici necessarie e consumi energetici di alcuni sistemi di depurazione naturale ed artificiale.....                            | pag. 26 |
| Tabella 13: Confronto tra i costi di gestione e manutenzione di un impianto tradizionale a fanghi attivi e un impianto di fitodepurazione..... | pag. 27 |
| Tabella 14: Confronto tra i costi di gestione, per tipo di impianto, espressi in euro/m <sup>2</sup> /anno.....                                | pag. 27 |
| Tabella 15: Meccanismi di rimozione degli inquinanti, da parte della vegetazione.....                                                          | pag. 29 |
| Tabella 16: Meccanismi di rimozione degli inquinanti, da parte dei microorganismi.....                                                         | pag. 30 |
| Tabella 17: Prestazioni di diversi sistemi di fitodepurazione.....                                                                             | pag. 33 |
| Tabella 18: Caratteristiche fisico-chimiche delle due linee di acqua reflua prodotta dalla cucina della mensa.....                             | pag. 42 |
| Tabella 19: Bilancio idrico.....                                                                                                               | pag. 53 |
| Tabella 20: Aspetti positivi e negativi di ciascuna specie.....                                                                                | pag. 92 |
| Tabella 21: Biomassa vegetale espressa come peso fresco per unità di superficie (g/m <sup>2</sup> ).....                                       | pag. 93 |
| Tabella 22: Analisi statistica del peso fresco.....                                                                                            | pag. 93 |
| Tabella 23: Biomassa vegetale espressa come peso secco per unità di superficie (g/m <sup>2</sup> ).....                                        | pag. 94 |
| Tabella 24: Analisi statistica del peso secco.....                                                                                             | pag. 95 |

## RIASSUNTO

L'inquinamento delle acque è un grave problema, che sta causando un generale depauperamento di questa preziosa risorsa. Ad esso si associa spesso un'errata gestione delle risorse idriche, la quale favorisce inutili sprechi e consumi, nonché una diminuzione della quantità d'acqua pro capite ad uso idropotabile.

Una possibile soluzione a questi problemi è rappresentata dall'applicazione di una gestione sostenibile delle acque, non solamente a grande scala, ma anche a livello locale, su singole utenze ed abitazioni.

Tra le soluzioni possibili che mirano alla gestione sostenibile della risorsa idrica, esistono tecnologie che promuovono il mantenimento di un buon livello qualitativo della stessa e dove possibile, il riutilizzo, in modo tale da ridurre i consumi e l'impatto sull'ambiente.

Una pratica applicazione di questi concetti, si ritrova nell'adozione di sistemi naturali di trattamento delle acque reflue, quali la fitodepurazione, la quale ha trovato ampio spazio in aree rurali, ma recentemente sta affermandosi come soluzione adattabile anche ai contesti urbani in cui la limitazione principale alla sua realizzazione è la mancanza di spazio.

Con questa tesi si è voluto valutare le prestazioni depurative di un impianto di fitodepurazione salvaspazio, a sviluppo verticale, realizzato con l'obiettivo di depurare i reflui prodotti da edifici in ambito urbano.

L'impianto pilota, realizzato su una struttura portante sopraelevata, è composto da sei linee di fitodepurazione vegetate con tre specie vegetali diverse (*mentha aquatica* L., *oenanthe javanica* Blume DC. e *lysimachia nummularia* L.), ciascuna delle quali occupa due linee. Le acque reflue trattate provengono da una vasca settica situata presso la mensa del campus universitario di Agripolis (Legnaro, PD).

Per valutare le potenzialità di depurazione del sistema, nel corso del monitoraggio, effettuato nel periodo aprile-settembre 2018, sono state analizzate le principali caratteristiche chimico-fisiche delle acque reflue in ingresso ed in uscita dal sistema, per ogni linea vegetate con le diverse specie vegetali a confronto. Tra i parametri, ci si è focalizzati sulle concentrazioni e i quantitativi riguardanti la sostanza organica, i tensioattivi anionici (MBAS), le forme azotate e fosfatiche, nonché su parametri di base quali pH, conducibilità elettrica, solidi sospesi, ossigeno disciolto, potenziale redox e temperatura.

Infine è stato valutato lo sviluppo della vegetazione, tramite la determinazione della biomassa vegetale su una parte della vegetazione raccolta nel corso della stagione vegetativa.

I risultati dimostrano che *mentha* è la specie più adatta a vivere secondo le condizioni ambientali presenti nell'impianto di fitodepurazione, tollerando il carico inquinante che costituisce il reflu immesso nei letti vegetati.

Con il reflu in ingresso, durante il periodo di monitoraggio, è stato introdotto un totale di 641,30g/m<sup>2</sup> di COD, 288,38g/m<sup>2</sup> di BOD<sub>5</sub>, 17,85g/m<sup>2</sup> di tensioattivi, 30,32g/m<sup>2</sup> di azoto totale e 21,04g/m<sup>2</sup> per il fosforo totale.

Le due specie vegetali che hanno garantito il raggiungimento delle performance di depurazione migliori, in termini di sostanza organica e di tensioattivi sono state *mentha* ed *oenanthe*, con valori di rimozione rispettivamente pari all'81,75%-84,46% per il COD, 80,02%-82,22% per il BOD<sub>5</sub>, 87,48%-86,18% per gli MBAS.

Ottimi risultano anche i valori determinati dalle vasche vegetate con *lysimachia*: 78,09% (COD); 78,66% (BOD<sub>5</sub>); 80,13% (MBAS).

Per quanto riguarda gli altri parametri, solamente *mentha* si distingue per aver raggiunto performance depurative significative: 80,96% per TKN; 71,15% per N-NO<sub>3</sub>; 74,37% per N-NH<sub>4</sub>; 25,97% per P-PO<sub>4</sub>; 58,96% per P<sub>tot</sub>. Di contro *oenanthe* e *lysimachia* dimostrano delle percentuali di rimozione inferiori.

Attualmente, le concentrazioni misurate nel refluo in uscita dall'impianto di fitodepurazione sono inferiori ai limiti di legge relativi allo scarico in corpi idrici superficiali, ma non abbastanza da permetterne il riutilizzo.

Perciò, potrebbe essere interessante sperimentare altri metodi di gestione del sistema, oppure testare l'utilizzo di altre specie vegetali, allo scopo di incrementare le prestazioni depurative dell'impianto, in modo da riuscire ad ottenere un refluo in uscita dal sistema idoneo al riutilizzo, o per poter trattare reflui dotati di carichi inquinanti maggiori.

## ABSTRACT

Water pollution is a serious problem, which is causing a general depletion of this precious natural resource. Water management is often non-satisfactory, which promotes unnecessary water consumption and water quality reduction.

Nowadays, a possible solution to water-related issues is the application of sustainable water management systems, not just on a large scale, but also locally, on individual users and/or buildings.

Among the possible solutions for the sustainable management of water resources, there are technologies that promote the maintenance of a good standard and where possible, reusing, in such a way as to reduce consumption and impact on the environment.

A practical application of these concepts can be found in nature based solutions such as constructed wetlands, which have found broad application in rural areas. However, recently they are proposed as alternative solutions to urban wastewater treatment plants, where the main limitation to their implementation was initially the lack of space.

With this thesis, it was assessed the performance of an innovative vertical constructed wetland, which was thought and designed with the aim to treat the effluent from buildings in urban contexts.

The pilot system, built on a raised structure consisting of six lines constructed wetland, was vegetated with three different plant species (*Mentha aquatica* L., *Oenanthe javanica* Blume DC. and *Lysimachia nummularia* L.), each of which occupy two lines. The treated wastewater originates from a septic tank located at the canteen of the University Campus of Agripolis of the University of Padua (Legnaro, Padua).

To evaluate the potential of sewage treatment system, during monitoring that was performed in the period April-September 2018, the main physical and chemical properties of wastewater in input and output from the system were analyzed, for each line. Among the parameters, the focus was on concentrations and amounts of organic matter (BOD<sub>5</sub>, COD), anionic surfactants (MBAS), nitrogen and phosphate, as well as on the basic physico-chemical parameters such as pH, electrical conductivity, suspended solids, oxygen dissolved, redox and temperature.

Finally, the development of the vegetation was evaluated by determination of plant biomass on a portion of the collection during the vegetation growing season.

Results showed that *mentha* is the most suitable to live according to the environmental conditions present in the constructed wetland, tolerating pollution which is the sewage entered into unvegetated beds.

During the monitoring period, with the wastewater input it was introduced a total of 641,30 g/m<sup>2</sup> of COD, 288,38g/m<sup>2</sup> of BOD<sub>5</sub>, 17,85g/m<sup>2</sup> of surfactants, 30,32 g/m<sup>2</sup> total nitrogen and 21,04g/m<sup>2</sup> for total phosphorus.

The two plant species that have ensured the best treatment performance in terms of organic matter and surfactants were *mentha* and *oenanthe*, respectively with 81.75%-84.46% for COD, 80.02%- 82.22% for BOD<sub>5</sub>, 87.48%-86.18% for MBAS of performance.

Less effective was the vegetated beds with *lysimachia*: 78.09% (COD); 78.66% (BOD<sub>5</sub>); 80.13% (MBAS)

Regarding the other parameters, only *mentha* is distinguished by having achieved significant performance: 80.96% to TKN; 71.15% for N-NO<sub>3</sub>; 74.37% for N-NH<sub>4</sub>; 25.97% to P-PO<sub>4</sub>; 58.96% for P<sub>tot</sub>. Conversely lower removal rates demonstrate *oenanthe* and *lysimachia*.

Currently, the measured concentrations in the wastewater exiting the constructed wetland are below the legal limits for the discharge into surface water bodies, but not enough to allow reuse. Therefore, it might be interesting to experiment with other system management methods or test the use of other plant species, in order to increase performance properties of the system, so as to obtain a waste water outlet system suitable for reuse, or to be able to deal with wastewater pollution loads more.

# 1 INTRODUZIONE

I cambiamenti climatici che al giorno d'oggi, si stanno verificando in Italia, così come nel resto del mondo, mettono in evidenza tutti i problemi e le debolezze dei sistemi, sviluppati dall'uomo, con i quali vengono gestite le risorse idriche.

L'alternanza di eventi meteorologici estremi, tra cui il susseguirsi di abbondanti precipitazioni in poco tempo ed il manifestarsi di periodi siccitosi molto lunghi, stanno mettendo a rischio il nostro territorio (allagamenti, dissesti idrogeologici, produzioni agricole compromesse, scarsità di acqua...), con forti ripercussioni sull'economia e sulla società.

A questo si associa il costante aumento del fabbisogno d'acqua, da utilizzare per varie finalità, il quale spesso non può essere soddisfatto, poiché le risorse idriche disponibili sono carenti, troppo inquinate o non rispettano i requisiti minimi di qualità per essere impiegate.

Gli effetti negativi si moltiplicano nel tessuto urbano, il quale ha spesso perso la sua capacità di resilienza e di adattamento a condizioni estreme, a causa del maggior impatto antropico che ha stravolto i normali equilibri naturali.

Ecco perché, questi aspetti devono fare da guida per una nuova pianificazione del territorio, la quale deve porsi come principale obiettivo, una gestione sostenibile dell'acqua, allo scopo di garantire la protezione dell'ambiente ed il mantenimento della salute pubblica, soprattutto nelle città.

Per fare questo, una possibile soluzione, consiste nel migliorare ed incrementare le aree destinate ad "infrastrutture verdi", definibili come ecosistemi naturali o seminaturali, in grado di fornire numerosi servizi, capaci di riprodurre e sostituire quelli prodotti dalle opere artificiali, a basso costo e a ridotto impatto ambientale. Esse permettono di combinare i vantaggi dati dalla pianificazione e realizzazione effettuata dall'uomo, con le caratteristiche di multifunzionalità e resilienza tipiche dei sistemi naturali, quali il miglioramento/mantenimento della biodiversità, l'autoregolazione dei flussi, mitigazione dei cambiamenti climatici ecc.

Nel campo della gestione idrica, trovano ottimo impiego i sistemi naturali di depurazione delle acque, ad esempio la fitodepurazione, per migliorare la qualità dei reflui e permetterne un possibile riutilizzo.

Molto interessanti sono gli impianti, realizzati per il trattamento degli scarichi di piccole comunità, o di singoli edifici, i quali presentano elevate rese depurative, poiché sono dimensionati e adattati per soddisfare le specifiche esigenze delle diverse situazioni per cui vengono costruiti.

In questa tesi, viene analizzato il rendimento depurativo di un piccolo impianto intensificato di fitodepurazione per il trattamento di acque reflue domestiche, valutandone la capacità di abbattimento degli inquinanti presenti e la riduzione dei volumi di refluo in uscita dall'impianto. Allo stesso tempo, monitorando il comportamento e le performance di tre differenti specie vegetali, sulla base della loro crescita, della loro adattabilità all'ambiente, all'acqua reflua e della loro capacità di riduzione delle sostanze inquinanti presenti.

Nelle pagine seguenti vengono inizialmente affrontati vari temi inerenti al lavoro di ricerca effettuato, per poi passare alla descrizione dell'impianto oggetto di studio ed infine all'analisi dei risultati ottenuti.

## 1.1 INQUINAMENTO DELLE ACQUE

### 1.1.1 DEFINIZIONE

L'acqua è una risorsa limitata e la sua domanda, per gli usi più svariati, è in costante aumento. L'inquinamento di questa risorsa naturale, è un grave problema, poiché danneggiandone la qualità, se ne riduce la quantità disponibile per il consumo (Borin, 2003).

L'acqua viene definita inquinata, quando le sue proprietà chimiche, fisiche e biologiche si differenziano dalle condizioni ritenute ottimali per un determinato obiettivo di qualità (Borin, 2003).

Questo fa sì che un'acqua ritenuta non idonea per un certo utilizzo, ad esempio per il consumo umano, possa comunque essere usata per un altro scopo, come l'irrigazione.

Esistono quindi una serie di limiti, stabiliti dalla legge, basati sulle principali caratteristiche qualitative delle acque, i quali definiscono se effettivamente una risorsa idrica è alterata e se può essere impiegata o meno.

### 1.1.2 TIPI DI INQUINAMENTO

A seconda dei caratteri alterati, l'inquinamento può essere di tipo:

- fisico, quando si verificano delle modificazioni delle proprietà fisiche, ossia della temperatura, della torbidità o del colore;
- chimico, quando vengono influenzati i principali parametri chimici, ad esempio il pH, la salinità, l'ossigeno disciolto, il contenuto di sali, ecc.;
- biologico, se vengono diffusi microorganismi, che in condizioni normali non sarebbero presenti (Ferrari et al., 2001).

### 1.1.3 ORIGINE DELL'INQUINAMENTO

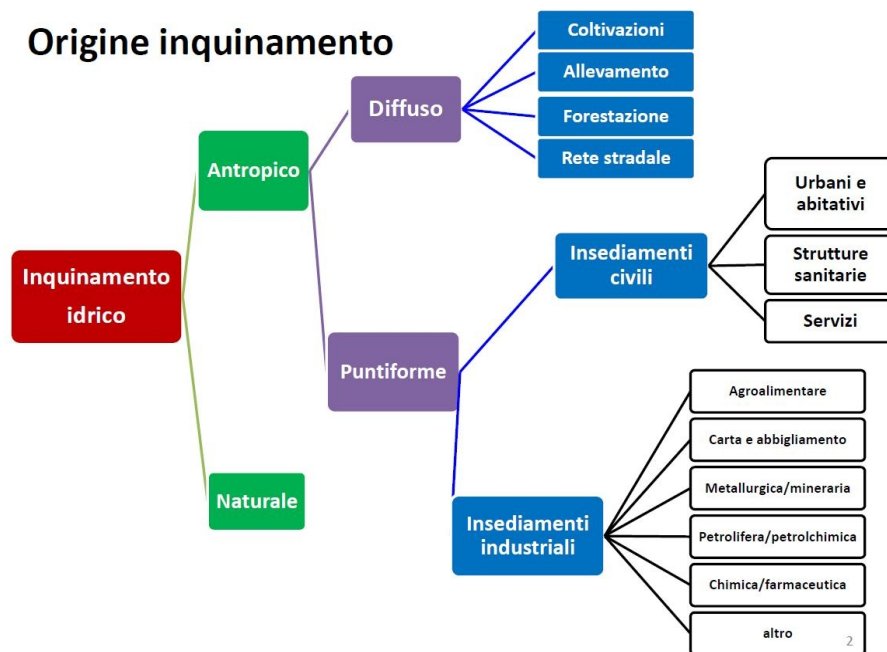
L'inquinamento dell'acqua può essere di origine naturale, o artificiale, cioè dove prevale la responsabilità da parte dell'uomo.

Molto spesso, le modificazioni generate dall'attività antropica, non riguardano solo la quantità delle sostanze presenti, ma la qualità delle stesse, con il rilascio di prodotti di sintesi, naturalmente non presenti nell'ambiente e di conseguenza estremamente dannosi, in quanto soggetti a difficile biodegradabilità.

A loro volta, le fonti artificiali si dividono in:

- diffuse: se l'alterazione ha origine e si sviluppa su estese superfici, variabili nel tempo e nello spazio. In questo caso, non si ha la possibilità di trovare un punto ben definito su cui avviene l'inquinamento. Tipiche sorgenti di inquinamento diffuso sono le attività agricole e le acque meteoriche di dilavamento;
- puntiformi: quando è presente una sorgente facilmente individuabile, dove ha luogo la contaminazione. I più importanti sono gli scarichi industriali e le acque reflue che derivano dagli insediamenti urbani.





*Figura 1: Principali fonti di inquinamento delle acque.*

## 1.2 ACQUE REFLUE

### 1.2.1 DEFINIZIONE

Le acque reflue, sono un miscuglio di acqua pura contenente un gran numero di sostanze chimiche (organiche ed inorganiche), che possono essere prodotte da attività domestiche, industriali e commerciali, in aggiunta alle acque di precipitazione, di dilavamento e del terreno (Dixit et al., 2011).

Queste acque, non trattate, generalmente contengono alti livelli di composti organici, microorganismi patogeni, così come nutrienti, metalli pesanti e sostanze tossiche (Dixit et al., 2011) che ne rendono impossibile l'utilizzo.

### 1.2.2 TIPOLOGIE DI ACQUE REFLUE

Le acque reflue possono essere suddivise in base alla loro origine, in tre categorie (D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale"):

- Acque reflue domestiche: acque reflue provenienti da insediamenti di tipo residenziale e da servizi derivanti prevalentemente dal metabolismo umano e da attività domestiche;
- Acque reflue industriali: qualsiasi tipo di acque reflue scaricate da edifici od impianti in cui si svolgono attività commerciali o di produzione di beni, diverse dalle acque reflue domestiche e dalle acque meteoriche di dilavamento;
- Acque reflue urbane: acque reflue domestiche o il miscuglio di acque reflue domestiche, di acque reflue industriali oppure meteoriche di dilavamento convogliate in reti fognarie, anche separate, e provenienti da agglomerato;

### 1.2.3 ACQUE REFLUE ASSIMILATE ALLE ACQUE DOMESTICHE

Molto spesso, anche attività non domestiche o strutture con destinazione d'uso diversa da quella abitativa, producono reflui, che per le loro caratteristiche qualitative, si possono classificare come acque reflue domestiche.

Tuttavia, affinché possano essere considerate come tali, il DPR 19 Ottobre 2011, n. 227 stabilisce quali tipologie di acque siano associabili ai reflui domestici:

- le acque che prima di ogni trattamento depurativo presentano le caratteristiche qualitative e quantitative di cui alla tabella 1 dell'Allegato A;

| Parametro/sostanza                        | Unità di misura        | Valore limite di emissione           |
|-------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Portata                                   | m <sup>3</sup> /giorno | <=1,5                                |
| pH                                        |                        | 5,5-9,5                              |
| Temperatura                               | °C                     | <=30                                 |
| Colore                                    |                        | Non percettibile con diluizione 1:40 |
| Materiali grossolani                      |                        | Assenti                              |
| Solidi sospesi totali                     | mg/L                   | <=700                                |
| BOD <sub>5</sub> (come ossigeno)          | mg/L                   | <=300                                |
| COD (come ossigeno)                       | mg/L                   | <=700                                |
| Rapporto COD/BOD <sub>5</sub>             |                        | <=2,2                                |
| Fosforo totale (come P)                   | mg/L                   | <=30                                 |
| Azoto ammoniacale (come NH <sub>4</sub> ) | mg/L                   | <=50                                 |
| Azoto nitroso (come N)                    | mg/L                   | <=0,6                                |
| Azoto nitrico (come N)                    | mg/L                   | <=30                                 |
| Grassi ed oli vegetali/animali            | mg/L                   | <=40                                 |
| Tensioattivi                              | mg/L                   | <=20                                 |

*Tabella 1 : Allegato A del DPR 227/2011 "Criteri di assimilazione delle acque reflue domestiche".*

- le acque reflue provenienti da insediamenti in cui si svolgono attività di produzione di beni e prestazione di servizi, i cui scarichi terminali provengono esclusivamente da servizi igienici, cucine e mense;

- le acque reflue provenienti dalle categorie di attività elencate nella tabella 2 dell'Allegato A, con le limitazioni indicate nella stessa tabella.

|    | Attività                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Attività alberghiera, rifugi montani, villaggi turistici, residence, agriturismi, campeggi, locande e simili                                                                                                                                                                                                   |
| 2  | Attività ristorazione (anche self-service), mense, trattorie, rosticcerie, friggitorie, pizzerie, osterie e birrerie con cucina                                                                                                                                                                                |
| 3  | Attività ricreativa                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 4  | Attività turistica non ricettiva                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 5  | Attività sportiva                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 6  | Attività culturale                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 7  | Servizi di intermediazione monetaria, finanziaria, e immobiliare                                                                                                                                                                                                                                               |
| 8  | Attività informatica                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 9  | Laboratori di parrucchiere barbiere e istituti di bellezza con un consumo idrico giornaliero inferiore a 1 m <sup>3</sup> al momento di massima attività                                                                                                                                                       |
| 10 | Lavanderie e stirerie con impiego di lavatrici ad acqua analoghe a quelle di uso domestico e che effettivamente trattino non più di 100 kg di biancheria al giorno                                                                                                                                             |
| 11 | Attività di vendita al dettaglio di generi alimentari, bevande e tabacco o altro commercio al dettaglio                                                                                                                                                                                                        |
| 12 | Laboratori artigianali per la produzione di dolci, gelati, pane, biscotti e prodotti alimentari freschi, con un consumo idrico giornaliero inferiore a 5 m <sup>3</sup> nel periodo di massima attività                                                                                                        |
| 13 | Grandi magazzini, solamente se avviene la vendita di beni con esclusione di lavorazione di carni, pesce o di pasticceria, attività di lavanderia e in assenza di grandi aree di parcheggio                                                                                                                     |
| 14 | Bar, caffè, gelaterie (anche con intrattenimento spettacolo), enoteche, bottiglierie con somministrazione                                                                                                                                                                                                      |
| 15 | Asili nido, istruzione primaria e secondaria di primo e secondo grado, istruzione universitaria                                                                                                                                                                                                                |
| 16 | Discoteche, sale da ballo, night pubs, sale giochi e biliardi e simili                                                                                                                                                                                                                                         |
| 17 | Stabilimenti balneari-(marittimi, lacuali e fluviali)                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 18 | Servizi dei centri e stabilimenti per il benessere fisico e l'igiene della persona                                                                                                                                                                                                                             |
| 19 | Piscine - Stabilimenti idropinici ed idrotermali, escluse le acque di contro lavaggio dei filtri non preventivamente trattate                                                                                                                                                                                  |
| 20 | Vendita al minuto di generi di cura della persona                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 21 | Palestre                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 22 | Piccole aziende agroalimentari appartenenti ai settori lattiero-caseario, vitivinicolo e ortofrutticolo, che producano quantitativi di acque reflue non superiori a 4000 m <sup>3</sup> /anno e quantitativi di azoto, contenuti in dette acque a monte della fase di stoccaggio, non superiori a 1000 kg/anno |
| 23 | Ambulatori medici studi veterinari o simili, purché sprovvisti di laboratori di analisi e ricerca                                                                                                                                                                                                              |
| 24 | Ospedali, case o istituti di cura, residenze socio-assistenziali e riabilitative con un numero di posti letto inferiore a 50, purché sprovvisti di laboratori di analisi e ricerca                                                                                                                             |
| 25 | Conservazione, lavaggio, confezionamento, di prodotti agricoli e altre attività dei servizi connessi all'agricoltura svolti per conto terzi esclusa trasformazione                                                                                                                                             |
| 26 | Macellerie sprovviste del reparto di macellazione                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 27 | Agenzie di viaggio                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 28 | Call center                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 29 | Attività di intermediazione assicurativa                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 30 | Esercizi commerciali di oreficeria, argenteria, orologeria                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 31 | Riparazione di beni di consumo                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 32 | Ottici                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

|    |                                                                                                     |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 33 | Studi audio video registrazioni                                                                     |
| 34 | Laboratori artigianali di sartoria e abbigliamento senza attività di lavaggi, tintura e finissaggio |
| 35 | Liuteria                                                                                            |

*Tabella 2 : Allegato A del DPR 227/2011 "Attività che generano acque reflue assimilate alle acque reflue domestiche".*

#### 1.2.4 ACQUE REFLUE DOMESTICHE

Le acque reflue domestiche, comprendono tutti i reflui che contengono residui metabolici (feci e urine)e/o i reflui provenienti dagli scarichi delle altre attività domestiche. In base a questo, vengono a loro volta suddivise in:

- acque “nere”, la cui provenienza deriva soprattutto dagli scarichi di bagni e servizi igienici (feci e urine);
- acque “grigie”, che prendono origine dal lavaggio degli abiti, dalle cucine, dalle docce, ecc., ma ad esclusione delle acque “nere”.

Quindi, la differenza principale, che caratterizza queste due tipologie di acque di scarico domestico è data dal diverso contenuto e concentrazione delle sostanze inquinanti presenti al loro interno. Le acque nere, contengono azoto e fosforo in alte concentrazioni, oltre a patogeni, ormoni e residui di farmaci (Zeeman et al., 2008).

Invece, le acque grigie sono meno cariche di nutrienti ed altri agenti inquinanti, infatti, mediamente, contengono meno della metà del carico organico rispetto alle acque nere e solo 1/10 dell'azoto totale ([www.igidra.eu/it/](http://www.igidra.eu/it/)).

| Parametro                     | Apporti (g/abitante/giorno) |      |               | Concentrazioni (mg/L)    |                       |
|-------------------------------|-----------------------------|------|---------------|--------------------------|-----------------------|
|                               | Grigie                      | Nere | Grigie + Nere | Grigie(170L/abitante/gg) | Nere(80L/abitante/gg) |
| BOD <sub>5</sub>              | 25                          | 30   | 55            | 150                      | 375                   |
| COD                           | 48                          | 72   | 120           | 280                      | 900                   |
| SS                            | 18                          | 52   | 70            | 105                      | 650                   |
| P <sub>tot</sub>              | 2,2                         | 1,6  | 3,8           | 13                       | 20                    |
| P <sub>tot</sub> <sup>*</sup> | 0,5                         | 1,6  | 2,1           | 3                        | 20                    |
| TKN                           | 1,1                         | 11   | 12,1          | 6,5                      | 135                   |

*Tabella 3 : Apporti unitari e concentrazioni nelle acque grigie e nelle acque nere.  
(\* )si riferisce ai detersivi senza fosforo*

Il minor carico di inquinanti presenti nelle acque grigie è ampiamente dimostrato dalla pratica e dalla letteratura scientifica: la ricerca condotta da Otterphol, per esempio, riporta che, mediamente, l'azoto totale derivante dagli scarichi domestici sia solo per circa il 3% riconducibile alle acque grigie prodotte, a differenza delle acque nere dove è contenuto per l'87% nelle urine e il 10% nelle feci (Otterpohl, 2002).

Ovviamente, le concentrazioni delle sostanze presenti sono molto variabili e dipendono principalmente dal tipo di struttura la quale produce le acque di scarico, oppure dalle acque reflue stesse che possono essere miscelate, separate ecc., sulla base delle esigenze sito-specifiche. Nel caso delle abitazioni, ad esempio i valori possono essere molto differenti a seconda del numero di abitanti, dal loro stile di vita e dalla disponibilità di acqua potabile.

| Studio                   | BOD <sub>5</sub> (mg/L)   | COD (mg/L) | TSS (mg/L) | N <sub>tot</sub> (mg/L) | P <sub>tot</sub> (mg/L) |
|--------------------------|---------------------------|------------|------------|-------------------------|-------------------------|
| Wohnstadt. 1998          | 100-130                   | 200-250    | 70-90      | -                       | -                       |
| Jefferson e Laine. 1997  | -                         | 257        | 78         | -                       | -                       |
| Bahlo. 1999              | 240                       | 470        | -          | 22                      | 2                       |
| Nolde. 1999              | 5-360 (BOD <sub>7</sub> ) | 100-600    | -          | 5-18                    | 0,2-4,5                 |
| Oteng-Peprah et al. 2018 | 114-394                   | 270-1595   | 333-744    | -                       | 1-3                     |
| Li et al. 2003           | -                         | 258-354    | -          | 9,7-16,6                | 5,2-9,6                 |
| Gross et al. 2015        | 686                       | 270        | -          | 14                      | 18                      |
| Leal et al. 2007         | 1583                      | -          | -          | 47,8                    | 9,9                     |
| Leal et al. 2007         | 425                       | 215        | -          | 17,2                    | 5,7                     |

Tabella 4: Caratteristiche delle acque grigie.

Ancora, le acque nere si diversificano dalle acque grigie per i volumi prodotti. Infatti, queste ultime possono costituire, mediamente fino al 70-75% del volume totale di refluo prodotto da un'abitazione (Leal et al., 2011), pari a 140-200 litri/abitante/giorno ([www.iredra.eu/it/](http://www.iredra.eu/it/)).

Le acque grigie, grazie alla loro composizione, risultano essere molto più facilmente e velocemente depurabili rispetto alle acque nere.

Infatti le sostanze inquinanti presenti al loro interno, come carboidrati, grassi e proteine, non essendo ancora state sottoposte ad alcun processo degradativo, sono molto più facilmente biodegradabili, dato che sono prontamente disponibili per la flora batterica responsabile della depurazione ([www.iredra.eu/it/](http://www.iredra.eu/it/)). Per contro le acque nere, contengono composti organici che hanno subito una sostanziale trasformazione a carico dell'apparato digerente umano e quindi risultano molto più difficilmente decomponibili in acqua.

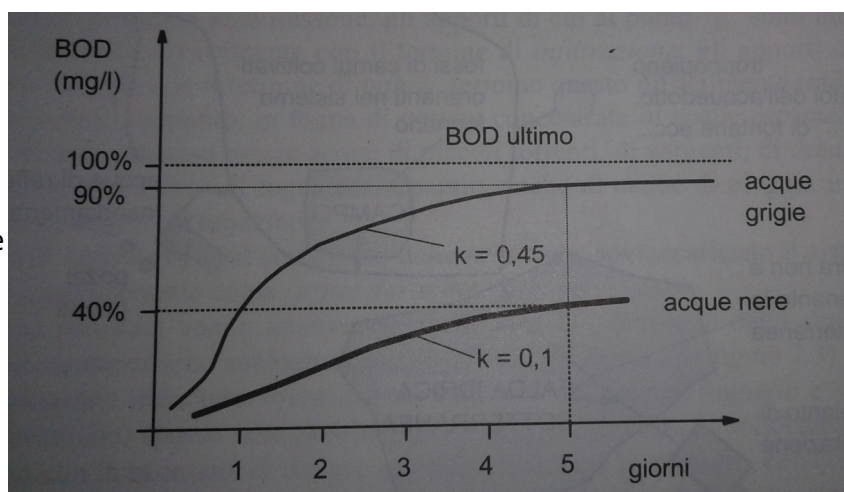


Figura 2: Andamento del BOD<sub>5</sub> nelle acque nere e grigie.

Ciò viene efficacemente dimostrato dal diverso andamento del BOD<sub>5</sub> dei due diversi tipi di refluo. Dopo 5 giorni, nel caso delle acque nere, solo il

40% della sostanza organica viene mineralizzato, mentre nelle acque grigie, si arriva facilmente al 90%, ovvero con tassi di degradazione molto più elevati (Masotti e Verlicchi, 2005).

Questo aspetto è molto importante da tenere in considerazione, in quanto a seguito di un eventuale scarico di acque grigie in un corpo idrico recettore, si assiste ad una notevole diminuzione di ossigeno nel punto di immissione del reflu.

Infine, un'ulteriore differenza tra acque nere e grigie, risiede nella capacità di emanare cattivi odori. Le prime infatti, possono costituire un grave problema, mentre le seconde, normalmente in condizioni aerobiche non causano particolari inconvenienti. Tuttavia, se queste rimangono per qualche tempo stoccate in bacini, il rapido consumo di ossigeno, dovuto alla facile biodegradabilità del reflu, crea delle condizioni anaerobiche, le quali portano alla formazione di odori indesiderati, (Masotti e Verlicchi, 2005).

Quindi, in definitiva, le acque grigie sono relativamente poco inquinate, tali da renderle, a seguito di un trattamento depurativo, potenzialmente idonee per il loro riutilizzo in molte applicazioni, ad esempio per l'irrigazione, per gli sciacquoni del WC, ecc. (Leal et al., 2011).

#### 1.2.5 CARATTERISTICHE DELLE ACQUE DI SCARICO DELLE CUCINE

Un caso a parte, è rappresentato dalle acque di scarico delle cucine (mense, ristoranti, ecc.), le quali, come mostrato in tabella 5, presentano delle concentrazioni, in termini di sostanza organica, solidi sospesi, torbidità, azoto e fosforo, maggiori rispetto ad altre acque grigie o quelle miste (Li et al., 2009).

|                                | Bathroom                 | Laundry                   | Kitchen                | Mixed                     |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| pH (—)                         | 6.4–8.1                  | 7.1–10                    | 5.9–7.4                | 6.3–8.1,                  |
| TSS (mg/l)                     | 7–505                    | 68 – 465                  | 134–1300               | 25–183                    |
| Turbidity (NTU)                | 44–375                   | 50 – 444                  | 298.0                  | 29–375                    |
| COD (mg/l)                     | 100–633                  | 231 – 2950                | 26–2050                | 100–700                   |
| BOD (mg/l)                     | 50–300                   | 48 – 472                  | 536–1460               | 47–466                    |
| TN (mg/l)                      | 3.6–19.4                 | 1.1 – 40.3                | 11.4–74                | 1.7–34.3                  |
| TP (mg/l)                      | 0.11– >48.8              | ND – >171                 | 2.9– >74               | 0.11–22.8                 |
| Total coliforms (CFU/100 ml)   | 10–2.4 × 10 <sup>7</sup> | 200.5–7 × 10 <sup>5</sup> | >2.4 × 10 <sup>8</sup> | 56–8.03 × 10 <sup>7</sup> |
| Faecal coliforms (CFU/ 100 ml) | 0–3.4 × 10 <sup>5</sup>  | 50–1.4 × 10 <sup>3</sup>  | –                      | 0.1–1.5 × 10 <sup>8</sup> |

*Tabella 5 : Composizione qualitativa delle acque grigie, provenienti da fonti diverse.*

Anche la ricerca effettuata da Donner E., i cui risultati sono riassunti nella tabella 6, conferma quanto visto in precedenza.

| Proprietà chimico-fisiche | Bagni     | Lavanderie | Cucine     | Fonti miste |
|---------------------------|-----------|------------|------------|-------------|
| pH                        | 6,4 - 8,6 | 8,1 - 10   | -          | 5 – 8,7     |
| TSS (mg/L)                | 7 - 207   | 120 - 280  | 235 - 720  | 15 - 112    |
| BOD <sub>5</sub> (mg/L)   | 26 - 300  | 48 - 380   | 47 - 1460  | 41 - 500    |
| COD (mg/L)                | 100 - 633 | 725 - 1815 | 644 - 1380 | 283 - 549   |
| Azoto tot. (mg/L)         | 3,6 - 17  | 6 - 21     | 40 - 74    | 0,6 - 11    |
| Fosforo tot. (mg/L)       | 0,1 - 49  | 0,1- > 101 | 68 - 74    | 0,6- > 68   |

*Tabella 6 : Caratteristiche qualitative delle acque grigie, provenienti da fonti diverse.*

Gli inquinanti principali che si possono trovare nelle acque grigie provenienti dalla cucine sono:

- Sostanze solide totali: presenti in varie forme (sedimentabili, disciolte, sospese), a seconda della loro dimensione. I solidi rappresentano il materiale disciolto o in sospensione in un'acqua naturale o di scarico (Belli et al., 2003). Sono all'origine della torbidità dell'acqua e per questo penalizzano il verificarsi di processi naturali di depurazione, soprattutto ostacolando il passaggio della luce (Masotti e Verlicchi, 2005). Per di più, un contenuto elevato di solidi disciolti può rendere un'acqua potabile di scarsa qualità, anche perché possono trasportare altre sostanze inquinanti adsorbite ad essi.
- Sostanza organica biodegradabile: sono composti contenenti carbonio, idrogeno e ossigeno. Di norma, si tratta per il 40-60% di proteine, per il 25-50% di carboidrati e per il 10% di grassi e oli (Masotti e Verlicchi, 2005). Il problema principale di queste sostanze è dato dal fatto che la loro degradazione provoca una diminuzione del contenuto di ossigeno nell'acqua, compromettendo la vita degli organismi acquatici (Ferrari et al., 2001).
- Azoto, che si trova presente come: organico (componente di diversi composti organici); ammoniacale (derivante dalla degradazione dell'azoto organico, che in elevate concentrazioni risulta tossico); nitrito e nitrato (si sviluppano a seguito dell'ossidazione dell'azoto ammoniacale) i quali di solito, nelle acque reflue domestiche sono presenti in concentrazioni molto basse;
- Fosforo: il fosforo, nelle acque naturali e di scarico, è presente quasi esclusivamente come fosfato, in particolare ortofosfato. (Belli et al., 2003). Il fosforo non è di per se una sostanza tossica, ma è il principale responsabile del fenomeno di eutrofizzazione delle acque, assieme all'azoto;
- Tensioattivi: sono presenti nelle polveri e nei liquidi detersivi, per coadiuvare la loro azione, portando in sospensione lo sporco e sequestrando la durezza dell'acqua. Si dividono in tre categorie: anionici (in acqua si dissociano in una parte anionica con funzione pulente e una parte cationica), che sono maggiormente usati nelle attività domestiche; cationici (in cui l'attività detergente, a differenza dei precedenti, ha luogo nella parte cationica), i quali sono noti per le proprietà battericide e ammorbidenti dei tessuti ed impiegati prevalentemente in campo industriale; non ionici (non si dissociano in acqua).  
La presenza di detersivi nelle acque, comporta la formazione di schiume sulla superficie, le quali possono ridurre gli scambi gassosi tra acqua ed atmosfera, in particolare di ossigeno.

In aggiunta a queste sostanze, molto alta è la presenza di oli e grassi, con concentrazioni che possono arrivare a 500-800 mg/l (Masotti e Verlicchi, 2005).

Questi, nella maggior parte dei casi, vengono eliminati per mezzo di trattamenti preliminari di disoleatura, direttamente nel punto in cui vengono scaricati, dato che sono in grado di diminuire l'efficienza dei successivi processi depurativi ed oltre a ciò di causare danni all'ambiente acquatico. Per questo motivo, normalmente non sono presenti in elevate quantità nelle acque reflue.



### 1.3 GESTIONE SOSTENIBILE DELLE ACQUE REFLUE DOMESTICHE

Il problema della corretta gestione della risorsa idrica, sta assumendo sempre maggiore importanza e deve essere affrontato con un approccio integrato, nel quale ogni utente faccia la sua parte per utilizzarla al meglio, riducendo gli sprechi, non degradando e possibilmente migliorandone la sua qualità (Borin, 2003).

Per essere sostenibile, un sistema di gestione delle acque richiede un uso efficiente dell'acqua, in grado di evitare il ricorso a sostanze pericolose per la depurazione, riciclare le sostanze nutritive, trattare le acque reflue a costi contenuti e recuperare le acque trattate per usi domestici o per l'irrigazione. In questo modo le acque reflue, invece di essere considerate un rifiuto da smaltire, diventano una risorsa idrica da sfruttare.

#### 1.3.1 CONSUMI IDRICI

I principali settori di consumo della risorsa idrica sono la produzione di acqua potabile per usi civili, l'utilizzo nelle industrie, l'uso in agricoltura, principalmente per scopi irrigui e negli allevamenti (Ferrari et al., 2001).

Nel nostro paese, i prelievi di acqua effettuati nel 2012 sono stati destinati: per il 51% all'irrigazione delle coltivazioni, per il 21% a usi industriali, per il 20% a usi civili, per il 5 % alla produzione di energia termoelettrica e per il restante 3% alla zootecnia.

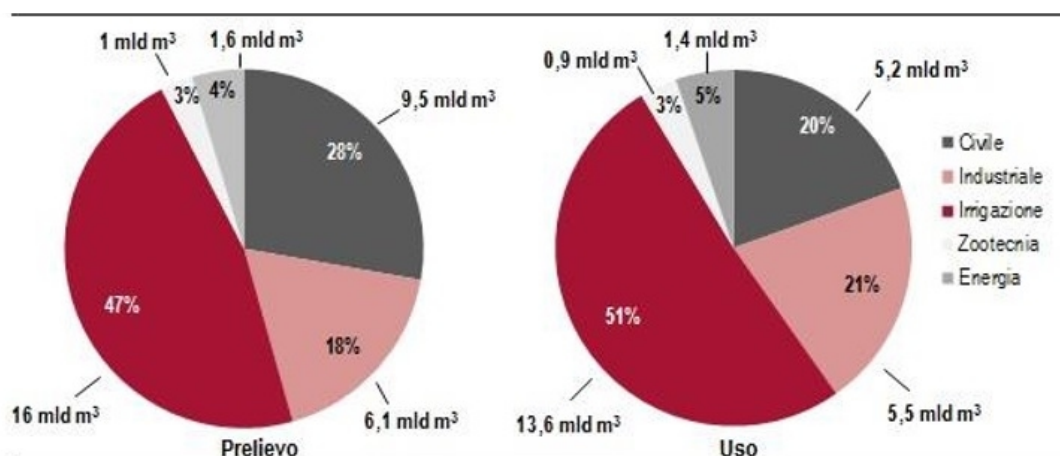
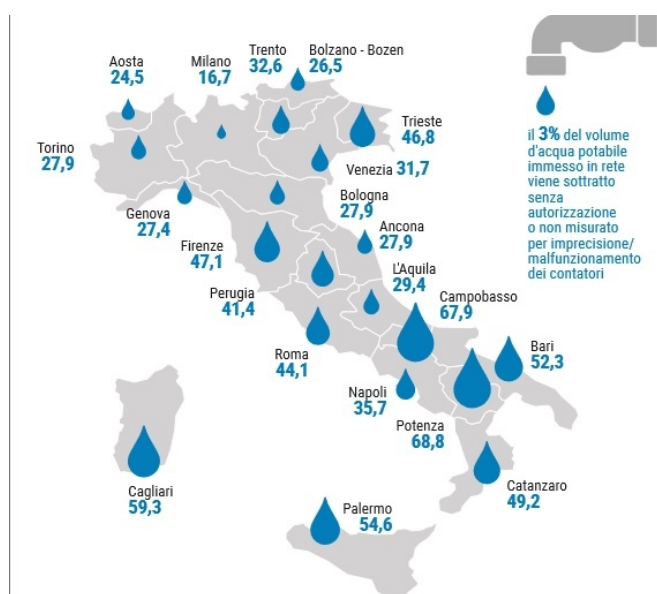


Figura 3: Prelievi ed utilizzo di acqua per le principali attività umane. Italia, 2012.

La maggior parte di quest'acqua viene prelevata da bacini superficiali, come laghi e fiumi, per scopi industriali e agricoli. Mentre una quota minore, per gli usi civili, proviene dalle falde sottomarine ed in certi casi dalla desalinizzazione delle acque marine.

In Italia, nel 2015, il volume di acqua complessivamente prelevato per uso potabile sul territorio ammonta a 9,49 miliardi di metri cubi. ([www.istat.it](http://www.istat.it))





L'84,3% del prelievo nazionale di acqua per uso potabile deriva da acque sotterranee (48,0% da pozzo e 36,3% da sorgente).

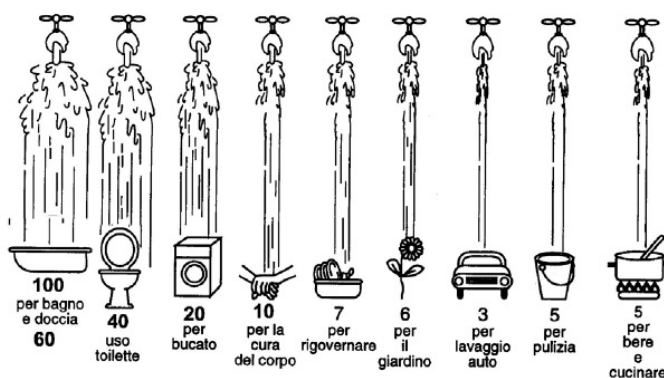
La quantità erogata alla popolazione, si attesta intorno a 250 litri/abitante/giorno, di cui purtroppo, in media il 40% viene disperso nelle reti di distribuzione, prima di arrivare agli utenti finali. ([www.istat.it](http://www.istat.it))

*Figura 4: Perdite idriche delle reti di distribuzione di acqua potabile. Rapporto percentuale tra perdite totali e volumi immessi in rete, 2015.*

Perciò ogni persona, mediamente utilizza 200-250 litri al giorno, anche se questo dato è molto variabile e dipende da numerosi fattori. Le variazioni dei consumi idrici su scala municipale dipendono da un lato da aspetti socioeconomici (legati per lo più alla vocazione attrattiva del territorio, quindi alla popolazione insistente e alle attività economiche presenti su scala urbana), dall'altro dalle differenti performance della rete di distribuzione ([www.istat.it](http://www.istat.it)).

Alcuni esempi, dei più comuni consumi per le varie attività domestiche, sono:

- da un rubinetto aperto escono in media 12 litri al minuto;
- quando schiacciamo il tasto dello sciacquone dei servizi igienici escono in media 10 litri;
- per una doccia da 5 minuti, vengono usati circa 60 litri, mentre per un bagno circa 100 litri;
- per lavare l'automobile si possono consumare dai 200 ai 300 litri.



*Figura 5: Consumi medi d'acqua potabile, delle principali attività domestiche. Valori espressi in litri.*

### 1.3.2 RIUTILIZZO DELLE ACQUE REFLUE DOMESTICHE

A seguito dell'analisi degli importanti prelievi, che l'uomo effettua sulle risorse idriche, per soddisfare le proprie esigenze, si comprende l'assoluta necessità di risparmiare acqua e di adottare tecnologie che puntino al riutilizzo delle acque, una volta depurate.

Da questo punto di vista, sono particolarmente adatte al riciclo le acque grigie, grazie ai bassi livelli di nutrienti, contaminanti e microorganismi patogeni, in esse contenuti.

Il loro riuso, può costituire un'importante risorsa, specialmente in zone povere d'acqua, facilmente riscontrabili anche in Italia, sia a livello di singoli edifici, sia per agglomerati più grandi.

I principali vantaggi di questa pratica sono:

- un minor prelievo d'acqua dalle falde o da bacini superficiali;
- mitigazione degli eventi meteorologici estremi, dato che parte delle acque di scarico non vengono immesse direttamente nelle reti fognarie.
- un minor consumo energetico ed un risparmio economico per la riduzione della quantità d'acqua che viene potabilizzata e per la sua successiva depurazione una volta utilizzata;
- agli impianti di depurazione vengono convogliate solo le acque che effettivamente sono molto inquinate, aumentando così l'efficienza di funzionamento dei depuratori;
- minori inquinamenti;
- riduzione degli sprechi;
- possibilità di recuperare i nutrienti presenti, attraverso l'irrigazione delle aree verdi o di aree agricole.

Di solito, un impianto idrico domestico convenzionale, preleva acqua potabile dalla rete pubblica. Questa acqua, dotata di caratteristiche di elevata qualità, viene utilizzata indistintamente per scopi potabili (per esempio igiene personale e cottura dei cibi) e per scopi non potabili (un esempio su tutti, è l'utilizzo nelle cassette di risciacquo dei WC) ([www.iredra.eu/it/](http://www.iredra.eu/it/)).

Un impianto idrico progettato per una gestione sostenibile del ciclo delle acque punta invece alla valorizzazione di acque meno nobili e ad utilizzare acqua potabile esclusivamente laddove sono veramente richieste caratteristiche di alta qualità. Un impianto idrico domestico "sostenibile", che possa permettere il riutilizzo dei reflui, sarà quindi caratterizzato da:

- la separazione delle reti di scarico delle acque nere (contenenti cioè gli scarichi dei WC) e delle acque grigie;
- la realizzazione di reti distinte di distribuzione idrica (acqua potabile e acqua non potabile);
- il trattamento e il riutilizzo delle acque grigie depurate per scopi non potabili ([www.iredra.eu/it/](http://www.iredra.eu/it/)).

Per una maggiore efficienza e sostenibilità, dove possibile, risulta ottima la capacità del sistema di integrare il recupero delle acque meteoriche di dilavamento.

In definitiva, la depurazione delle acque grigie non mira a fornire acqua potabile per il consumo umano (Ghunmi et al., 2011), ma possono comunque essere riutilizzate in molte applicazioni:

- nuovamente in ambiente domestico (scarico dei WC, lavaggio delle stanze, ecc.);
- all'esterno (lavaggio strade, pavimentazioni, irrigazione del verde urbano, antincendio);
- oppure reimmesse nel ciclo idrologico naturale, tramite la ricarica delle falde, o l'alimentazione di bacini.

Tuttavia, perché possa avvenire questo, è necessario che le acque di scarico siano sicure dal punto di vista sanitario e che non siano fonte di inquinamento della matrice sulla quale vengono impiegate.

Bisogna comunque ricordare, che in base al tipo di applicazione, le acque depurate devono rispettare degli standard qualitativi diversi.

### 1.3.3 LIMITI DI SCARICO

Per poter scaricare, o impiegare le acque reflue domestiche, queste devono rispettare una serie di parametri, in modo da non costituire una potenziale fonte di inquinamento per l'ambiente.

Questi limiti, stabiliti con il D.Lgs 3 Aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale", sono diversi a seconda che lo scarico si verifichi su un corpo idrico superficiale o al suolo.

| Potenzialità impianto in A.E. (abitanti equivalenti) | 2.000 - 10.000 |                | >10.000        |                |
|------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Parametri (media giornaliera) (1)                    | Concentrazione | % di riduzione | Concentrazione | % di riduzione |
| BOD <sub>5</sub> (senza nitrificazione) mg/L (2)     | ≤ 25           | 70-90 (5)      | ≤ 25           | 80             |
| COD mg/L (3)                                         | ≤ 125          | 75             | ≤ 125          | 75             |
| Solidi Sospesi mg/L (4)                              | ≤ 35 (5)       | 90 (5)         | ≤ 35           | 90             |

*Tabella 7 : Limiti di emissione in corpi idrici superficiali, per gli impianti di acque reflue urbane.*

| Parametri (media annua)       | Potenzialità impianto in A.E. |                |                |                |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                               | 10.000 - 100.000              |                | > 100.000      |                |
|                               | Concentrazione                | % di riduzione | Concentrazione | % di riduzione |
| Fosforo totale (P mg/L) (1)   | ≤ 2                           | 80             | ≤ 1            | 80             |
| Azoto totale (N mg/L) (2) (3) | ≤ 15                          | 70-80          | ≤ 10           | 70-80          |

*Tabella 8 : Limiti di emissione in corpi idrici superficiali, in aree sensibili, per gli impianti di acque reflue urbane.*

| N°    | PARAMETRI                                 | SCARICO IN ACQUE SUPERFICIALI                      |      | SCARICO IN RETE FOGNARIA |      | SCARICO SU SUOLO                   |          |
|-------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|------|--------------------------|------|------------------------------------|----------|
| 1     | pH                                        | 5,5 – 9,5                                          |      | 5,5 – 9,5                |      | 6 – 8                              |          |
| 2     | Temperatura (°C)                          | Variabile in funzione della tipologia del recapito |      |                          |      | /                                  |          |
| 3     | colore                                    | n.p. 1:20                                          |      | n.p. 1:40                |      | /                                  |          |
| 4     | odore                                     | no molestie                                        |      | no molestie              |      | /                                  |          |
| 5     | materiali grossolani                      | assenti                                            |      | assenti                  |      | Assenti                            |          |
| 6     | Solidi sospesi totali                     | 80                                                 | mg/l | 200                      | mg/l | 25                                 | mg/l     |
| 7     | BOD <sub>5</sub> (come O <sub>2</sub> )   | 40                                                 | "    | 250                      | "    | 20                                 | "        |
| 8     | COD (come O <sub>2</sub> )                | 160                                                | "    | 500                      | "    | 100                                | "        |
| 28    | Solfiti (come SO <sub>3</sub> )           | 1                                                  | "    | 2                        | "    | 0,5                                | "        |
| 29    | Solfati (come SO <sub>4</sub> )           | 1000                                               | "    | 1000                     | "    | 500                                | "        |
| 30    | Cloruri                                   | 1200                                               | "    | 1200                     | "    | 200                                | "        |
| 31    | Fluoruri                                  | 6                                                  | "    | 12                       | "    | 1                                  | "        |
| 32    | Fosforo totale (come P)                   | 10                                                 | "    | 10                       | "    | 2                                  | "        |
| 33    | Azoto ammoniacale (come NH <sub>4</sub> ) | 15                                                 | "    | 30                       | "    | (**)                               |          |
| 34    | Azoto nitroso (come N)                    | 0,6                                                | "    | 0,6                      | "    | (**)                               |          |
| 35    | Azoto nitrico (come N)                    | 20                                                 | "    | 30                       | "    | (**)                               |          |
| 36    | Grassi e olii animali / vegetali          | 20                                                 | "    | 40                       | "    | /                                  |          |
| 37    | Idrocarburi totali                        | 5                                                  | "    | 10                       | "    | (*)                                |          |
| 38    | Fenoli                                    | 0,5                                                | "    | 1                        | "    | 0,1                                | "        |
| 39    | Aldeidi                                   | 1                                                  | "    | 2                        | "    | 0,5                                | "        |
| 40    | Solventi organici aromatici               | 0,2                                                | "    | 0,4                      | "    | 0,01                               | "        |
| 41    | Solventi organici azotati                 | 0,1                                                | "    | 0,2                      | "    | 0,01                               | "        |
| 42    | Tensioattivi totali                       | 2                                                  | "    | 4                        | "    | 0,5                                | "        |
| 43    | Pesticidi fosforati                       | 0,10                                               | "    | 0,10                     | "    | (*)                                |          |
| 44    | Pesticidi tot. (esc. fosf.) tra cui:      | 0,05                                               | "    | 0,05                     | "    | (*)                                |          |
| 45-46 | - aldrin; dieldrin (ciascuno)             | 0,01                                               | "    | 0,01                     | "    | (*)                                |          |
| 47-48 | - endrin; isodrin (ciascuno)              | 0,002                                              | "    | 0,002                    | "    | (*)                                |          |
| 49    | Solventi clorurati                        | 1                                                  | "    | 2                        | "    | (*)                                |          |
| 50    | Escherichia coli (UFC/100ml)              | Consigliabile inf. 5000 UFC/100 ml                 |      | /                        |      | Consigliabile inf. 5000 UFC/100 ml |          |
| 51    | Saggio di tossicità acuta                 | o.i. ≤ 50%                                         |      | o.i. ≤ 80%               |      | o.i. ≤ 50%                         |          |
|       |                                           |                                                    |      |                          |      | SAR                                | 10       |
|       |                                           |                                                    |      |                          |      | (**)                               |          |
|       |                                           |                                                    |      |                          |      | Azoto tot.                         | 15 mg/l  |
|       |                                           |                                                    |      |                          |      | Berillio                           | 0,1 mg/l |
|       |                                           |                                                    |      |                          |      | Vanadio                            | 0,1 mg/l |

**Tabella 9: Valori limite di emissione in acque superficiali, fognatura e suolo.**

*Tabella 9: Valori limite di emissione in acque superficiali, fognatura e suolo.*

Come si può notare dalle tabelle 7, 8 e 9, i valori rappresentati si riferiscono a degli impianti con potenzialità depurative di almeno 2000 abitanti equivalenti.

L'abitante equivalente, è un parametro utilizzato per il dimensionamento degli impianti di depurazione e consiste in un volume di reflu, il cui carico organico biodegradabile ha una richiesta biochimica di ossigeno a 5 giorni (BOD<sub>5</sub>) pari a 60 grammi al giorno, corrispondente a circa un volume di 200 litri al giorno, che sono mediamente prodotti da una persona.

Invece, nel caso di piccoli agglomerati o impianti, con potenzialità di scarico inferiori a 2000 a.e., questi limiti possono non essere presi in considerazione.

Il DCR 5 Novembre 2009, n. 107 "Piano di tutela delle acque, Norme tecniche di attuazione" della Regione Veneto, prescrive che gli impianti di potenzialità inferiore alla soglia S (espressa in numero di abitanti equivalenti, variabile in base alla vulnerabilità della zona geografica) sono soggetti esclusivamente al rispetto di un rendimento atto a garantire una percentuale minima di riduzione, rispetto al reflu in ingresso, pari al 50% per i Solidi Sospesi Totali e al 25% per il BOD<sub>5</sub> ed il COD.

Al di sopra della soglia S i limiti allo scarico per le acque reflue urbane sono distinti a seconda della potenzialità dell'impianto e del grado di protezione del territorio, suddiviso nelle zone omogenee. I limiti da rispettare sono stabiliti nell'Allegato A, Tabelle 1 e 2 del DCR 107/2009.

Di seguito vengono mostrati quelli relativi alla Regione Veneto.

| Parametri                            | Unità di misura                                                       | Limiti Colonna A                                                      | Limiti Colonna B                                                      | Limiti Colonna C                                                      | Limiti Colonna D                                                      | Limiti Colonna E                                                      |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| pH                                   | 5,5-9,5                                                               | 5,5-9,5                                                               | 5,5-9,5                                                               | 5,5-9,5                                                               | 5,5-9,5                                                               | 5,0-9,5                                                               |
| Colore                               | 1:40                                                                  | 1:40                                                                  | 1:40                                                                  | 1:20                                                                  | 1:20                                                                  | 1:20                                                                  |
| Odore                                | non deve essere causa di inconvenienti o molestie di qualsiasi genere | non deve essere causa di inconvenienti o molestie di qualsiasi genere | non deve essere causa di inconvenienti o molestie di qualsiasi genere | non deve essere causa di inconvenienti o molestie di qualsiasi genere | non deve essere causa di inconvenienti o molestie di qualsiasi genere | non deve essere causa di inconvenienti o molestie di qualsiasi genere |
| Materiali grossolani                 | Assenti                                                               | Assenti                                                               | Assenti                                                               | Assenti                                                               | Assenti                                                               | Assenti                                                               |
| Solidi sospesi totali                | mg/L                                                                  | 200                                                                   | 150                                                                   | 35                                                                    | 35                                                                    | 35                                                                    |
| BOD <sub>5</sub> (O <sub>2</sub> )   | mg/L                                                                  | <190                                                                  | 80                                                                    | 25                                                                    | 25                                                                    | 25                                                                    |
| COD (O <sub>2</sub> )                | mg/L                                                                  | <380                                                                  | 250                                                                   | 125                                                                   | 125                                                                   | 125                                                                   |
| Fosforo tot. (P)                     | mg/L                                                                  | 20                                                                    | 15                                                                    | 10                                                                    | 5                                                                     | 20                                                                    |
| Azoto ammoniacale (NH <sub>4</sub> ) | mg/L                                                                  | 30                                                                    | 30                                                                    | 15                                                                    | 5                                                                     | 30                                                                    |
| Azoto nitroso (N)                    | mg/L                                                                  | 2                                                                     | 2                                                                     | 0,6                                                                   | 0,2                                                                   | 2 (NO <sub>2</sub> )                                                  |
| Azoto nitrico (N)                    | mg/L                                                                  | -                                                                     | -                                                                     | 20                                                                    | 20                                                                    | 50 (NO <sub>3</sub> )                                                 |
| Azoto tot. inorganico (N)            | mg/L                                                                  | 55                                                                    | 55                                                                    | -                                                                     | -                                                                     | -                                                                     |

*Tabella 10: Limiti di emissione in acque superficiali, relativi ad impianti con potenzialità depurativa inferiore a 2000 a.e., in Veneto.*

Le varie colonne si riferiscono a diverse zone regionali, le quali presentano una più o meno spiccata sensibilità all'inquinamento.

Invece, per il riutilizzo delle acque reflue bisogna rispettare i parametri evidenziati nella tabella 10.

| Parametri               | Unità di misura | Valore limite |
|-------------------------|-----------------|---------------|
| pH                      |                 | 6-9,5         |
| SAR                     |                 | 10            |
| Materiali grossolani    |                 | Assenti       |
| Solidi sospesi totali   | mg/L            | 10            |
| BOD5                    | mg/L            | 20            |
| COD                     | mg/L            | 100           |
| Fosforo tot.            | mg/L            | 2             |
| Azoto tot.              | mg/L            | 15            |
| Azoto ammoniacale       | mg/L            | 2             |
| Conducibilità elettrica | µS/cm           | 3000          |

*Tabella 11: Limiti di emissione per il riutilizzo delle acque reflue.*

In questi casi, la normativa stabilisce di effettuare almeno un "trattamento appropriato".

Il DCR 107/2009, definisce come trattamento appropriato: il trattamento delle acque reflue mediante un processo o un sistema di smaltimento che dopo lo scarico, garantisca la conformità dei corpi idrici recettori ai relativi obiettivi di qualità e sia conforme alle disposizioni del presente Piano.

I trattamenti appropriati devono essere individuati con l'obiettivo di:

- rendere semplice la manutenzione e la gestione;
- essere in grado di sopportare adeguatamente forti variazioni orarie del carico idraulico e organico;
- minimizzare i costi gestionali.

Per ciascuna zona omogenea di protezione in cui è diviso il territorio regionale sono individuate soglie diverse di popolazione (S) al di sotto delle quali è ritenuto appropriato un trattamento primario delle acque reflue urbane. I trattamenti ammessi per popolazione servita inferiore alla soglia S consistono nell'installazione di vasche tipo Imhoff, possibilmente seguite da sistemi di affinamento del refluo, preferibilmente di tipo naturale, quali il lagunaggio e la fitodepurazione, oppure ogni altra tecnologia che garantisca prestazioni equivalenti o superiori.

Per potenzialità superiori o uguali alla soglia S e inferiori a 2.000 a.e., sono considerati appropriati i sistemi nei quali il trattamento primario è integrato da una fase ossidativa, eventualmente integrata da un bacino di fitodepurazione quale finissaggio. E' ammessa ogni altra tecnologia che garantisca prestazioni equivalenti o superiori.

### 1.3.4 UNA POSSIBILE SOLUZIONE: TRATTAMENTI NATURALI

Come abbiamo analizzato nei capitoli precedenti, per permettere lo scarico, o dove possibile, il riutilizzo delle acque reflue, è necessario che questi ultimi siano depurati, cioè deve essere ridotto il loro contenuto di sostanze nocive per l'ambiente.

Proprio come consigliato nel Piano di Tutela delle Acque della Regione Veneto, per la depurazione delle acque reflue domestiche, soprattutto nel caso di piccole comunità, trovano ottimo impiego sistemi di tipo naturale.

Questi metodi, non fanno altro che riprodurre, in piccoli spazi, tutti quei processi che avvengono spontaneamente in natura (Masotti e Verlicchi, 2005).

I principali punti di forza di questi metodi sono:

- relativa semplicità di realizzazione, gestione e manutenzione. Per la realizzazione, non sono necessari interventi di elevata complessità tecnica o che richiedano la partecipazione di personale con specializzazioni particolari. La stessa gestione e manutenzione, consiste in semplici operazioni di routine, come ad esempio il taglio della vegetazione, o la pulizia dei punti di presa e scarico dell'acqua. Inoltre non si ha l'accumulo di un fango di depurazione che necessita di ulteriori operazioni;
- economicità rispetto ai sistemi tradizionali. Grazie al fatto che questi metodi di depurazione, si basano su processi naturali, che avvengono in modo spontaneo, gli input energetici sono ridotti, così come l'utilizzo di apparecchiature elettriche e l'impiego di prodotti.

| Sistema                                       | Superficie<br>(m <sup>2</sup> /a.e.) | Consumi energetici<br>(kWh/a.e./gg) |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Trattamento primario con fossa settica.       | 0,8-1,2                              | 0                                   |
| Trattamento primario con fossa imhoff.        | 0,2-0,6                              | 0                                   |
| Fitodepurazione sub. verticale (secondario)   | 2-3                                  | 0-1,10                              |
| Fitodepurazione sub. verticale (terziario)    | 0,7-1                                | 0-1,10                              |
| Fitodepurazione sub. orizzontale (secondario) | 4-5                                  | 0                                   |
| Fitodepurazione sub. orizzontale (terziario)  | 0,7-1                                | 0                                   |
| Fitodepurazione superficiale (secondario)     | 2-3                                  | 0                                   |
| Fitodepurazione superficiale (terziario)      | 0,5-1                                | 0                                   |
| Filtro percolatore classico                   | 0,22-0,40                            | 0-1,8                               |
| Dischi biologici                              | 0,20-0,35                            | 0,35-0,7                            |
| Filtro biologico aerato                       | 0,15-0,20                            | 55-80                               |
| MBBR                                          | 0,16-0,20                            | 35-70                               |
| Fanghi attivi MBR                             | 0,18-0,25                            | 70-120                              |
| Trattamento chimico                           | 0,13-0,16                            | 1-1,8                               |

*Tabella 12: Superfici necessarie e consumi energetici di alcuni sistemi di depurazione naturale ed artificiale.*



| Tipologia di Costi                                                           | Fanghi attivi | Fitodepurazione  |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|
| <b>1) Costi d'impianto</b>                                                   |               |                  |
| - Acquisto aree                                                              | sì            | sì               |
| - Realizzazione                                                              | sì            | sì               |
| - Avvio impianto                                                             | sì            | sì               |
| <b>2) Costi di gestione ordinaria</b>                                        |               |                  |
| - Manutenzione tecnica e programmata delle componenti edili                  | sì            | No               |
| - Smaltimento dei fanghi di supero                                           | sì            | No               |
| - Manutenzione dell'area verde                                               | sì            | sì               |
| - Analisi di laboratorio dei principali parametri di inquinamento            | sì            | sì               |
| - Manutenzione tecnica e programmata delle componenti elettromeccaniche      | sì            | Minima eventuale |
| - Smaltimento dei fanghi primari                                             | Eventuale     | sì               |
| - Consumo di energia elettrica                                               | sì            | Minima eventuale |
| - Controllo delle erbe infestanti nel processo depurativo                    | No            | sì               |
| - Sfalcio delle macrofite                                                    | No            | sì               |
| <b>3) Costi di gestione straordinaria</b>                                    |               |                  |
| - Rigenerazione del substrato di riempimento alla perdita della funzionalità | No            | sì               |
| - Sostituzione delle componenti elettromeccaniche                            | sì            | Minima eventuale |
| - Pulizia delle componenti soggette ad intasamento                           | sì            | sì               |

Tutto questo permette di mantenere dei costi di esercizio estremamente bassi, a differenza dei sistemi di tipo tradizionale (Cirelli, 2003). Però bisogna considerare che spesso i metodi naturali richiedono maggiori superfici per la loro costruzione (Masotti e Verlicchi 2005).

*Tabella 13: Confronto tra i costi di gestione e manutenzione di un impianto tradizionale a fanghi attivi e un impianto di fitodepurazione.*

|                    | 50 a.e. | 100 a.e. | 250 a.e. | 500 a.e. | 1000 a.e. | 2000 a.e. |
|--------------------|---------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| <b>tipologia</b>   |         |          |          |          |           |           |
| Fanghi attivi      | 76.95   | 43.83    | 26.98    | 16.84    | 13.58     | 11.53     |
| Fitodepurazione HF | 22.31   | 12.24    | 5.76     | 3.32     | 1.98      | 1.21      |
| Fitodepurazione VF | 30.21   | 17.66    | 9.18     | 4.91     | 3.56      | 2.78      |

*Tabella 14: Confronto tra i costi di gestione, per tipo di impianto, espressi in euro/m<sup>2</sup>/anno.*

- efficienza di depurazione. L'efficienza depurativa, ovviamente dipende dalla corretta progettazione, realizzazione e successiva gestione dell'impianto. Oltre a ciò è influenzata dalle condizioni ambientali.  
Tuttavia, è generalmente elevata per la maggior parte degli inquinanti fisici, chimici e microbiologici, favorendo la possibilità di riutilizzo delle acque reflue.
- adattabilità e potenzialità di utilizzo in diversi contesti operativi. I sistemi di depurazione naturale, consentono, di essere applicati in numerose e diverse situazioni operative con un impatto ambientale, sul territorio, praticamente nullo.  
Sono indicati ad essere usati, di solito preceduti da un trattamento primario, sia per il trattamento secondario sia per il trattamento terziario, di affinamento, prima dello scarico su un corpo idrico recettore (Cirelli, 2003), integrandosi con sistemi di tipo tradizionale per il trattamento di acque reflue urbane.  
Per di più, si adattano molto bene alla depurazione degli scarichi domestici di edifici isolati, piccole e medie comunità con popolazione, volumi di reflu e concentrazioni di inquinanti variabili nel tempo, specialmente in Italia, dove la frammentazione degli edifici sul territorio è estremamente alta. Oppure per il trattamento di acque reflue, provenienti da attività produttive, di trasformazione di prodotti alimentari, cantine ed altro (Salvati et al., 2012).  
Altra grande possibilità di impiego, si riscontra nel miglioramento della qualità delle acque meteoriche, di drenaggio agricolo e di liquami zootecnici (Cirelli, 2003).

Per la realizzazione di sistemi di depurazione decentralizzati, in grado di servire piccoli edifici e abitazioni, depurando le acque direttamente dove vengono prodotte, una delle soluzioni principali è rappresentata dall'impiego della fitodepurazione (Zapater e Gross, 2011).

## 1.4 FITODEPURAZIONE

### 1.4.1 DEFINIZIONE

Per fitodepurazione si intende un insieme di processi naturali di trattamento di acque inquinate, basati sullo sfruttamento del sistema suolo-vegetazione, quale filtro naturale per la depurazione dell'acqua (Borin 2003). L'acqua reflua può scorrere liberamente, oppure passare all'interno di un substrato.



*Figura 6: Fitodepurazione.*

### 1.4.2 MECCANISMI DI RIMOZIONE DEGLI INQUINANTI

Per depurare le acque, la fitodepurazione sfrutta processi fisici, chimici e biologici, caratteristici degli ambienti acquatici, che coinvolgono la vegetazione, il substrato e i microorganismi.

In questo modo vengono diminuiti:

- i solidi sospesi;
- la sostanza organica;
- i principali elementi nutritivi (in primis azoto e fosforo);
- i metalli pesanti;
- molti composti organici di sintesi (pesticidi, derivati del petrolio...);
- i microorganismi patogeni.



La parola fitodepurazione, può trarre in inganno, facendo pensare che siano le piante le vere responsabili della depurazione. Questo solo in parte, poiché, in realtà, la loro principale funzione è creare le condizioni idonee per lo sviluppo di tutta una serie di meccanismi, in grado di purificare il refluo in cui i microorganismi assumono un ruolo preponderante (Romagnolli et al. 2002).

Le principali funzioni della vegetazione sono:

- influenza sul microclima (ombreggiamento, riduzione della velocità del vento);
- controllo dell'erosione, stabilizzazione del substrato;
- evapotraspirazione, quindi riduzione del volume del refluo;
- rilascio di ossigeno nell'acqua, attraverso gli apparati radicali, con conseguente ossigenazione del refluo;
- rilascio di essudati radicali che stimolano l'attività dei microorganismi e favoriscono la degradazione dei composti nocivi;
- superficie sul quale possono svilupparsi le comunità microbiche (alghe, batteri, protisti);
- ornamentali;
- ecologiche.

Mentre il contributo delle piante, nella riduzione delle sostanze inquinanti è descritto nella tabella 14.

| PROCESSO                                                 | TIPO      | INQUINANTI RIDOTTI                            |
|----------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|
| Riduzione della velocità del vento, sedimentazione.      | Fisico    | Solidi sospesi                                |
| Riduzione della velocità della corrente, sedimentazione. | Fisico    | Solidi sospesi                                |
| Filtrazione da parte dei tessuti vegetali                | Fisico    | Solidi sospesi                                |
| Assorbimento/Adsorbimento di sostanze                    | Biologico | Nutrienti, Sostanza organica, metalli pesanti |

*Tabella 15: Meccanismi di rimozione degli inquinanti, da parte della vegetazione.*

Bisogna considerare che l'assimilazione degli elementi nutritivi, da parte dell'apparato radicale è relativamente modesto (Masotti e Verlicchi, 2005). Nel caso di azoto e fosforo, le quantità assorbite dalle piante sono rispettivamente pari a 2000Kg/ha/anno di N e 30-150Kg/ha/anno di P (Borin, 2003). Mediamente l'azoto eliminato dalla vegetazione, corrisponde al 10% del totale che viene rimosso da un sistema di fitodepurazione.

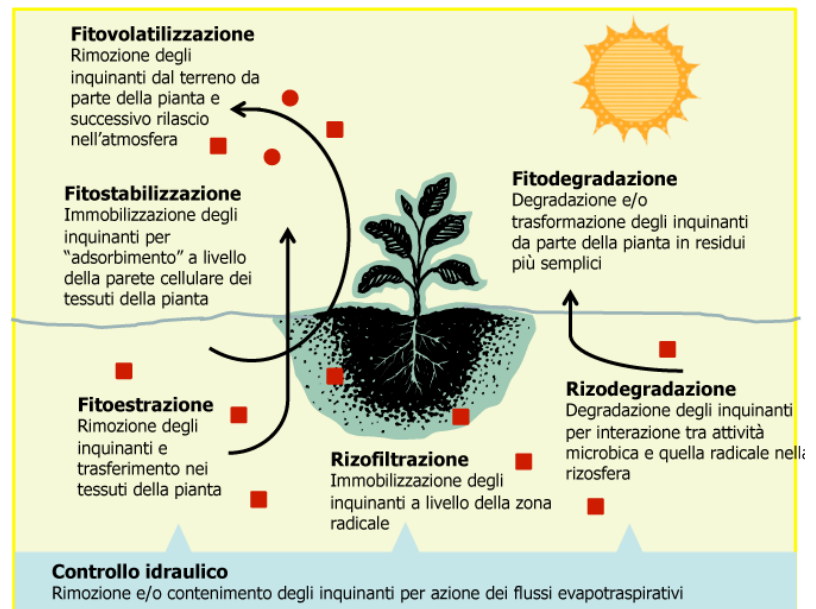


Figura 7: Principali processi con cui le piante contribuiscono alla depurazione delle acque.

| PROCESSO         | AZIONE                                                                   | INQUINANTI RIDOTTI                      |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Fotosintesi      | Favorisce l'ossigenazione del refluo, con l'aumento della nitrificazione | Azoto                                   |
| Respirazione     | Riduce il carico organico                                                | Sostanza organica                       |
| Fermentazione    | In assenza di ossigeno riduce il carico organico                         | Sostanza organica                       |
| Nitrificazione   | In ambiente aerobico il passaggio dall'azoto ammoniacale a nitrato       | Azoto                                   |
| Denitrificazione | Riduzione del nitrato ad azoto atmosferico, che volatilizza              | Azoto                                   |
| Degradazione     | Trasformazione di composti organici                                      | Composti organici di sintesi, pesticidi |
| Competizione     | Predazione, competizione di altri microorganismi                         | Microorganismi patogeni                 |

Le comunità microbiche (alghe, batteri, funghi e protozoi), che si sviluppano sia in ambiente aerobico, che anaerobico, rappresentano il mezzo principale con cui le acque vengono depurate, attraverso processi biologici come di fianco rappresentato nella tabella 16.

Tabella 16: Meccanismi di rimozione degli inquinanti, da parte dei microorganismi.

Il substrato di riempimento, permette la filtrazione e l'adsorbimento fisico-chimico delle particelle solide. Inoltre è fondamentale per l'attecchimento della vegetazione acquatica.

Altri processi importanti che si verificano sono:

- precipitazione chimica e formazione di composti insolubili;
- reazioni chimiche (ossidazione-riduzione).
- degradazione di sostanze e microorganismi ad opera della radiazione ultravioletta;
- dispersione in atmosfera di composti volatili.

### 1.4.3 SCALA DI LAVORO E TIPOLOGIE DI IMPIANTO

Sulla base dell'estensione dell'area di lavoro si parla di :

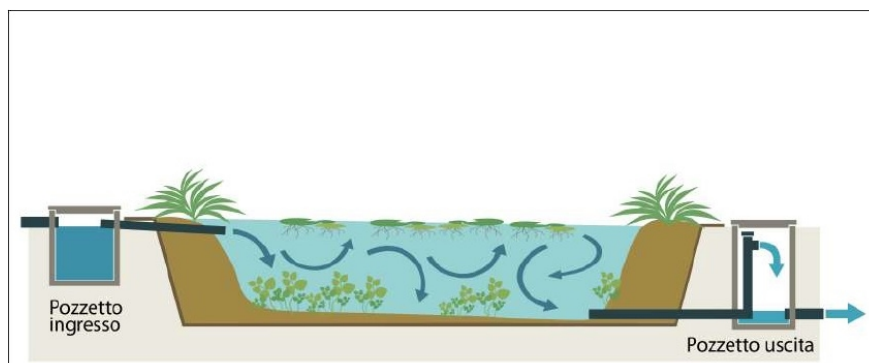
- fitodepurazione estensiva, in vaste superfici di territorio, su cui vengono distribuite le acque reflue da trattare, sfruttando le capacità naturali di depurazione dell'ambiente circostante;
- fitodepurazione diffusa, in siti naturali di dimensioni contenute, ma distribuiti in modo sparso su una certa area;
- fitodepurazione localizzata, con la realizzazione di impianti artificiali, di piccole dimensioni collegati a fonti di inquinamento puntiforme.

L'obiettivo della realizzazione di impianti artificiali, consiste nell'incrementare l'efficienza depurativa, adattando alle caratteristiche dell'acqua reflua da trattare, la scelta e la gestione delle specie vegetali, la scelta del substrato e la gestione del flusso idrico (Borin, 2003).

Questo permette di ridurre notevolmente le superfici impiegate per la realizzazione degli impianti. Un sistema di fitodepurazione è generalmente costituito: da una vasca, contenente un medium di riempimento, permeabile, dove sono insediate piante acquatiche.

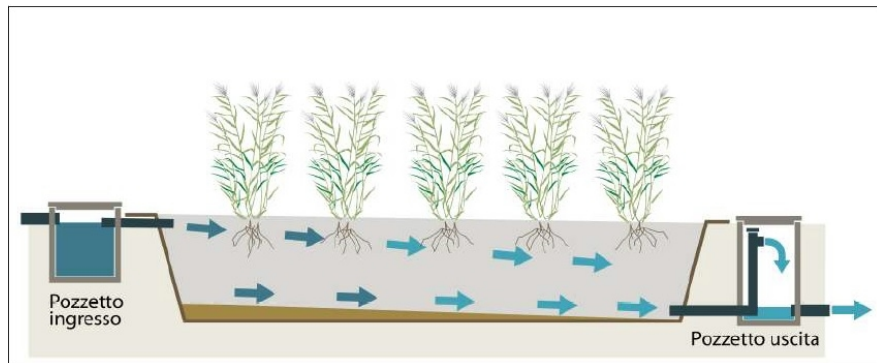
A seconda del modo con cui il refluo viene fatto transitare all'interno del letto vegetato si distinguono:

- Impianti a flusso orizzontale (FWS): simulano le aree umide naturali, dove l'acqua è a diretto contatto con l'atmosfera, mentre il substrato, costantemente sommerso, occupa solo il fondo della vasca e serve da supporto per la vegetazione.



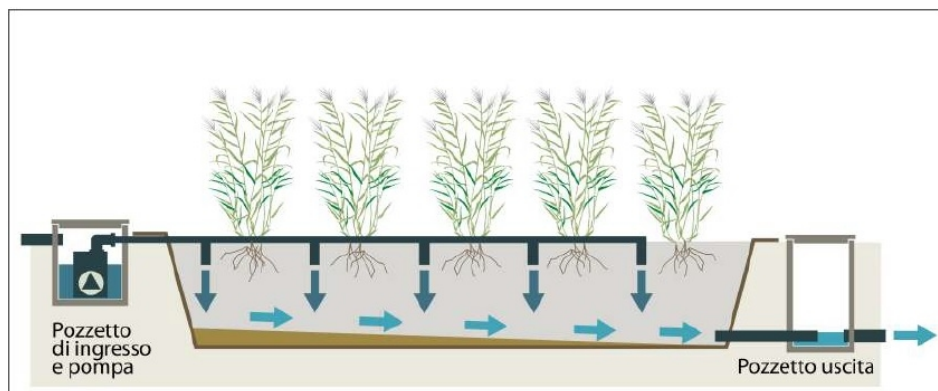
*Figura 8: Schema di un impianto a flusso superficiale.*

- Impianti a flusso subsuperficiale orizzontale (SSHF): dove il refluo scorre in senso orizzontale, in condizioni di saturazione attraverso il substrato, il quale occupa tutto il volume della vasca, partecipando direttamente alla depurazione.



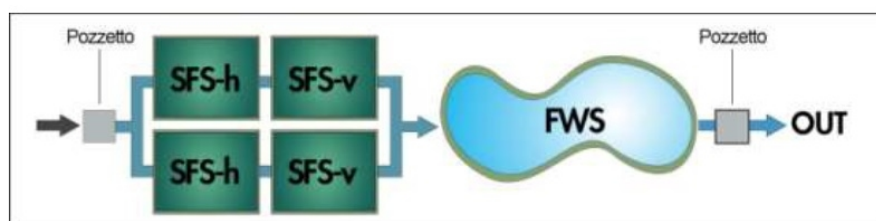
*Figura 9: Schema di un impianto a flusso sottosuperficiale orizzontale.*

- Impianti a flusso subsuperficiale verticale (SSVF): in cui l'acqua viene scaricata dall'alto, in maniera discontinua e percola lungo il substrato. Questo favorisce l'alternarsi di condizioni aerobiche ed anaerobiche.



*Figura 10: Schema di un impianto a flusso sottosuperficiale verticale.*

Le diverse tipologie di sistemi di fitodepurazione possono essere combinate con l'obiettivo di ottimizzare le rese depurative di un particolare tipo di refluo. Questi sistemi combinati prendono il nome di "Sistemi ibridi" (Vymazal, 2009).



*Figura 11: Schema di un impianto ibrido, in serie.*

Ciononostante, la scelta della tipologia di impianto più idonea ed il suo dimensionamento, deve essere valutata sulla base delle caratteristiche del refluo da trattare, dei volumi, degli spazi

disponibili, delle condizioni ambientali, della manutenzione e della destinazione finale dell'acqua, una volta purificata.

#### 1.4.4 RENDIMENTI DEPURATIVI

Per tutti i sistemi, i rendimenti depurativi sono molto elevati nell'abbattimento dei solidi sospesi e della sostanza organica. (Masotti e Verlicchi, 2005).

Invece, le rese sono più variabili per quanto riguarda le altre sostanze.

I sistemi a flusso subsuperficiale orizzontale, garantiscono una buona riduzione dei nutrienti e dei tensioattivi. Inoltre determinano un'elevata mortalità delle popolazioni di microorganismi patogeni.

A differenza dei precedenti, i sistemi a flusso subsuperficiale verticale favoriscono una più elevata ossigenazione del refluo, creando delle condizioni ottimali per il processo di nitrificazione, aumentando quindi la rimozione dei nitrati. Tuttavia, proprio per l'eccessivo mantenimento di condizioni aerobiche, la rimozione dell'azoto totale risulta scarsa.

| Componente                     | Indicatori                      | Sistemi a flusso orizzontale | Sistemi a flusso verticale | Sistemi misti |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|
| Efficienza processo depurativo | Rimozione COD-BOD               | 😊                            | 😊                          | 😊             |
|                                | Rimozione solidi sospesi        | 😊                            | 😊                          | 😊             |
|                                | Rimozione N                     | 😞                            | 😊                          | 😊             |
|                                | Rimozione P                     | 😞                            | 😞                          | 😞             |
|                                | Rimozione tensioattivi          | 😞                            | 😞                          | 😊             |
|                                | Rimozione carica microbica      | 😊                            | 😞                          | 😊             |
|                                | Abbattimento sostanze odorigene | 😊                            | 😞                          | 😊             |

Tabella 17: Prestazioni di diversi sistemi di fitodepurazione.

I sistemi a flusso superficiale, in cui predominano condizioni anaerobiche, sono più indicati per l'affinamento di acque di scarico già parzialmente depurate, o diluite, perché il diretto contatto con l'atmosfera, provoca l'emissione di cattivi odori e la proliferazione di insetti.

Ecco perché, in fase di progettazione, spesso si ricorre a combinare i diversi sistemi, in modo da sfruttare gli aspetti positivi di ciascuna tipologia di impianto.

#### 1.4.5 IMPIANTI ADATTI PER LA FITODEPURAZIONE DI SINGOLI EDIFICI IN AMBIENTE URBANO

Gli elementi base di un sistema di trattamento per piccole utenze sono:

- degrassatore (per le cucine) per la rimozione degli oli e dei grassi;
- trattamento primario di sedimentazione (fossa settica) per eliminare i solidi sedimentabili;
- trattamento secondario (fitodepurazione).

Le soluzioni più interessanti ed ecosostenibili per il trattamento delle acque grigie domestiche sono rappresentate da sistemi di fitodepurazione a flusso sommerso (orizzontale o verticale) (Scheumann et al, 2009).

Meglio ancora risulta l'adozione di sistemi ibridi, dove la combinazione di sistemi a flusso orizzontale (SSHF) e verticale (SSVF) consente infatti di ridurre la superficie occupata intorno ai 2-3 metri quadri per abitante equivalente e di migliorare le rese depurative soprattutto per quanto riguarda l'azoto totale, grazie ai processi di nitrificazione che avvengono nel SSVF e di denitrificazione nell'SSHF ([www.igidra.eu/it/](http://www.igidra.eu/it/)).



Figura 12: Schema di gestione sostenibile delle acque reflue domestiche.

Ulteriore passo in avanti è costituito dalla costruzione di sistemi intensificati, per incrementare ancor di più le performance depurative, attraverso:

- la messa in pratica di strategie di gestione particolari, come il ricircolo delle acque trattate, o alternando condizioni di saturazione e mancanza d'acqua all'interno dei letti vegetati;
- l'aggiunta di additivi chimici per favorire i processi di rimozione, come ossigeno, carbonio oppure sali e sostanze che favoriscono la precipitazione degli inquinanti;
- altrimenti, modificando e controllando le condizioni ambientali che possono influire sul funzionamento dell'impianto. Ad esempio realizzando delle coperture durante il periodo invernale, per mantenere delle temperature di funzionamento ottimali.

In ambiente urbano, tali sistemi, se vegetati con specie acquatiche ornamentali, a differenza delle comuni macrofite che normalmente sono impiegate, si possono inserire gradevolmente nelle pertinenze degli edifici andando a costituire parte integrante dell'arredo a verde.

Numerosi studi mostrano l'assoluta somiglianza nelle performance di disinquinamento delle acque tra specie comuni ed ornamentali in impianti a flusso sottosuperficiale (Vera et al., 2011).

L'utilizzo di questa tipologia di vegetazione, che comunque deve promuovere l'obiettivo principale di depurazione, permette:

- di realizzare accostamenti di più specie, abbinando epoche di fioritura, colori e forme diverse per rendere l'impianto oltre che funzionale anche, allo stesso tempo, esteticamente piacevole durante tutto l'anno. L'utilizzo di un miscuglio di specie, a differenza di una sola, permette di aumentare la superficie occupata dalle radici, favorendo ancora di più lo sviluppo delle comunità di microorganismi, che contribuiscono alla depurazione (Calheiros et al., 2015).

Questo è dovuto alla possibilità di rilasciare maggiori quantità di essudati radicali, enzimi e sostanze, le quali oltre a ciò stimolano l'assorbimento dell'azoto e del fosforo (Wu et al., 2012);

- diminuire la proliferazione di insetti indesiderati e di odori, tramite l'utilizzo di piante aromatiche;



- contribuire a creare degli spazi verdi, di estrema importanza soprattutto in zone turistiche, edifici residenziali, strutture come alberghi e ristoranti.

La scelta delle specie deve tenere conto delle condizioni ambientali presenti, della dinamica dei flussi idrici di carico e scarico, della profondità dell'acqua ed infine delle caratteristiche delle acque da trattare, di solito ricche di nutrienti, composti inquinanti e quindi spesso dotate di elevata salinità.

Nel caso in cui vengano inserite piante differenti, bisogna assicurarsi che non si instaurino competizioni che compromettano la salute delle piante, che possono ripercuotersi sulle prestazioni depurative. Per questo vanno considerate caratteristiche come la vigoria, l'altezza raggiunta, in modo da definire delle distanze di impianto corrette.

Durante gli ultimi anni, si stanno testando alcuni tipi di impianto innovativi, i quali possono essere installati direttamente sulle superfici, ad esempio sui muri o sui tetti, degli edifici dei quali vengono depurate le acque.

I principali scopi di queste strutture, che si sviluppano in altezza, sono la possibilità di ridurre e di ottimizzare al meglio gli spazi usati per la loro realizzazione e allo stesso tempo essere una soluzione efficace per il riutilizzo dei reflui di scarico (Tamiasso et al., 2015).

Lo schema costruttivo dell'impianto, fa sì che il refluo assuma un flusso verticale, capace di sfruttare la gravità. Per di più l'alimentazione di tipo intermittente, consente di alternare periodi in cui i letti vegetati sono saturi di refluo (creando condizioni di anaerobiosi), a periodi in cui le vasche sono parzialmente vuote a seguito del consumo da parte della vegetazione (favorendo condizioni aerobiche).

Ciò garantisce un'elevata efficienza nella capacità di abbattimento della sostanza organica e dell'azoto, nonostante le ridotte superfici dei letti vegetati, le quali sono vincolate dal fatto di non essere installate a terra ma sopra una struttura portante.

Infatti, questo implica anche una accurata scelta della dimensione e del peso dei materiali costruttivi, del substrato di riempimento e della vegetazione, la quale deve essere di piccola taglia, preferibilmente di portamento compatto o ricadente, in quanto deve adattarsi a crescere e vivere in vasche di limitate dimensioni.

Questo tipo di soluzione impiantistica si adatta molto bene ai principi della gestione sostenibile dell'acqua, favorendo la possibilità di creare sistemi di depurazione decentralizzati, che occupano poco spazio, capaci di adattarsi alle singole situazioni ed alle specifiche caratteristiche dei reflui da trattare.

Ciononostante, al giorno d'oggi gli esempi di sistemi verticali "salvaspazio", a livello internazionale, sono ancora pochi, per cui le variabili legate alla gestione, all'efficienza depurativa, ai costi di manutenzione della struttura e della vegetazione, ecc., richiedono ulteriori valutazioni ed approfondimenti, al fine di poter fornire delle linee guida sul loro potenziale e reale utilizzo.

## 1.5 SCOPO DELLA TESI

In precedenza, abbiamo visto l'importanza di provvedere alla depurazione degli scarichi nei pressi della fonte dal quale hanno origine, ma allo stesso tempo, attraverso soluzioni che richiedano poco spazio. Per questo motivo, con questo studio, si è voluto quantificare e valutare le performance depurative, di un piccolo impianto sperimentale, di tipo intensificato, opportunamente vegetato per il trattamento delle acque reflue domestiche, prodotte da un'attività di ristorazione.

L'intento di questo lavoro è cercare di capire oltre al funzionamento del sistema, anche il comportamento della vegetazione, le quantità di sostanze inquinanti effettivamente rimosse, i volumi di refluo che potenzialmente possono essere gestiti e trattati.

Per fare ciò è stato effettuato un monitoraggio continuativo sullo stato della vegetazione e della qualità dei reflui prodotti, nel periodo di tempo compreso tra il 28 marzo 2018 ed il 14 settembre 2018, in modo da valutare la funzionalità e l'efficacia depurativa dell'impianto.

Si ritiene che quest'attività di ricerca, potrà essere utile, oltre che nell'aiutare a progettare e dimensionare questa innovativa tipologia di impianti sulla base delle quantità e delle caratteristiche del refluo trattato, anche nel definire la reale applicabilità di questi sistemi in altri contesti, per un possibile riutilizzo delle acque reflue e quindi una gestione ancora più sostenibile della risorsa idrica. Lo studio si inserisce in un progetto più ampio, di rilevanza nazionale (PRIN), denominato "GREEN4WATER", il cui scopo principale è studiare ed ottimizzare l'uso di infrastrutture verdi nelle aree urbane e rurali per la gestione sostenibile delle risorse idriche e per la tutela dei corpi idrici.



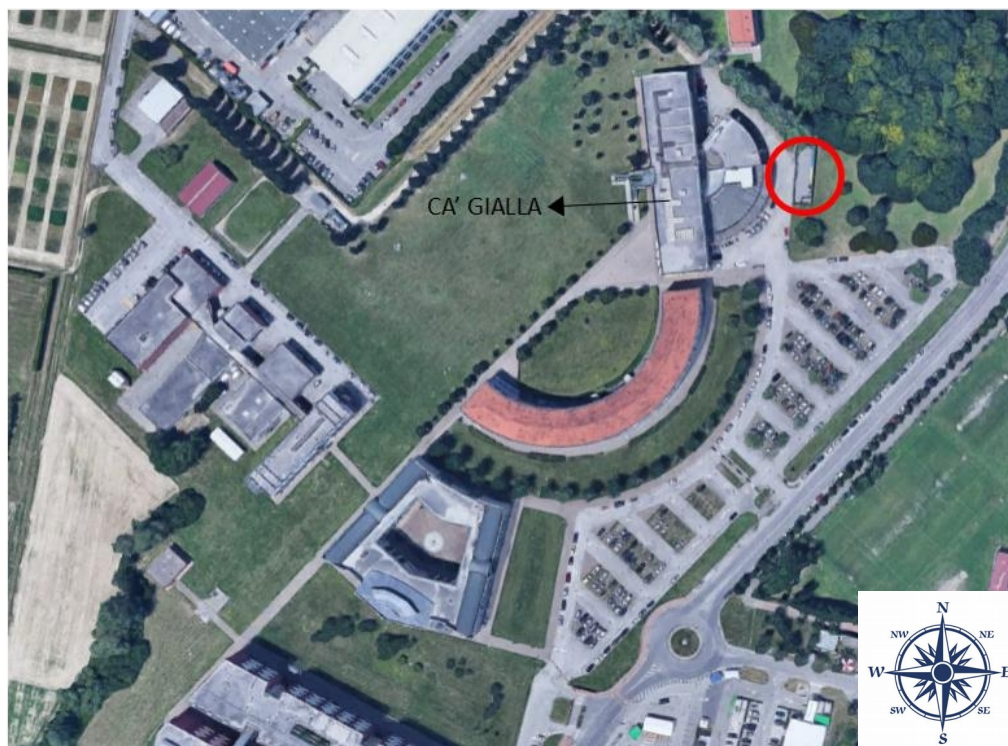
## 2 MATERIALI E METODI

### 2.1 DESCRIZIONE DEL SITO SPERIMENTALE

#### 2.1.1 STRUTTURA DELL'IMPIANTO

L'impianto di fitodepurazione oggetto di studio, è situato nel comune di Legnaro (PD), all'interno della Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria dell'Università di Padova.

La struttura, che si trova nei pressi dell'edificio "Ca Gialla" tratta le acque grigie della mensa del campus universitario di Agripolis, facente parte del servizio di ristorazione ESU Padova.



*Figura 13: Campus di Agripolis. All'interno del cerchio rosso è situato l'impianto sperimentale oggetto della tesi.*

L'impianto sperimentale, realizzato nel 2017, è montato su un'impalcatura metallica, la quale sostiene quattro livelli di tavole di acciaio ad altezze differenti da terra (Figura 14, 15). Per di più, la struttura è predisposta per il montaggio di un eventuale copertura con un telo di nylon, in modo da permettere la realizzazione di una serra durante il periodo invernale.

Sui vari livelli sono state allestite tre linee di fitodepurazione (L1, L2, L3), vegetate con specie diverse e replicate due volte, per un totale di sei linee.

Ciascuna di queste linee è formata da:

- un fusto con capienza di 50 litri sul livello più alto (a 2,13m da terra) per permettere l'alimentazione delle vasche sottostanti;
- tre serie di vasche sui livelli intermedi (definiti "Up", "Med", "Down", rispettivamente a 1,55m, 0,93m, 0,47m dal terreno), nelle quali avviene il processo fitodepurazione;

- una vasca, a terra, denominata “Out”, per la raccolta delle acque in uscita dall’impianto e chiusa sulla sommità, allo scopo di limitare le perdite per evaporazione ed escludere potenziali input esterni dovuti ad eventi meteorologici.



Figura 14: Immagine del sito sperimentale.

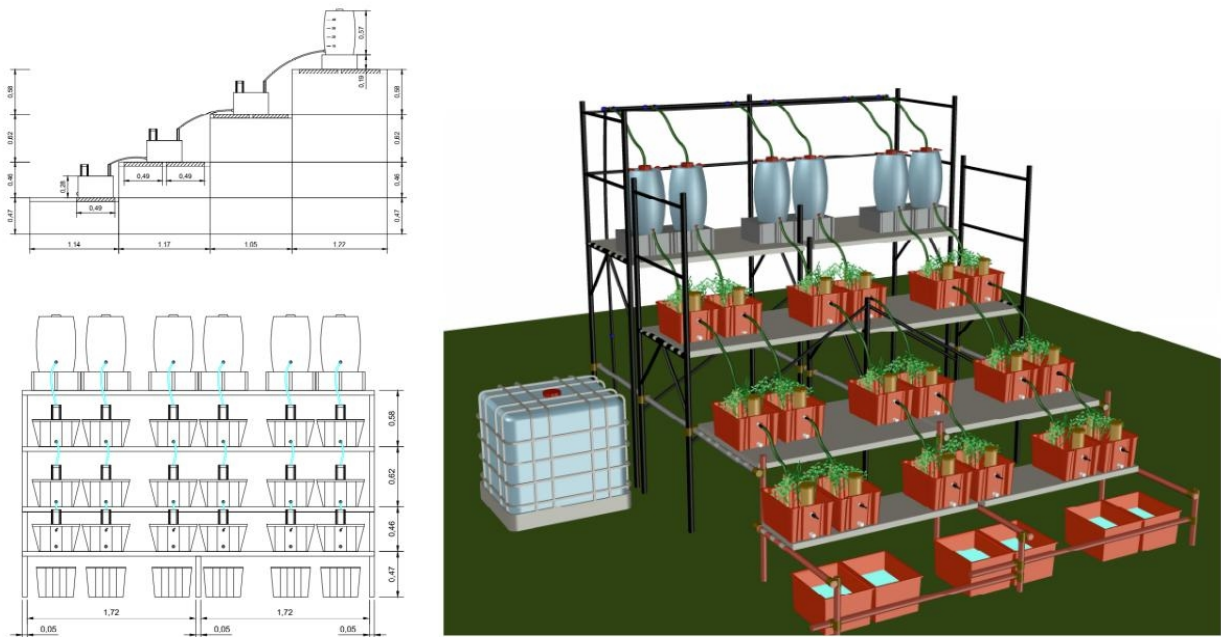


Figura 15: Schema del sito sperimentale.



Le vasche vegetate ed adibite a fitodepurazione, hanno una dimensione di: 0,45m di lunghezza, 0,35m di larghezza e 0,27m di altezza, per una superficie di 0,1575m<sup>2</sup> ed un volume complessivo di 0,043m<sup>3</sup>. Sono riempite da argilla espansa, un materiale a bassa densità adatto a strutture da montare su pareti verticali, con porosità di 0,55m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, la quale va a formare il substrato su cui cresce la vegetazione.

Le quattro vasche ed il fusto di alimentazione, sono collegati tra loro, da una serie di tubi in gomma per permettere lo scarico del refluo al livello successivo, ogni volta che il sistema viene caricato. Ogni vasca presenta, quindi, un punto di ingresso dell'acqua a monte ed un punto di uscita a valle. Il movimento del refluo avviene per gravità.

Il punto di "in", in ogni vasca, è costituito da un piccolo tubo in PVC di diametro di 4cm, aperto alle estremità, dentro al quale arriva il tubo che porta l'acqua dal livello superiore.

Il secondo, realizzato sempre con un tubo in PVC, del diametro di 10cm, è chiuso da un coperchio, mentre rimane aperto sul fondo. Esso funge da pozzetto di ispezione ed inoltre permette l'attraversamento del refluo lungo tutta la superficie della vasca, poiché, in questo modo, per raggiungere l'uscita, questa è costretta a passare dal fondo della stessa. L'apertura dal quale l'acqua viene scaricata al livello sottostante è posizionata ad un'altezza di 18,5cm dal fondo della vasca ed è formata da un rubinetto, protetto da una rete metallica con maglia di due millimetri per evitare possibili intasamenti.

Un secondo rubinetto, chiuso da un tappo, è posizionato a 2,5cm dal fondo della vasca e serve per consentire un eventuale svuotamento del letto vegetato.

L'impianto è dotato inoltre di una cisterna, della capacità di 1000 litri, posta a monte dell'impianto per un primo stoccaggio dei reflui provenienti dalla vasca settica tricamerale di collettamento delle acque reflue della mensa; di un pluviometro per determinare la quantità delle eventuali precipitazioni.

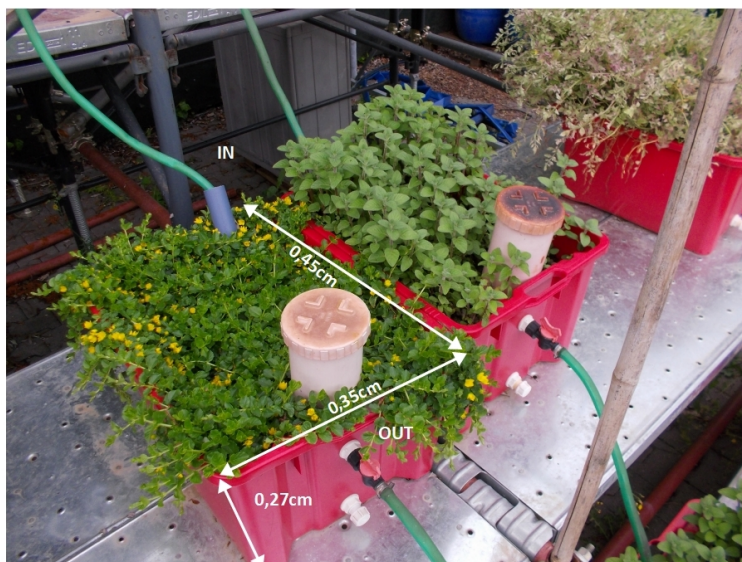


Figura 16: Immagine di una vasca vegetata.

### 2.1.2 VEGETAZIONE

Le sei linee di fitodepurazione sono vegetate ognuna con una singola specie. Le piante impiegate sono:

- *mentha aquatica* L. per Linea 1 e 4;
- *oenanthe javanica* (Blume) DC varietà "Flamingo" sulla Linea 2 e 5
- *lysimachia nummularia* L. in Linea 3 e 6.

Si tratta di tutte specie perenni, ornamentali, acquatiche o che vivono in zone umide, caratterizzate da uno sviluppo sia ipogeo che epigeo contenuto e che si adattano molto bene a vivere negli spazi ristretti, consentiti dalle vasche di questa tipologia di impianto "salvaspazio".

Inizialmente, *lysimachia nummularia* era stata consociata con *lysimachia punctata* L. Ciononostante, *L. nummularia* è la sola sopravvissuta alle condizioni ambientali fornite dalla prova sperimentale. Si è ritenuto, quindi, di non provvedere alla sostituzione di *L. punctata*, ma di proseguire la prova sperimentale con la sola specie maggiormente adattata alle peculiari condizioni instauratesi nel sito pilota.

Di seguito vengono brevemente descritte le tre specie utilizzate:

*Mentha aquatica* L. (Lamiaceae): è una pianta dal forte profumo aromatico, che raggiunge facilmente un'altezza di 90-100cm. Presenta dei fusti ascendenti, arrossati, più o meno pubescenti. Le foglie, opposte sono di forma ovale-lanceolata (Dalla Fior, 1985). I fiori riuniti in capolini all'apice del fusto, sono di colore roseo-violaceo e si formano a partire da Giugno fino ad Ottobre (Borin, 2003). Si trova comunemente in luoghi umidi e paludosi fino a 1200m di altitudine.



Figura 17: *Mentha aquatica*.



*Oenanthe javanica* Blume DC. "Flamingo" (Apiaceae): pianta sempreverde a portamento strisciante, rizomatoso dal sapore che ricorda il finocchio. Produce lunghi rizomi sottili, ramificati e molto radicati dai quali si sviluppano steli eretti fino a 50 cm di altezza ([www.waterplantsitaly.com](http://www.waterplantsitaly.com)). Le foglie, frastagliate sono di colore verde chiaro, variegato di rosa. Forma delle infiorescenze ad ombrello ricche di piccoli fiorellini di colore bianco nei mesi estivi. Gli habitat tipici di questa specie sono le aree umide.

Figura 18: *Oenanthe javanica*.

*Lysimachia nummularia* L. (Primulaceae): specie a portamento prostrato, strisciante e ricadente. I fusti sono quadrangolari, capaci di radicare ai nodi e si sviluppano per un'altezza compresa tra 10 e 50cm (Pignatti S, 1982). Le foglie opposte, sono quasi rotonde, ellittiche lunghe 2-3cm (Dalla Fior, 1985) . Forma fiori singoli all'ascella delle foglie, di colore giallo in primavera inoltrata.  
Vive lungo i fossati, argini, su prati umidi in zone di pianura.



Figura 19: *Lysimachia nummularia*.

### 2.1.3 ALIMENTAZIONE DELL'IMPIANTO

Prima di tutto, il ristorante produce due tipi di acque grigie di diversa origine, divise in due linee distinte (A e B), per un volume totale di circa 90m<sup>3</sup> all'anno. Entrambe subiscono un trattamento primario di sedimentazione, tramite il passaggio all'interno di una fossa settica tricamerale del volume di 15m<sup>3</sup>.

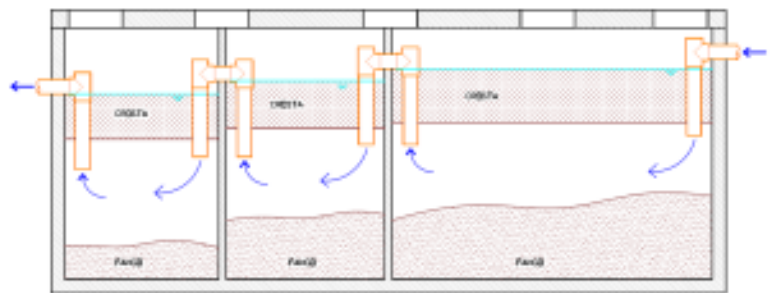
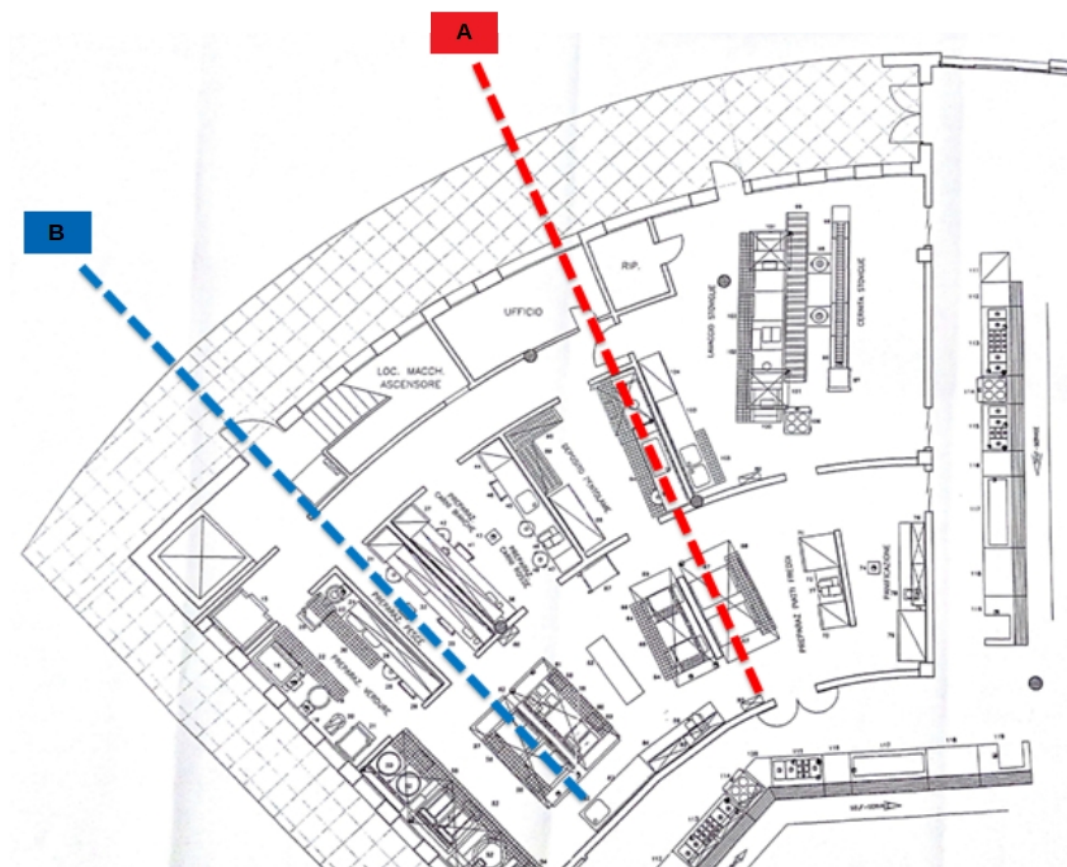


Figura 20: Schema di funzionamento di una vasca settica tricamerale.





*Figura 21: Planimetria della cucina della mensa del campus di Agripolis.*

La prima tipologia di refluò (Linea A) deriva dal lavaggio delle stoviglie, la pulizia della cucina e dei locali, mentre l'altra (Linea B) è prodotta dalla cottura dei cibi e dal lavaggio degli alimenti.

## LINEA A

## Analisi preliminari

pH = 6.64  
EC = 1001 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )  
OD = 0.17 (mg/L)  
T = 28.7 °C  
COD = 1004.5 (mg/L)  
BOD<sub>5</sub> = 880 (mg/L)  
MBAS = 10.24 (mg/L)  
N<sub>TOT</sub> = 69.93 (mg/L)  
P<sub>TOT</sub> = 18.19 (mg/kg)

## LINEA B

## Analisi preliminari

pH = 5,25  
EC = 5280 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )  
OD = 0,13 (mg/L)  
T = 25,75 °C  
COD = 2489,5 (mg/L)  
BOD<sub>5</sub> = >980 (mg/L)  
MBAS = 14,04 (mg/L)  
N<sub>TOT</sub> = 173,73 (mg/L)  
P<sub>TOT</sub> = 22,63(mg/kg)

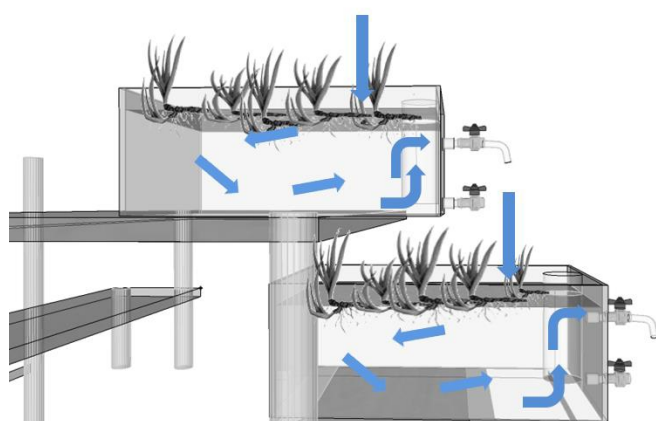
*Tabella 18: Caratteristiche fisico-chimiche delle due linee di acqua reflua prodotta dalla cucina della mensa.*

Dopo l'analisi preliminare delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque reflue della linea A e B (Tabella 18), si è deciso di utilizzare quelle provenienti dalla sola linea A, un quanto meno cariche di nutrienti e sostanza organica, e meno saline. Di conseguenza, risultavano più facilmente gestibili nell'impianto, soprattutto nella sua fase iniziale sperimentale. Interessanti potrebbero essere future sperimentazioni di confronto con le acque provenienti dalla linea B.

La linea A è quella che viene utilizzata per alimentare, con l'aiuto di un'elettropompa a sommersione, la cisterna di stoccaggio, del volume di un metro cubo, del sistema oggetto della ricerca.

Da questo punto, sempre con una pompa, vengono riempiti i fusti da 50 litri posti sulla sommità dell'impianto di fitodepurazione.

Da questo momento in poi, attraverso delle tubature in gomma, il refluo scorre per gravità, in modo intermittente ai livelli inferiori fino ad arrivare all'uscita dell'impianto ed essere scaricato in fognatura.



Il flusso all'interno di ogni vasca segue il principio dei vasi comunicanti, in quanto il refluo in entrata spinge l'acqua già presente, attraverso il substrato, verso l'uscita ed una volta raggiunto il troppo pieno questa esce a cascata al livello successivo (Tamiasso et al., 2015).

In definitiva, il sistema è a flusso verticale, intermittente con alternanza di condizioni in cui i letti vegetati sono saturi d'acqua e momenti in cui sono più o meno vuoti.

*Figura 22: Dinamica del flusso idrico all'interno dei letti vegetati.*

## 2.2 GESTIONE E MONITORAGGIO

L'impianto è stato costruito nel mese di giugno del 2017 e a partire da questa data è rimasto sempre funzionante e continuamente monitorato.

Il lavoro di monitoraggio e raccolta dati, per questa tesi si è protratto per un periodo di tempo che va dal 28 marzo 2018 al 14 settembre 2018, per un totale di 99 giorni di gestione dell'impianto e rilievi in campo.

Durante questo tempo, l'impianto è stato gestito immettendo 20 litri di refluo per ogni linea, per quattro giorni alla settimana (Lunedì, Martedì, Mercoledì e Venerdì), corrispondenti a 42,33mm/giorno.

Allo stesso tempo si è proceduto al rifornimento dei fusti di stoccaggio, quando questi, a seguito dei continui prelievi, risultavano vuoti.

Inoltre, altre periodiche operazioni effettuate per garantire il corretto funzionamento del sistema riguardavano la pulizia delle vasche di raccolta dell'acqua in uscita dalle linee, così come il continuo controllo ad ogni caricamento di acqua, dei punti di input e di output di ciascuna vasca, in modo da ridurre il pericolo di eventuali intasamenti.

Per la valutazione delle prestazioni depurative, sono stati raccolti dati relativi:

- ai volumi in entrata ed in uscita dall'impianto, tenendo conto delle eventuali precipitazioni atmosferiche;
- alle principali proprietà chimico-fisiche dell'acqua reflua, durante i vari stadi di trattamento, grazie ad analisi dirette in campo e ad alla raccolta di campioni, successivamente analizzati in laboratorio;
- alle capacità di adattamento e di depurazione della vegetazione, attraverso il prelievo di campioni e tramite osservazioni qualitative.

### 2.2.1 ANALISI DEI VOLUMI

L'osservazione dei volumi in uscita dall'impianto è stata eseguita ogni volta che sono stati fatti fluire i 20 litri per alimentare l'impianto, attraverso una misurazione manuale con un recipiente graduato, dell'acqua di scarico, raccolta dall'ultima vasca "Out".

Inoltre, se necessario, sono state misurate anche le acque di pioggia raccolte dal pluviometro installato nell'impianto, poi sommate ai volumi in ingresso.

### 2.2.2 ANALISI DEI PARAMETRI CHIMICO-FISICI

La rilevazione dei parametri chimico-fisici è stata eseguita sempre all'interno della stessa fascia oraria per garantire una maggiore rappresentatività dei dati raccolti, ma con frequenze temporali diverse in base alla tipologia di analisi:

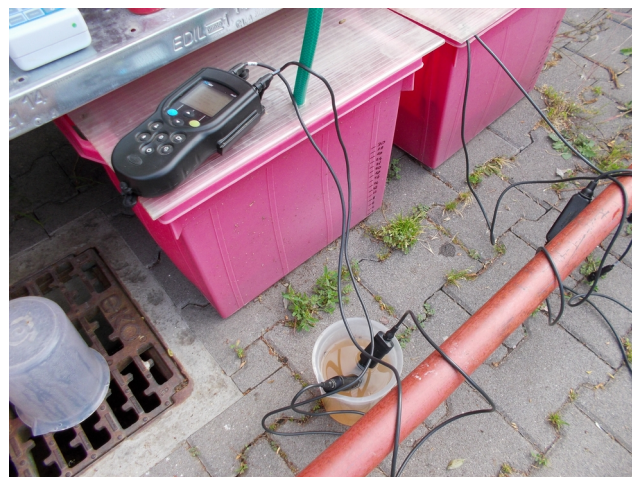
- due volte alla settimana sono stati raccolti i valori di pH, conducibilità elettrica EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), potenziale redox ORP (mV), ossigeno disciolto (% e mg/L) e temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), relativi a ciascuna vasca vegetata e alle vasche di output;
- due volte al mese (una sola nel periodo estivo) i dati di pH, conducibilità elettrica EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), potenziale redox ORP (mV), ossigeno disciolto (% e mg/L) e temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), riguardo alle acque in input;
- due volte al mese (una sola nel periodo estivo) il contenuto di sostanza organica, tramite la misura del BOD<sub>5</sub> (mg/L) e del COD (mg/L); della torbidità (NTU); dei tensioattivi anionici (mg/L); dell'azoto, attraverso la determinazione dell'azoto Kjeldahl (organico e ammoniacale) dei nitrati (mg/L), dell'ammonio (mg/L); dei fosfati (mg/L) e del fosforo totale (mg/L), sia dell'acqua in ingresso, che in uscita dall'impianto.

Le analisi di pH, conducibilità elettrica, potenziale redox, ossigeno disciolto e temperatura sono state effettuate direttamente in campo, tramite l'utilizzo della sonda portatile multiparametrica Hach HQ40D (Hach Lange GmbH, Svizzera), la quale attraverso il collegamento di sonde specifiche intercambiabili, immerse nel refluo, fornisce una lettura istantanea del parametro che si desidera misurare.





*Figura 23: Sonda multiparametrica Hach HQ40D.*



*Figura 24: Misurazione di pH e conducibilità elettrica, con la sonda HQ40D.*



Anche la misura della torbidità è stata svolta sul posto, con il torbidimetro portatile Hach 2100P.

Innanzitutto, per eseguire la rilevazione del valore in maniera corretta è necessario tarare lo strumento, attraverso la lettura di soluzioni a concentrazione nota di solidi sospesi.

*Figura 25: Torbidimetro Hach 2100P*

Una volta effettuata la calibrazione si può procedere al prelievo di un piccolo campione di analisi, il quale va messo all'interno di un contenitore apposito, che una volta pulito, va inserito nello strumento, il quale procede alla misura del dato in Unità Nefelometriche (NTU), cioè determinando la diffusione di un fascio di luce emesso dall'apparecchio. Tanto maggiore è la quantità di luce diffusa, più alto è il contenuto di solidi sospesi.



*Figura 26: Analisi della torbidità.*

Di contro, l'esame dei contenuti delle sostanze presenti nel refluo è stato fatto in laboratorio. Prima di tutto ad ogni analisi, sono stati raccolti dei campioni di refluo:

- di 150ml, da ciascuna linea, per un totale di 900ml miscelando le acque in ingresso, prelevate dopo l'uscita dai fusti di alimentazione;
- di 1 litro per lo scarico di output, per un totale di 6 litri, da ogni linea.

Dopo il prelievo i campioni sono stati immediatamente trasportati in laboratorio, all'interno di un frigo, per mantenerli ad una temperatura idonea alla loro conservazione ed in parte subito analizzati, per determinare il BOD<sub>5</sub>, il COD e i tensioattivi.

La restante parte del campione è stata congelata per effettuare, in un secondo momento, gli esami relativi al contenuto di elementi nutritivi (azoto Kjeldahl, nitrati, ammonio, fosfati, azoto e fosforo totale), presso il laboratorio chimico centralizzato La.Chi del dipartimento DAFNAE dell'Università di Padova.

La misura del BOD<sub>5</sub> (Domanda biochimica di ossigeno a 5 giorni) è stata effettuata secondo il metodo respirometrico OxiTop (Xylem Analytics GmbH, Germania).

Questo sistema sfrutta il fatto che con il processo di respirazione, i microorganismi, consumano l'ossigeno atmosferico, per la degradazione dei composti organici biodegradabili, producendo CO<sub>2</sub>. Quest'ultima viene assorbita da pastiglie di idrossido di sodio, con il quale reagisce per formare carbonato di sodio. In questo modo, la pressione dell'aria, all'interno della bottiglia predisposta per l'analisi diminuisce e la differenza viene misurata tramite un trasduttore di pressione.

Il dato di pressione misurato viene poi convertito, con l'equazione sottostante, nel rispettivo valore in mg/L.

$$BOD = \frac{M(O_2)}{R \cdot T_m} \cdot \left( \frac{V_{tot} - V_l}{V_l} + \alpha \frac{T_m}{T_0} \right) \cdot \Delta p(O_2)$$

|                     |                                                 |
|---------------------|-------------------------------------------------|
| M(O <sub>2</sub> )  | Molecular weight of oxygen (32000mg/mol)        |
| R                   | Gas constant (83.144 L·mbar/mol·K)              |
| T <sub>0</sub>      | Reference temperature (273.15 K)                |
| T <sub>m</sub>      | Measuring temperature (293.15 K)                |
| V <sub>tot</sub>    | Bottle volume (theoretical volume) [mL]         |
| V <sub>l</sub>      | Volume of sample [mL]                           |
| α                   | Bunsen absorption coefficient (0.03103)         |
| Δp(O <sub>2</sub> ) | Difference of the partial oxygen pressure [hPa] |

In particolare, per la determinazione del BOD<sub>5</sub> si procede come segue:

- misurazione di un volume di campione di acqua reflua da trattare, il cui quantitativo varia sulla base della concentrazione di BOD<sub>5</sub> attesa (nel caso specifico: 200ml per l'output e 97ml per l'input) e riempimento in una bottiglia adibita all'analisi;
- inserimento nella bottiglia di una barra magnetica per agitatore;
- aggiunta di una goccia di N-Aliltiourea (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>S) ogni 50ml di campione, che agisce da inibitore del processo di nitrificazione, il quale necessita di ossigeno e quindi può alterare il risultato finale;



Figura 27: Contenitore per la determinazione del BOD<sub>5</sub>.



- inserimento di due pastiglie di idrossido di sodio (NaOH), in un sito apposito, previsto all'interno del collo della bottiglia;
- programmazione alla lettura della differenza di pressione tramite il tappo misuratore OxiTop e posizionamento sopra una piastra agitatrice, in una stufa apposita, in condizioni costanti di 20°C per 5 giorni.



Figura 28: Inserimento dei campioni in stufa.



Figura 29: Tappo OxiTop.

Il tappo registra automaticamente e giornalmente i valori di pressione, mantenendoli in memoria, perciò al termine dei 5 giorni, basta andare a leggere il dato di BOD<sub>5</sub>.

Per la determinazione del COD e dei tensioattivi è stato seguito il sistema Hach Test in cuvetta LCK, che prevede l'utilizzo di particolari provette, le quali contengono i reagenti necessari per eseguire l'analisi del parametro desiderato. Dopo aver svolto il procedimento richiesto, uno spettrofotometro Hach DR2800, è stato utilizzato per la determinazione dell'inquinante monitorato.

Il principio del metodo di analisi del COD (Domanda chimica di ossigeno), utilizzato, si basa sulla reazione di acido solforico e bicromato di potassio, più solfato di argento come catalizzatore. La colorazione gialla (cuvette LCK 314) o verde (cuvette LCK 514) del bicromato di potassio, viene letta fotometricamente dallo spettrofotometro e permette la determinazione del risultato.

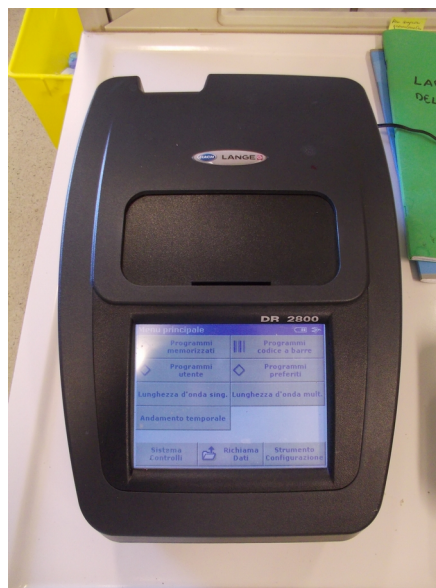


Figura 30: Spettrofotometro Hach DR2800.



In sintesi, la procedura di lavoro consiste in:

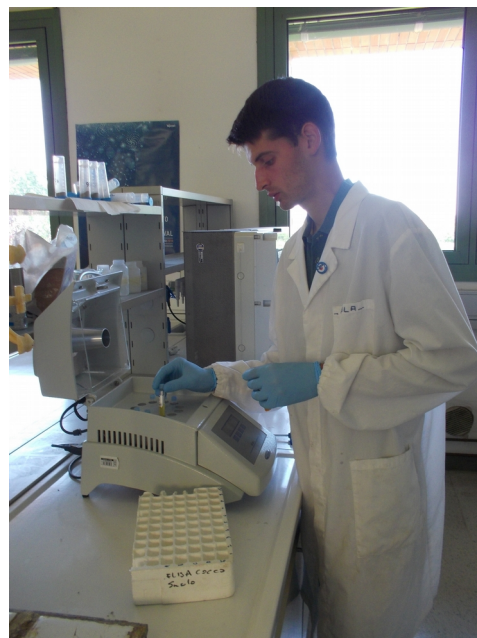
- inserire 2ml di campione nella cuvetta, dopo averla agitata;
- riscaldare in forno (Hach HT200S) per 15 minuti a 170°C con il programma HT;
- lasciare raffreddare, pulire la cuvetta e inserirla nello spettrofotometro per ottenere il risultato espresso in mg/L.

*Figura 31: Stufa Hach HT200S.*

Nel caso specifico sono state utilizzate delle cuvette della serie LCK 514 per concentrazioni comprese tra 100-2000mg/l per le acque di input, mentre per le acque di output, una volta diluite quattro volte (1:4), sono state utilizzate delle cuvette della serie LCK 314 per concentrazioni nell'intervallo 15-150mg/L.



*Figura 32: Particolare della colorazione gialla assunta dal bicromato di potassio durante l'analisi del COD.*



*Figura 33: Caricamento delle cuvette in forno.*

Per quanto riguarda i tensioattivi anionici (MBAS), la misura si fonda sulla reazione tra questi e il blu di metilene, che porta alla formazione di complessi i quali vengono estratti in cloroformio e misurati fotometricamente.

Per la determinazione dei tensioattivi si è proceduto come segue:

- aggiunta di 3,5ml di campione nella cuvetta LCK 332, adatta a quantità di 0,05-2mg/L;
- aggiunta di 0,4ml di soluzione standard A e 0,2ml di soluzione standard B, definite dal protocollo;
- agitazione verticale per 60 secondi, successiva attesa di altri 30 per garantire omogeneità del campione e la dissoluzione di eventuali bolle, d'aria ed infine, lettura allo spettrofotometro.



*Figura 35: Dettaglio della formazione di schiuma all'interno della cuvetta.*



*Figura 34: Lettura della cuvetta allo spettrofotometro per la determinazione dei tensioattivi.*

Gli esami dei contenuti degli elementi nutritivi presenti nel refluo, sono state effettuate dal laboratorio chimico centralizzato La.Chi del dipartimento DAFNAE dell'Università di Padova. Di seguito vengono elencati le procedure di analisi utilizzate:

- la determinazione degli elementi minerali è avvenuta mediante spettrometria di emissione in sorgente di plasma (ICP-OES) e digestione acida con tecnica microonde;
- i cationi e gli anioni presenti nel refluo, sono stati quantificati attraverso cromatografia ionica (Dionex ICS6000; ThermoFisher Scientific).
- per misurare l'azoto Kjeldahl è stata effettuata un'analisi per iniezione di flusso e successiva determinazione attraverso spettrofotometro (FIAstar 5000 Analyzer; Foss Tecator, Hillerød Denmark).



### 2.2.3 ANALISI DELLA VEGETAZIONE

Lo studio della vegetazione consiste nel determinare l'evoluzione dello sviluppo epigeo, in termini di biomassa, tramite l'esecuzione di quattro campionamenti durante il periodo di monitoraggio.

I prelievi di materiale vegetale, eseguiti avendo cura che le piante fossero asciutte, hanno riguardato una piccola porzione all'interno della vasca, tracciando un rettangolo con superficie di  $200\text{cm}^2$  ( $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ). La raccolta è stata fatta per due volte sul lato sinistro e due volte sul lato destro del letto vegetato, in maniera alternata, in modo da consentire il ricaccio delle piante tra un campionamento e l'altro.



*Figura 36: Punto di prelievo della vegetazione per la misura della biomassa.*



*Figura 37: Operazioni di campionamento della vegetazione per determinare la biomassa.*

Successivamente i campioni sono stati pesati per determinare il peso fresco della biomassa vegetale.

Presso l'Azienda Agraria Sperimentale "Lucio Toniolo", dell'Università di Padova, i campioni sono stati successivamente seccati in stufa a  $65^{\circ}\text{C}$  per 3 giorni e nuovamente pesati.



Infine la biomassa vegetale è stata macinata con un mulino ultracentrifugo da laboratorio Retsch ZM200, allo scopo di eseguire eventuali ulteriori analisi.



*Figura 38: Mulino Retsch ZM200.*



*Figura 39: Operazione di macinazione dei campioni secchi di vegetazione.*



*Figura 40: Particolare dell'interno del mulino.*

Oltre alla biomassa sono state fatte anche delle valutazioni qualitative sulla crescita, sulla capacità di adattamento, sullo stato di salute e sull'epoca di fioritura delle varie specie.

#### 2.2.4 ELABORAZIONE DEI DATI

I dati del monitoraggio hanno permesso di quantificare la performance depurativa dell'impianto di fitodepurazione.

In primo luogo, i dati volumetrici di ingresso ed uscita dall'impianto, hanno consentito di calcolare un bilancio idrico. In questo caso l'evapotraspirazione (ET) è data dalla somma algebrica dei volumi di refluo in input (+IN), dei volumi di pioggia (+P) e dei volumi in output (-OUT), secondo la seguente equazione:

$$ET = IN + P - OUT$$

Una volta riempite, le vasche vegetate adibite a fitodepurazione, dotate di troppo pieno, mantenevano una totale saturazione. Di conseguenza, la variazione del volume mantenuto

all'interno delle vasche era minima così da non inficiare in modo significativo sulla stima del bilancio idrico.

In secondo luogo, è stata analizzata la dinamica temporale dei parametri chimico-fisici del refluo trattato, sui diversi livelli e linee del sistema di fitodepurazione, confrontando i dati raccolti in campo.

In seguito, la quantificazione delle concentrazioni inquinanti in ingresso e in uscita, hanno permesso di determinare la performance di depurazione come segue:

$$\%P_C = \frac{(C_{In} - C_{Out})}{(C_{In})} \times 100$$

dove  $\%P_C$  rappresenta la performance depurativa secondo le concentrazioni di inquinante nel refluo in ingresso ( $C_{In}$ ) e in uscita ( $C_{Out}$ ), e:

$$\%P_Q = \frac{(V_{In} \cdot C_{In} - V_{Out} \cdot C_{Out})}{(V_{In} \cdot C_{In})} \times 100$$

dove  $\%P_Q$  rappresenta la performance depurativa secondo le quantità di inquinante ( $g/m^2$ ) nel refluo in ingresso ( $V_{In} \times C_{In}$ ) e in uscita ( $V_{Out} \times C_{Out}$ ).

Estendendo i risultati delle nove analisi di laboratorio relative alle concentrazioni di inquinanti (mg/L), a tutte le date del periodo di monitoraggio, moltiplicando poi questi ultimi, per i volumi di refluo in entrata e uscita dall'impianto (L) ed infine mediando i valori delle due repliche, è stato possibile realizzare un bilancio di massa delle quantità (g) che effettivamente sono state rimosse dal sistema di fitodepurazione.

Alla fine, riguardo la vegetazione, i dati ottenuti, hanno consentito di descrivere una dinamica di accrescimento delle piante nei vari livelli, influenzato dalle diverse caratteristiche dell'acqua reflua.

#### 2.2.5 ANALISI STATISTICHE

Le concentrazioni dei parametri delle acque reflue in ingresso e in uscita (dalle linee vegetate con menta, oenante e *lysimachia*) sono stati confrontati statisticamente secondo il test non parametrico di Kruskal-Wallis a un livello di significatività  $p < 0.05$ . Inoltre, è stata condotta un'analisi della varianza a misure ripetute, a un livello di significatività  $P < 0.05$ , per la biomassa fresca e secca al fine di confrontare la dinamica di crescita delle tre specie vegetali testate.

### 3 RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1 BILANCIO IDRICO

Durante l'intero periodo di monitoraggio, l'impianto di fitodepurazione, è stato alimentato con una quantità d'acqua reflua pari a 4177,14mm (1973,70L), immessa in ogni linea, corrispondenti a 20,00 L/giorno.

Gli apporti idrici, dovuti alle precipitazioni, ammontano a 399,66mm (188,84L) per ciascuna serie di vasche.

I volumi in uscita si differenziano a seconda della specie vegetale considerata. *Mentha* presenta il tasso medio di evapotraspirazione più elevato, perché i 2026,37mm (957,46L) raccolti in uscita dall'impianto, determinano un consumo dell'acqua in entrata del 55,7%, corrispondente a 2550,43mm (1205,08L) di reflu evapotraspirato. In molte occasioni (20 giorni su 99 giorni) lo scarico in uscita dalle linee vegetate con questa specie è stato assente.

La quantità media di reflu in output di *oenanthe* è di 3157,60mm (1491,97L), con un evapotraspirazione di 1419,21mm (670,58L) ed una percentuale di riduzione del 31,0%. Solamente in un giorno, non è stato registrato nessuno scarico.

Infine, *lysimachia* ha evapotraspirato 747,91mm (353,39L), riducendo il volume in input del 16,3%, con uno scarico di 3828,90mm (1809,16L). Durante il periodo di monitoraggio, a differenza di *mentha* e *oenanthe*, si è sempre rilevata la presenza di reflu in uscita con *lysimachia*.

|                   | Input (mm) | Pioggia (mm) | Output (mm)      | Evapotraspirazione (mm) | Riduzione (%) |
|-------------------|------------|--------------|------------------|-------------------------|---------------|
| <u>Mentha</u>     | 4177,14    | 399,66       | 2026,37 ± 18,56  | 2550,43 ± 18,56         | 55,7          |
| <u>Oenanthe</u>   | 4177,14    | 399,66       | 3157,60 ± 15,44  | 1419,21 ± 15,44         | 31,0          |
| <u>Lysimachia</u> | 4177,14    | 399,66       | 3828,90 ± 208,65 | 747,91 ± 208,65         | 16,3          |

Tabella 19: Bilancio idrico.

La maggiore evapotraspirazione rilevata dalle vasche vegetate con *mentha*, può essere dovuta, probabilmente, alla maggiore capacità di adattamento di questa specie all'ambiente nel quale sono state messe a dimora le piante, le quali hanno mantenuto nel corso dell'intera stagione vegetativa, delle buone condizioni di salute, oltre che un buon sviluppo della vegetazione.

L'errore standard elevato, riscontrato dall'elaborazione dei dati relativi a *lysimachia*, la quale manifesta una bassa capacità evapotraspirativa, è principalmente dovuto alla morte di due piante nelle vasche al livello "Up" e "Med" della linea 3. Questo fatto ha influito sulla quantità d'acqua in uscita da quella linea.

Per ultimo, *oenanthe* ha presentato dei valori intermedi rispetto alle altre specie vegetali, riducendo di quasi un terzo il volume delle acque di scarico in ingresso.

## 3.2 PARAMETRI CHIMICO-FISICI

Di seguito vengono riportati i risultati relativi alla dinamica temporale dei principali parametri chimico fisici analizzati.

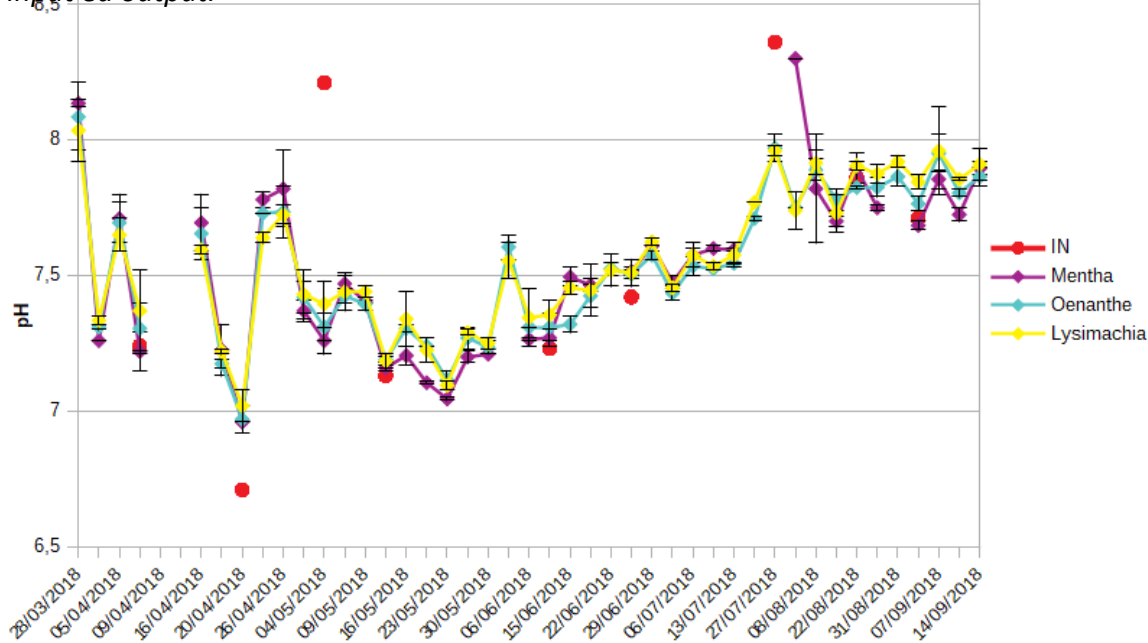
### 3.2.1 pH

Nel complesso, il pH misurato all'interno delle vasche si mantiene generalmente su dei valori al di sopra della neutralità, determinando così il prevalere di un ambiente alcalino in tutti e tre i livelli. Durante il monitoraggio è stato notato che in concomitanza, o a seguito di eventi piovosi si assiste ad una riduzione del pH. Di contro questo aumenta con temperature più elevate. Probabilmente, questo si verifica perché le precipitazioni contribuiscono a diluire il refluo, riducendo la concentrazione di sali in esso disciolti, viceversa, le alte temperature determinano una maggiore concentrazione dell'acqua e quindi dei sali presenti al suo interno.

Il valore mediano, riscontrato nelle acque in ingresso è di 7,57, con un minimo di 6,71 ed un massimo di 8,36. Dati simili si ritrovano anche nelle acque di output, infatti questi sono compresi tra 6,92 e 8,30, con una mediana di 7,53.

Nel grafico della figura 41, viene evidenziata una forte discontinuità dei dati di "IN", anche se nella maggior parte dei casi sono più bassi rispetto alle tre linee di "Out".

*Figura 41: Dinamica temporale del pH, delle tre specie vegetali, per le acque di input ed output.*



Questo è confermato anche nei livelli intermedi, dove si verifica un incremento del pH dal livello "Up" al livello "Down", che richiama l'andamento visto in precedenza tra "IN" ed "Out". Anche in questo caso, questa tendenza è correlata all'aumento della presenza di sali disciolti nei livelli inferiori ed in uscita dal sistema di fitodepurazione.

Per lo stesso motivo, valutando la differenza del pH, all'interno dei letti vegetati, tra le tre specie vegetali, nei tre livelli dell'impianto, si nota che mediamente *mentha* ha i valori più alti, grazie alla sua maggior capacità evapotraspirativa. Solo nel livello "Down" *lysimachia* mostra un pH più elevato, in particolare in primavera e a fine estate.

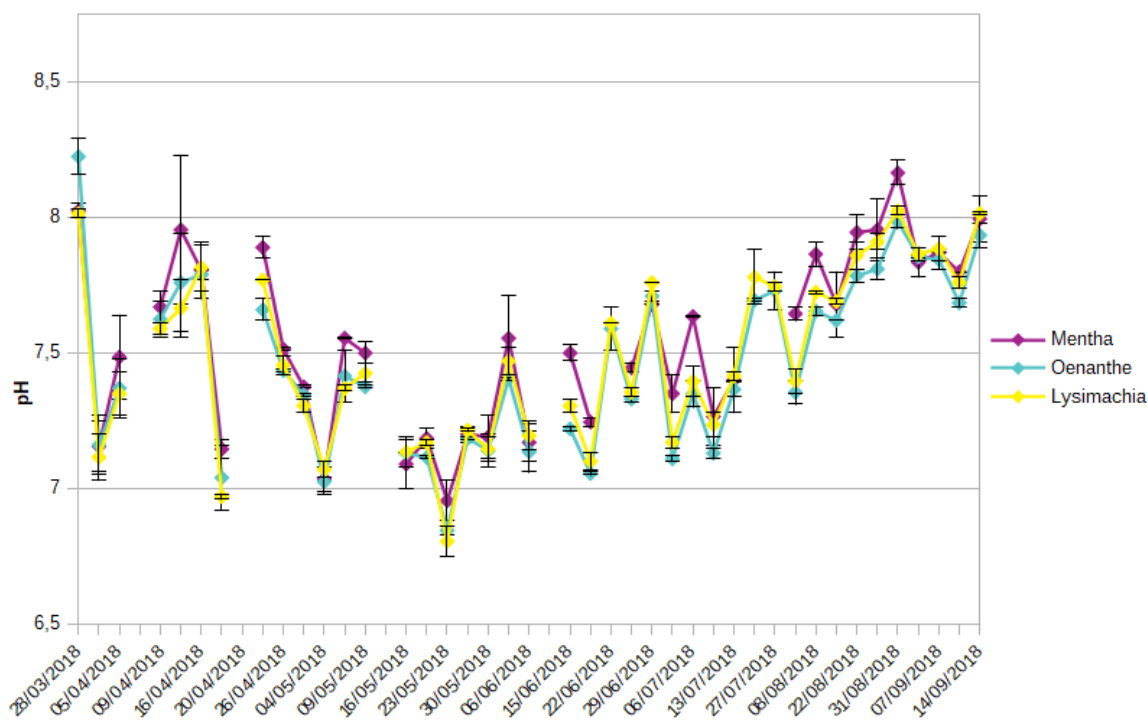


Figura 42: Dinamica temporale del pH, delle tre specie vegetali, per il livello "Up".

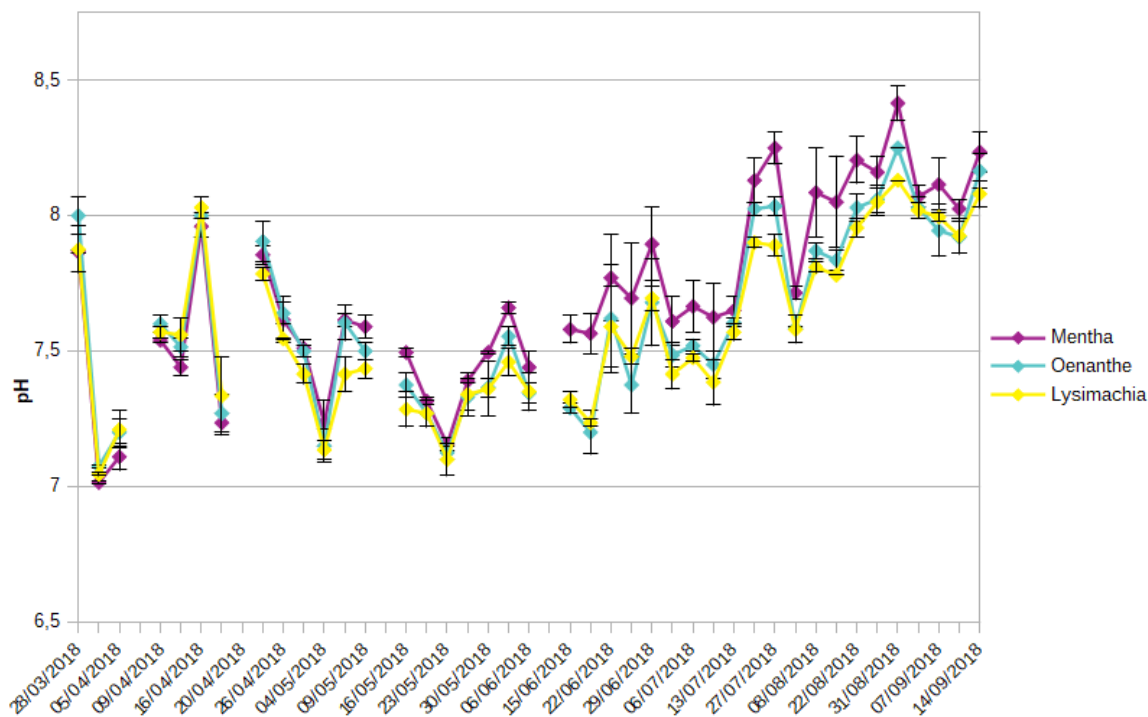


Figura 43: Dinamica temporale del pH, delle tre specie vegetali, per il livello "Med".



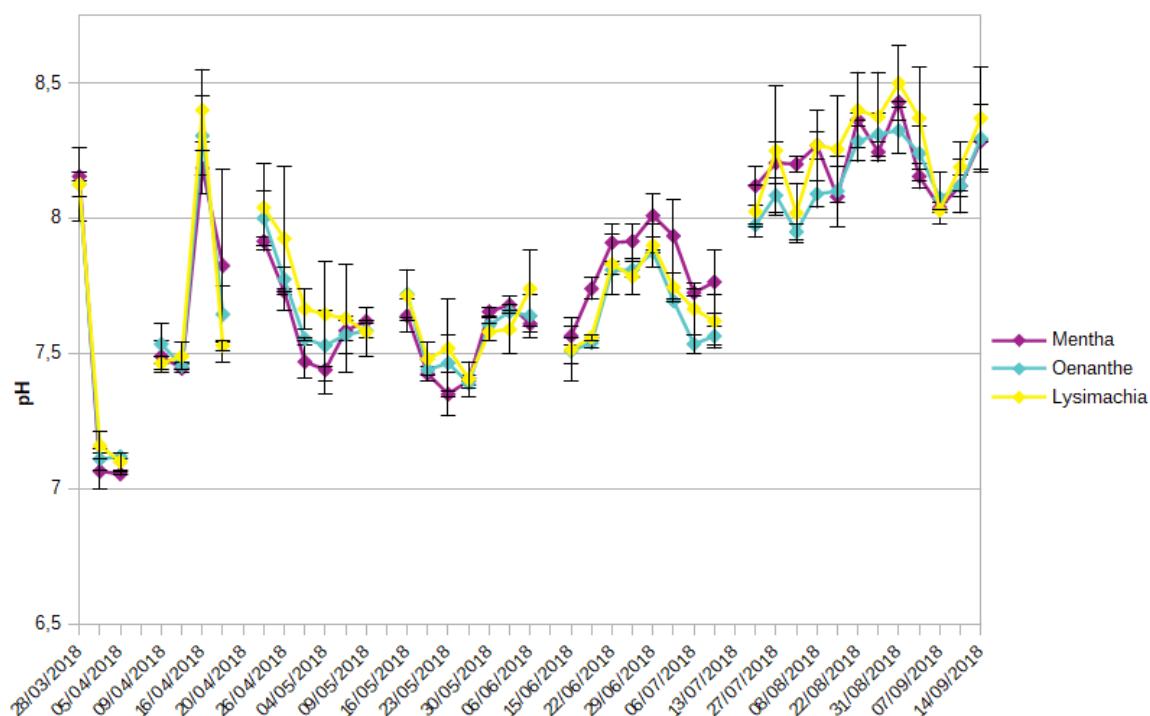


Figura 44: Dinamica temporale del pH, delle tre specie vegetali, per il livello "Down".

### 3.2.2 CONDUCIBILITA' ELETTRICA

Le acque di scarico in entrata, sono caratterizzate da valori di conducibilità elettrica (EC) compresi tra un minimo di 860,00 $\mu$ S/cm ed un massimo di 1252,00 $\mu$ S/cm, con una mediana di 919,00 $\mu$ S/cm. Di contro, come raffigurato nella figura 45, nelle vasche di "Out" delle tre specie vegetali, sono stati misurati dei dati più elevati, il cui valore mediano si attesta sui 1197,50 $\mu$ S/cm. Il valore più basso registrato è 798,00 $\mu$ S/cm, mentre il più alto è di 2350,00 $\mu$ S/cm.

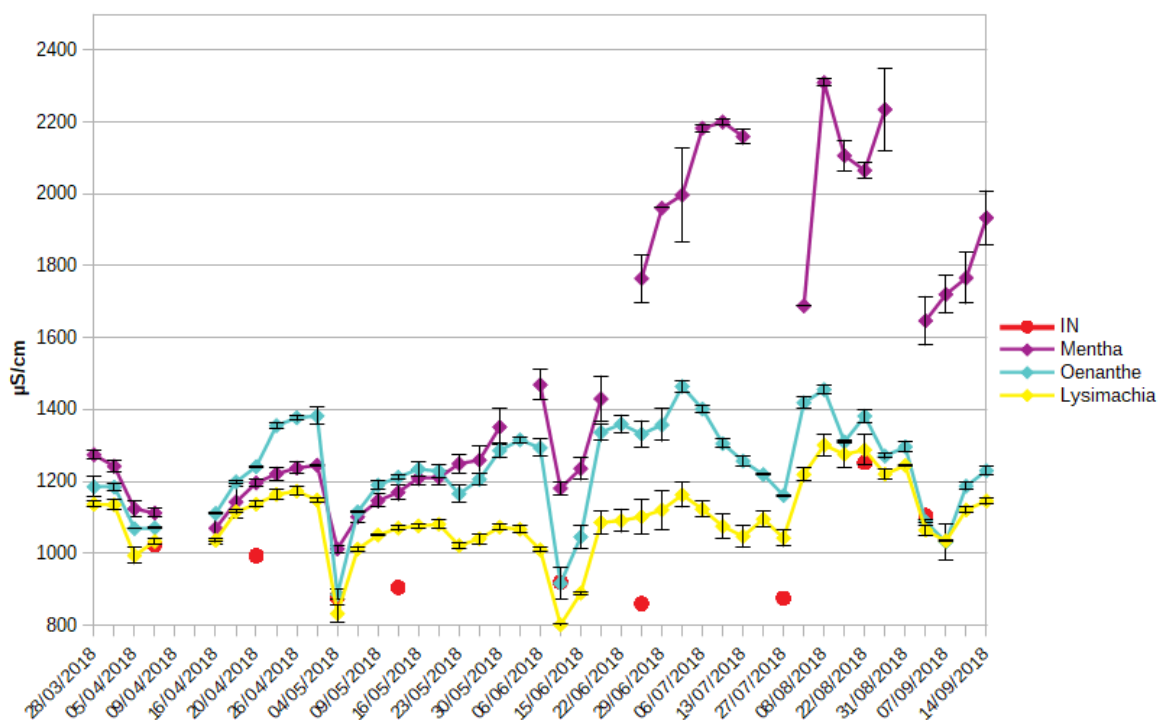


Figura 45: Dinamica temporale della EC, delle tre specie vegetali, per le acque di input ed output.

All'interno delle vasche di fitodepurazione, la conducibilità elettrica aumenta dal livello più alto (mediana di tutte le specie: 1117,50µS/cm) a quello più basso (mediana di tutte le specie: 1194,00µS/cm). Questo, insieme a quanto visto in precedenza per il pH, ci permette di osservare che la salinità delle acque in ingresso aumenta man mano che l'acqua passa da un livello al successivo, a seguito del prolungarsi del tempo di ritenzione del refluo nella vasca il quale, soggetto all'azione evapotraspirante del sistema, concentra i sali disciolti. Non è da escludersi, inoltre, la possibile formazione di sali derivanti dalla degradazione dei composti organici, frutto del verificarsi, in maniera alternata di processi ossidativi e riduttivi, tipici del flusso intermittente a cascata.

Anche in questo caso, le precipitazioni atmosferiche causano un abbassamento della conducibilità elettrica, dovuta principalmente al fatto che le acque reflue subiscono una diluizione.

Infine, i valori più elevati sono stati misurati nelle vasche in cui è insediata *mentha*, sempre grazie alla sua elevata capacità di ridurre i volumi di acqua per evapotraspirazione, soprattutto durante il periodo estivo. Simili tra loro, risultano invece i dati relativi alle altre due specie.

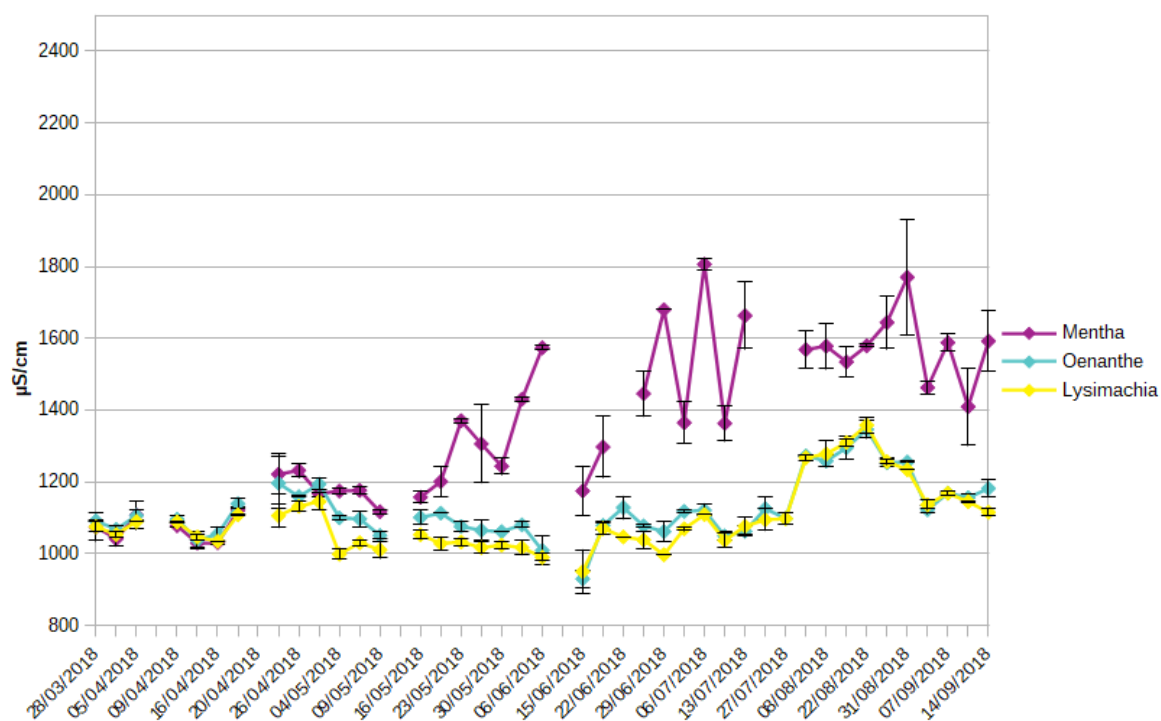


Figura 46: Dinamica temporale della EC, delle tre specie vegetali, per il livello "Up".

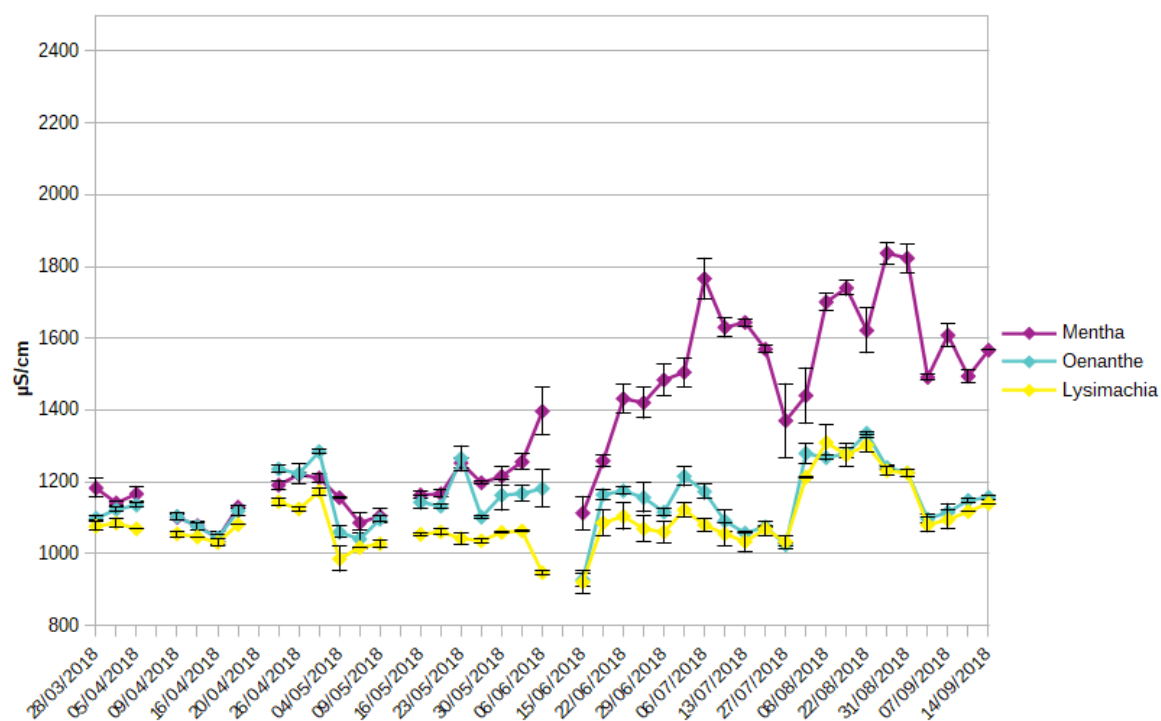


Figura 47: Dinamica temporale della EC, delle tre specie vegetali, per il livello "Med".

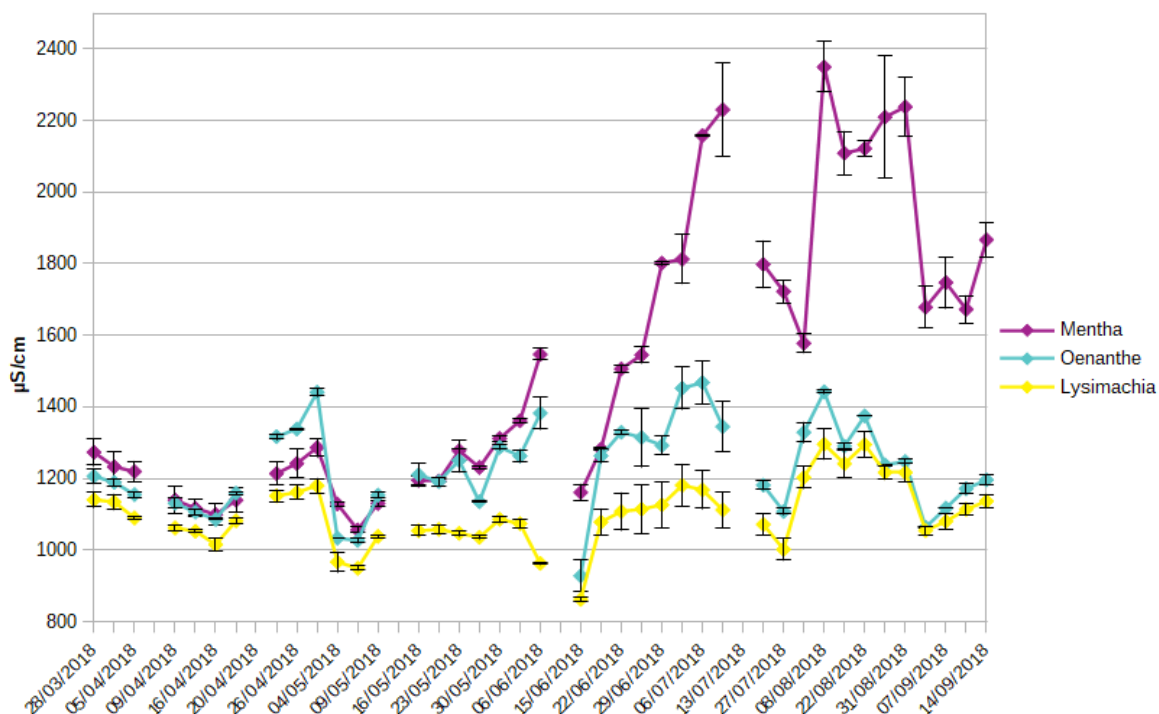


Figura 48: Dinamica temporale della EC, delle tre specie vegetali, per il livello “Down”.

### 3.2.3 OSSIGENO DISCIOLTO

Altro parametro preso in considerazione nel monitoraggio è l’ossigeno disciolto. Esso, come descritto nei grafici sottostanti, presenta un andamento molto altalenante nel tempo e facilmente influenzabile dalle condizioni climatiche, dal movimento dell’acqua reflua, oltre che dal modo in cui viene misurato.

Tuttavia, seppur con una discreta variabilità, si assiste ad un generale aumento del contenuto di ossigeno delle acque in uscita dall’impianto, rispetto a quelle in entrata. Infatti, il valore mediano del refluo in ingresso è di 0,52mg/L, mentre il refluo di uscita si distingue per un più alto contenuto di ossigeno, poiché il valore mediano è di 1,955mg/L, con un incremento sempre maggiore, man mano che l’acqua cade dal livello “Up” (mediana: 0,07mg/L) ai livelli sottostanti “Med” (mediana: 0,09mg/L) e “Down” (mediana: 0,27mg/L).

Tutto ciò è probabilmente dovuto alla capacità di questo tipo di impianto di favorire l’ossigenazione del refluo, tramite la creazione di un flusso a cascata e l’apporto dell’ossigeno per opera degli apparati radicali. Si può inoltre ipotizzare che una forte riduzione dei composti organici avvenga per opera del filtro fisico offerto dal medium presente nel primo e secondo livello a cascata, comportando una minore richiesta e un minor consumo di ossigeno nello step successivo.

Bisogna comunque sottolineare che la rilevazione dell’ossigeno all’uscita dall’impianto è stata eseguita a seguito dell’alimentazione dello stesso, quindi con acqua appena scaricata, a differenza dei livelli intermedi dove la misura è stata effettuata prima del caricamento del sistema, con acqua ferma, dimostrando ancora una volta la reale capacità di ossigenazione del refluo da parte di questo sistema intensificato.

Nel refluo in uscita dall’impianto, *oenanthe* è la specie che garantisce la maggiore ossigenazione, seguita da *lysimachia* e poi *mentha*.

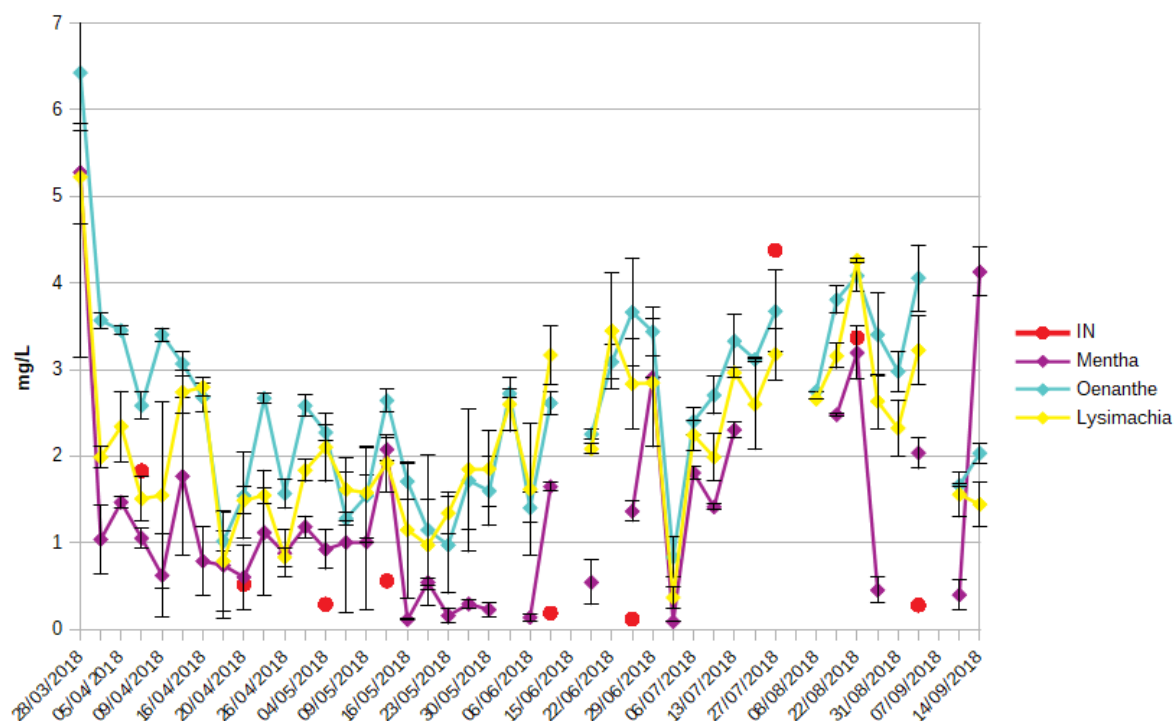


Figura 49: Dinamica temporale dell'O<sub>2</sub>, delle tre specie vegetali, per le acque di input ed output.

Sui livelli intermedi, la vegetazione non sembra incidere in particolar modo sui livelli di ossigeno disciolto. Però, durante il periodo estivo, a differenza di quanto visto prima, nelle vasche vegetate con *mentha*, è stato riscontrato un aumento dei valori rilevati, in particolare nei livelli “Up” e “Med”. Questo aspetto si può ricondurre alla maggiore resistenza di questa specie nei confronti delle alte temperature, grazie alla quale le piante mantengono una costante attività vegetativa anche nei periodi più caldi, favorendo l'ossigenazione del refluo nelle vasche.



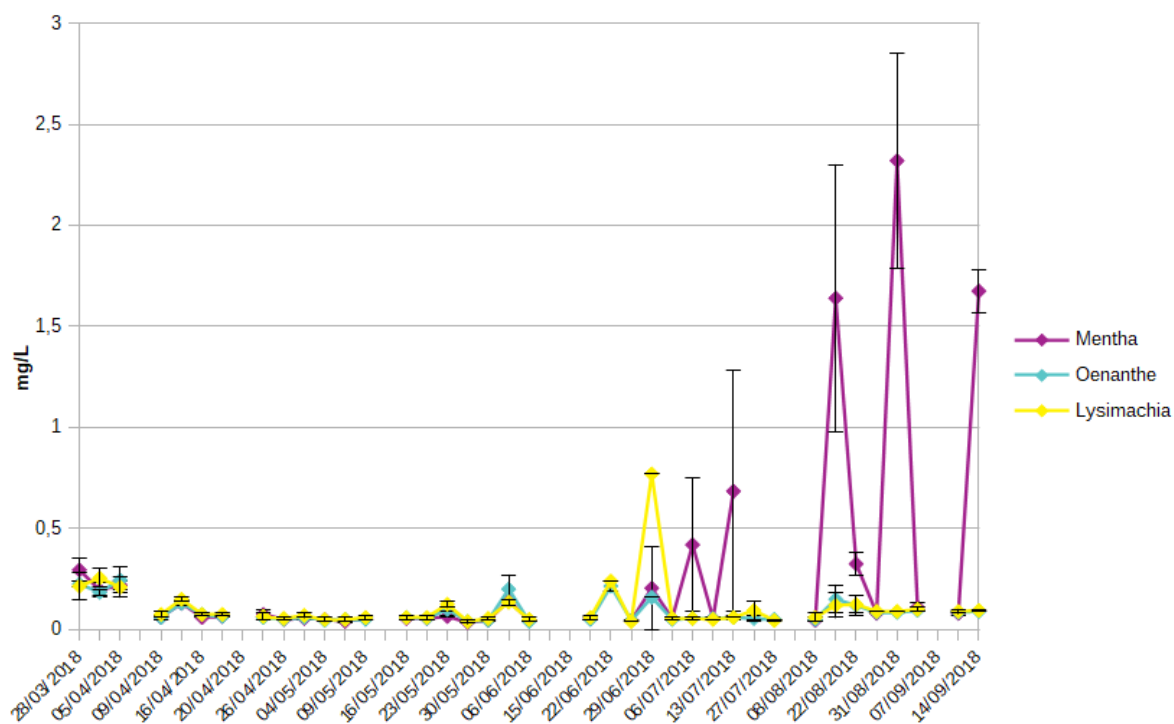


Figura 50: Dinamica temporale dell' $O_2$ , delle tre specie vegetali, per il livello "Up".

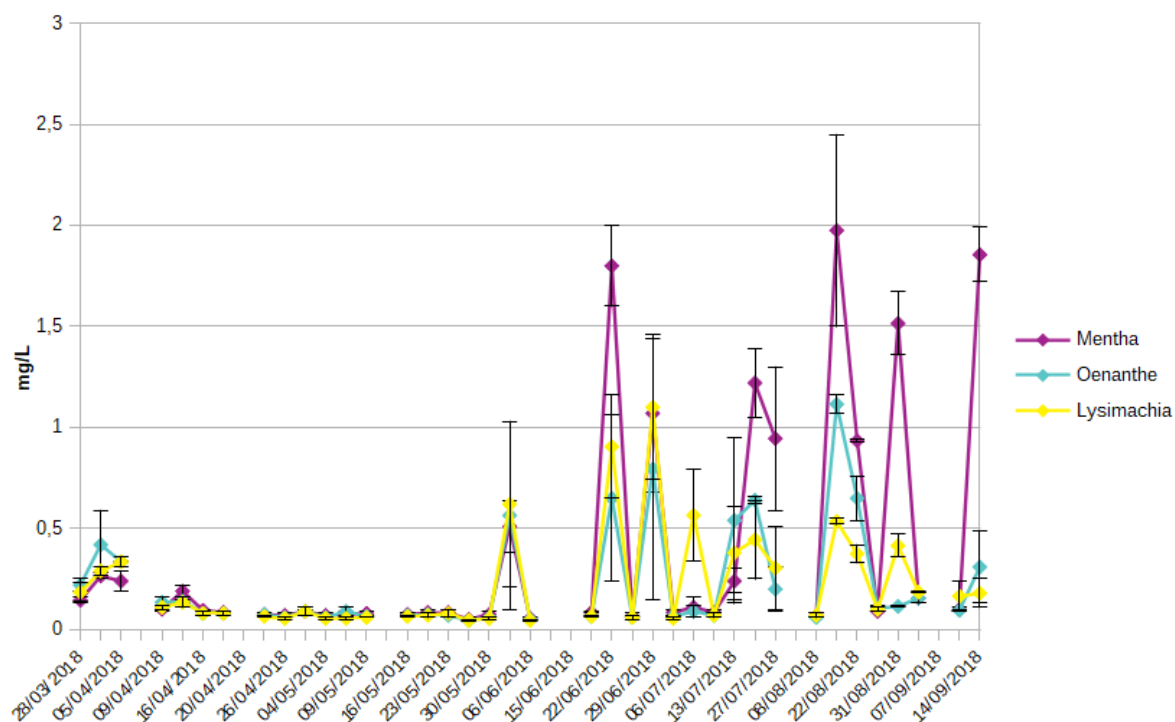


Figura 51: Dinamica temporale dell' $O_2$ , delle tre specie vegetali, per il livello "Med".

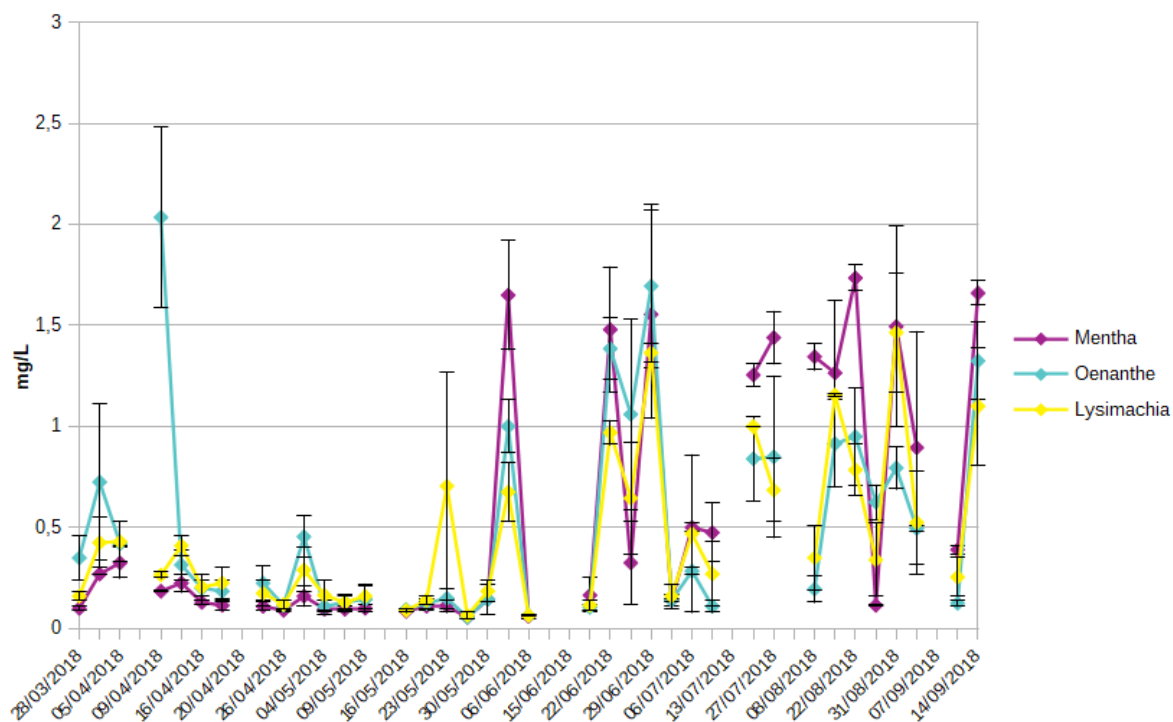


Figura 52: Dinamica temporale dell'O<sub>2</sub>, delle tre specie vegetali, per il livello "Down".

### 3.2.4 POTENZIALE DI OSSIDORIDUZIONE

Il potenziale redox presenta dei valori che rispecchiano l'andamento dell'ossigeno disciolto, in quanto i due parametri sono tra loro correlati e per questo, mostrano un comportamento molto variabile nel tempo.

Solamente in due occasioni sono stati misurati dei dati positivi, il primo (11/05/2018, Livello "IN") di 20,10mV ed il secondo (22/06/2018, livello "Out"), su *lysimachia*, di 24,25mV, i quali tuttavia sembrano essere riconducibili ad un errore di tipo strumentale.

In tutti gli altri casi, il potenziale di ossidoriduzione è negativo, confermando la prevalenza di condizioni anaerobiche nel refluo, in tutti i settori del sistema di fitodepurazione.

Così come per l'ossigeno, anche questa volta si nota un incremento graduale dei valori dai primi step verso gli ultimi del sistema a cascata, legato molto probabilmente al movimento dell'acqua. Il valore medio delle misure realizzate sul refluo in entrata è di -249,70mV con un minimo di -277,10mV ed un picco massimo di 20,10mV.

Tra -200,90mV e 24,25mV si distribuiscono i dati delle acque in uscita, la cui mediana è di -56,80mV.

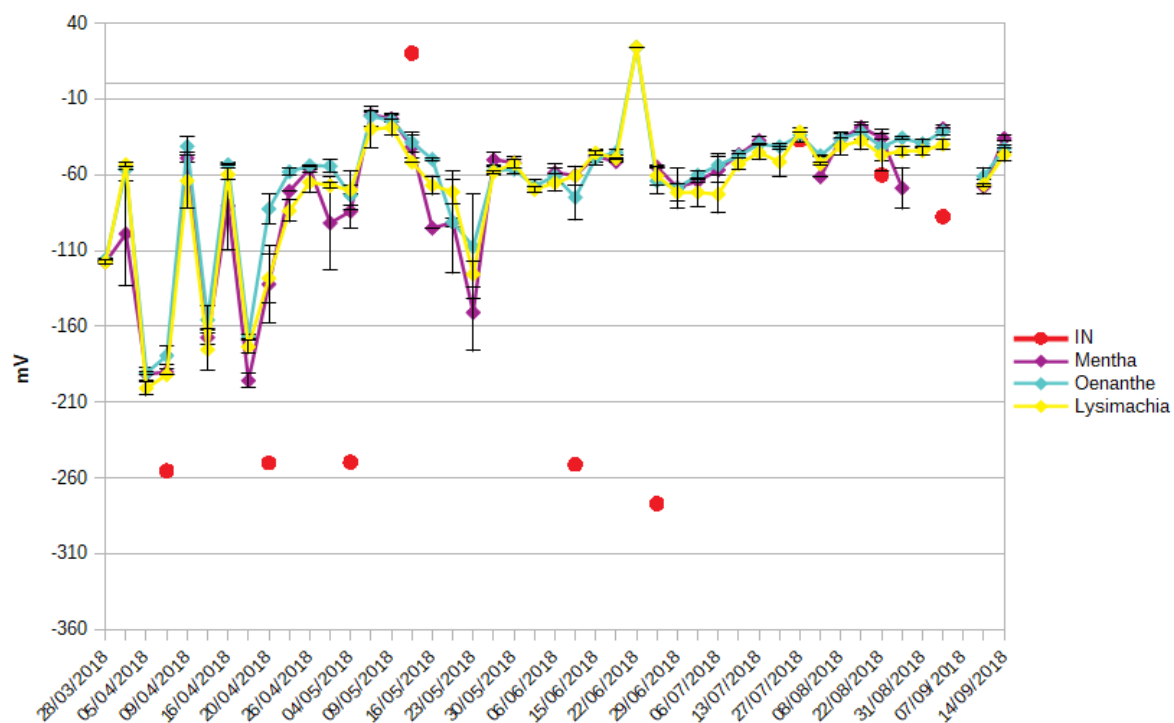


Figura 53: Dinamica temporale del potenziale redox, delle tre specie vegetali, per le acque di input ed output.

Nei livelli centrali, fra le specie vegetali non si notano particolari differenze, con valori molto diversi da un giorno all'altro.

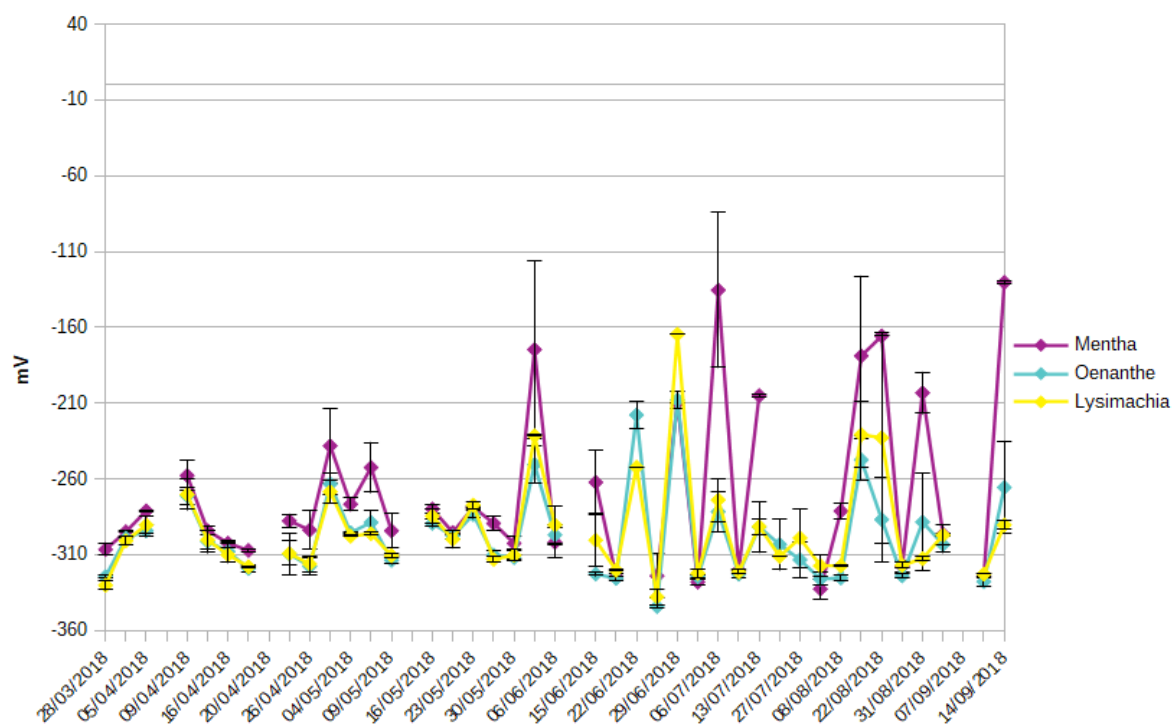


Figura 54: Dinamica temporale del potenziale redox, delle tre specie vegetali, per il livello "Up".

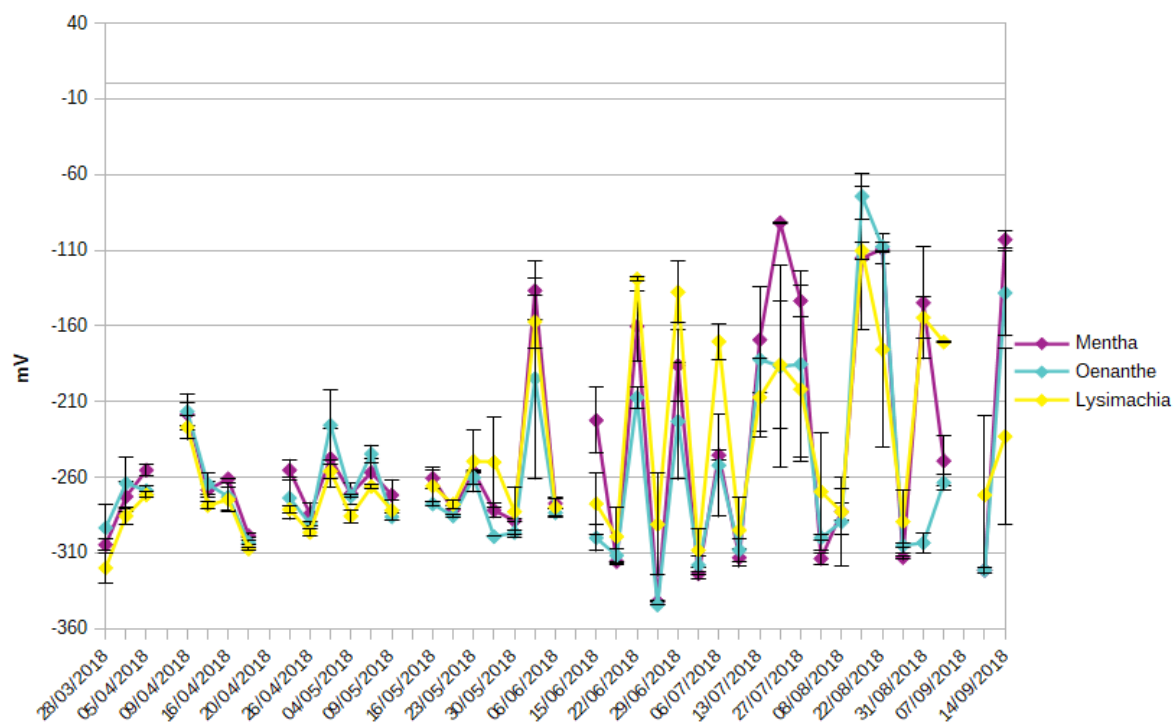


Figura 55: Dinamica temporale del potenziale redox, delle tre specie vegetali, per il livello "Med".

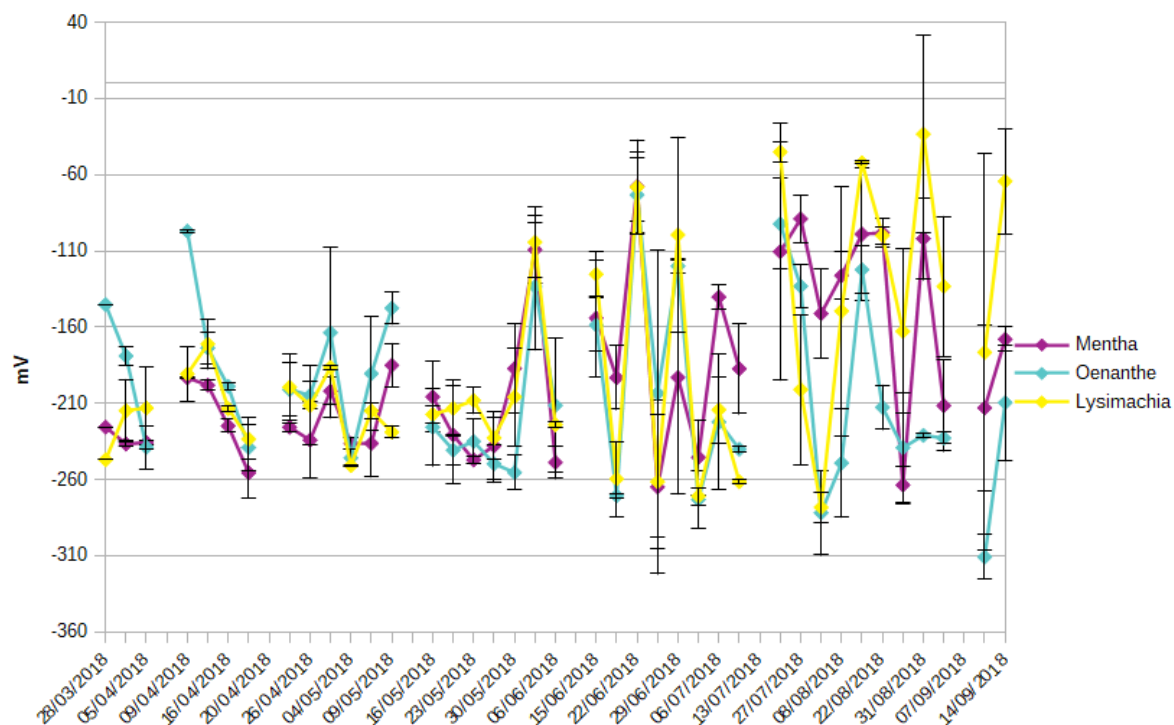


Figura 56: Dinamica temporale del potenziale redox, delle tre specie vegetali, per il livello "Down".

### 3.2.5 TEMPERATURA

La temperatura del refluo durante il periodo di monitoraggio è compresa in un intervallo tra 11,9°C (05/04/2018) e 30,9°C (08/08/2018), con una dinamica nel tempo piuttosto variabile, a seguito dei frequenti eventi piovosi, che hanno caratterizzato quest'anno.

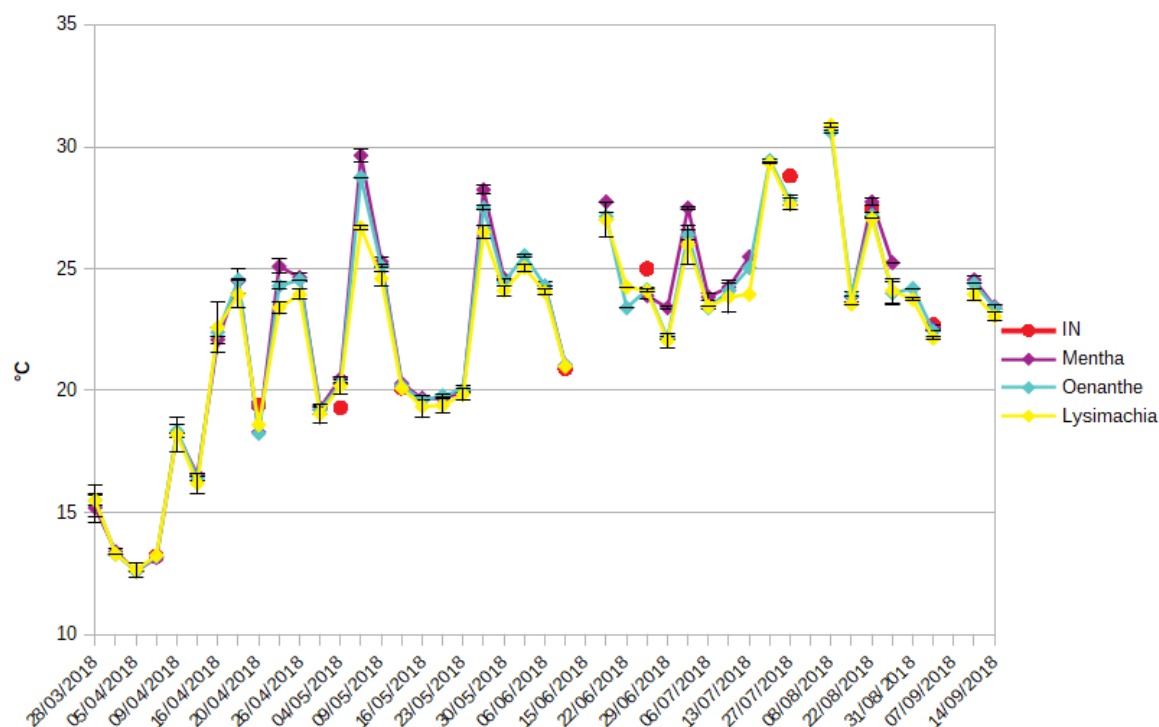


Figura 57: Dinamica temporale della temperatura , per le acque di input ed output.

Non sono state riscontrate differenze degne di nota, né tra i diversi livelli, né tra le piante a confronto.

Tuttavia, all'interno delle vasche nelle quali è presente *lysimachia*, è stata rilevata una leggera diminuzione della temperatura del refluo, quasi sicuramente dovuta al portamento prostrato di questa specie, la quale coprendo molto bene l'intera superficie della vasca e ricadendo anche sulle pareti, favorisce un maggior ombreggiamento del letto vegetato.

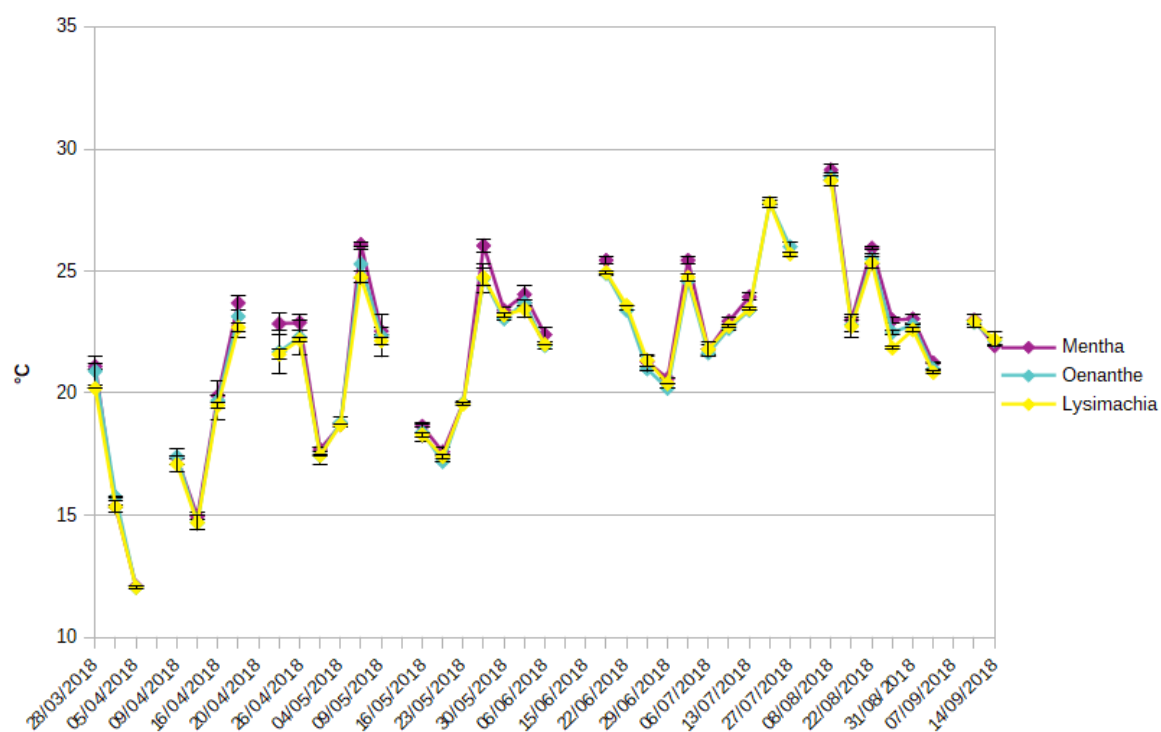


Figura 58: Dinamica temporale della temperatura , delle tre specie vegetali, per il livello “Up”.

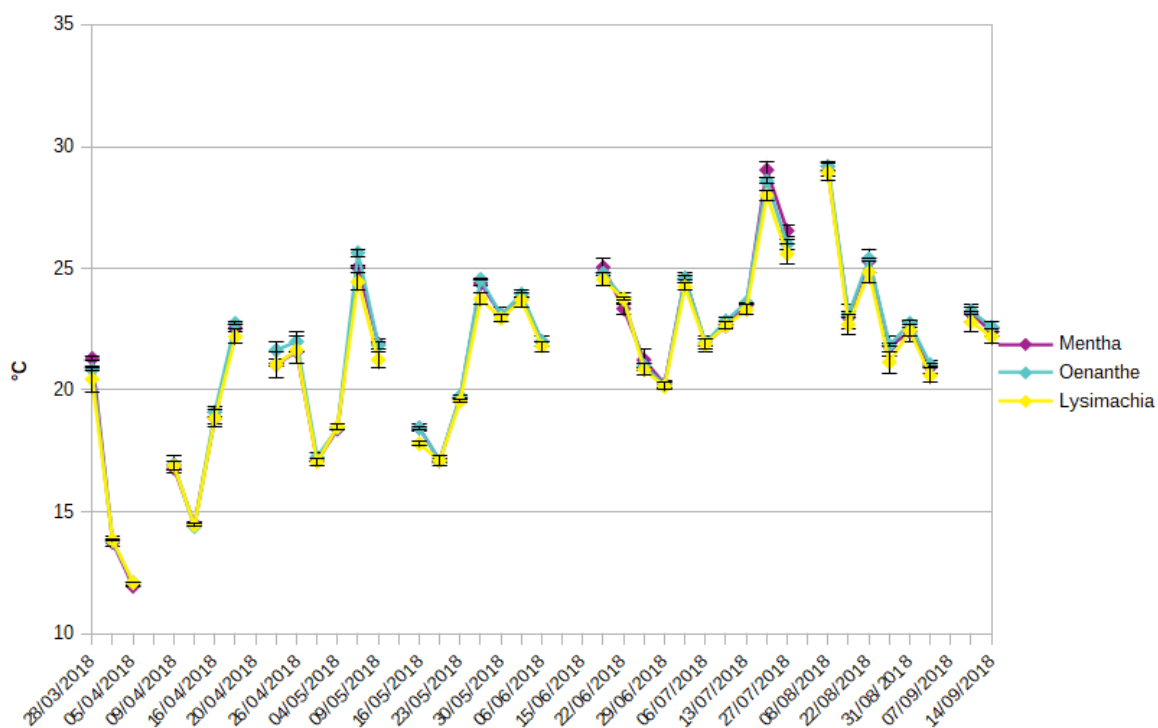


Figura 59: Dinamica temporale della temperatura , delle tre specie vegetali, per il livello “Med”.



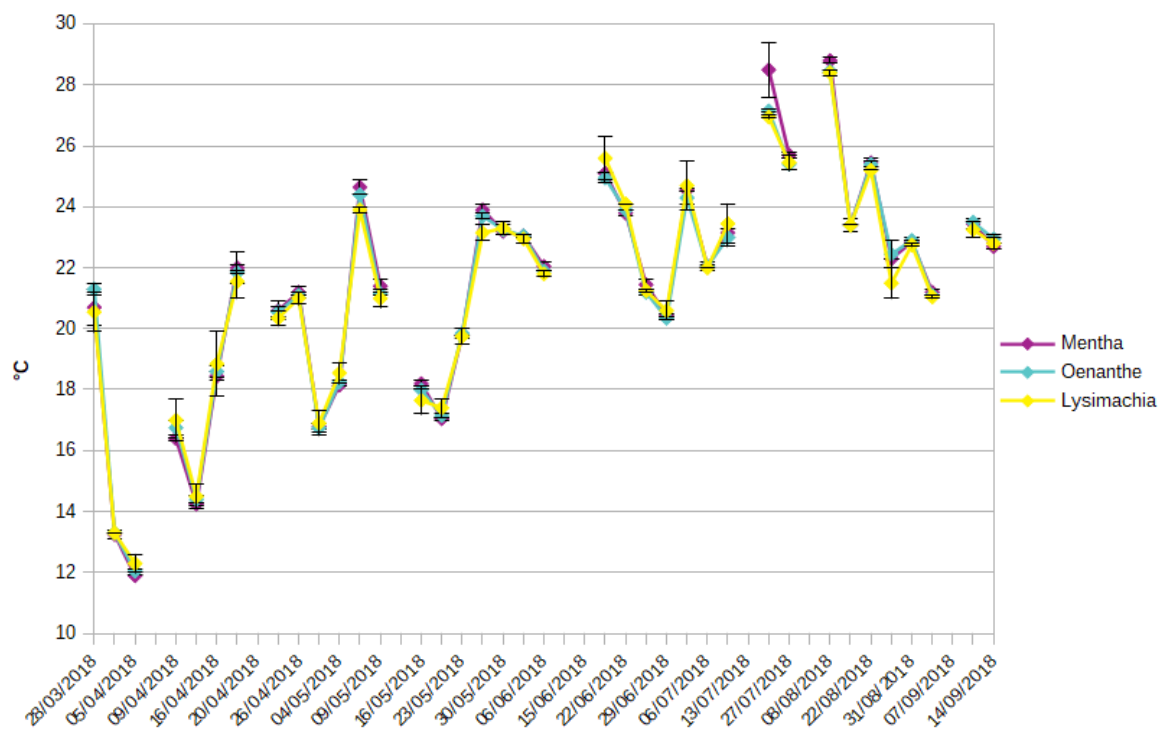


Figura 60: Dinamica temporale della temperatura, delle tre specie vegetali, per il livello "Down".

### 3.3 PARAMETRI CHIMICI RELATIVI ALLE SOSTANZE PRESENTI NELL'ACQUA REFLUA

#### 3.3.1 SOLIDI SOSPESI TOTALI

La quantità di solidi sospesi, misurata all'ingresso del sistema, è incostante e si attesta su dei valori compresi tra 104 NTU e 420 NTU. La mediana è di 185 NTU.

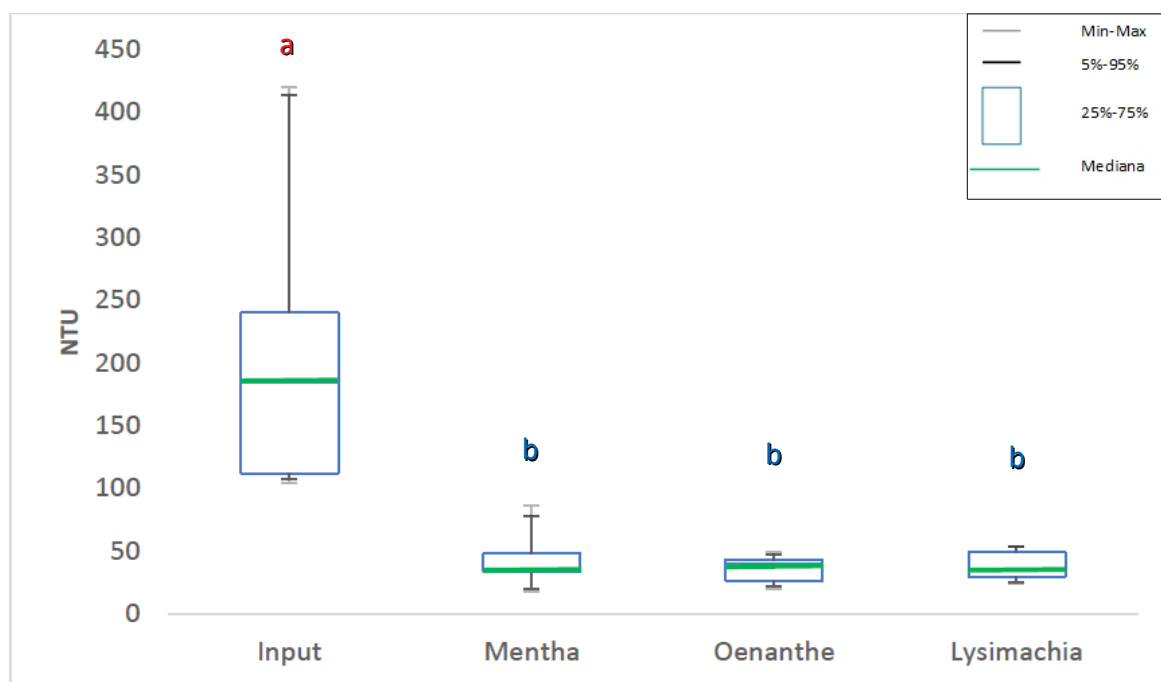


Figura 61: Concentrazioni di solidi sospesi totali (TSS) in entrata e uscita dall'impianto. Le lettere che non sono in comune indicano differenze statisticamente significative ad un livello di confidenza  $p < 0,001$ .

Per quanto riguarda le concentrazioni all'uscita dall'impianto, le quali si discostano significativamente da quelle in entrata con un livello di probabilità inferiore all'1%, non si notano differenze significative tra le diverse linee. Le tre piante utilizzate, *mentha*, *oenanthe* e *lysimachia*, dimostrano rispettivamente dei dati mediani di 35 NTU, 39 NTU e 35 NTU, statisticamente non differenti tra loro. Da sottolineare è il fatto che il refluo di output delle linee 2 e 5 (*oenanthe*) si differenzia molto di più dal refluo di input, rispetto alle altre linee del sistema (*mentha* e *lysimachia*).

Anche le performance depurative in termini percentuali sono molto simili tra le diverse linee monitorate: *oenanthe*, sembra essere la specie vegetale più efficiente, con una riduzione media dell'80,05%, probabilmente favorita dal fitto apparato radicale che è in grado di sviluppare, incrementando così la filtrazione del refluo. Segue poi *lysimachia* con un abbattimento del 78,14% ed infine *mentha* con il 75,71%.

Perciò, l'utilizzo o meno di una determinata specie vegetale non sembra essere il fattore determinante rispetto alla capacità di abbattimento dei solidi sospesi. Di contro, il vero responsabile della riduzione della torbidità del refluo potrebbe essere il substrato di riempimento delle vasche.

Inoltre è possibile apprezzare il fatto che all'aumentare delle concentrazioni in input, non corrispondono delle alte concentrazioni sul punto di output, dimostrando ancora una volta la reale

efficienza di questi sistemi. Allo stesso tempo, dal grafico nella figura 61, si può vedere come la quantità di solidi sospesi non scende mai sotto una certa soglia, che si aggira intorno alle 20 NTU, per cui non si ha mai una rimozione totale della torbidità del refluo. Quanto evidenziato è un aspetto tipico dei sistemi di fitodepurazione i quali, composti da materiale vivente, comportano una naturale produzione di biomassa, la quale potrebbe mantenere una soglia di background in termini di solidi sospesi (Kadlec and Wallace, 2008).

Un ulteriore particolarità segnalata durante il monitoraggio, è la differenza di colore dell'acqua in entrata ed in uscita dall'impianto, tra le diverse piante.

Come mostrato nelle immagini sottostanti, il refluo di input ha un colore rossastro e presenta una discreta torbidità, apprezzabile anche ad occhio nudo. Successivamente dalle linee vegetate con *mentha*, le acque depurate assumono una colorazione molto scura, decisamente diversa dalle altre specie.

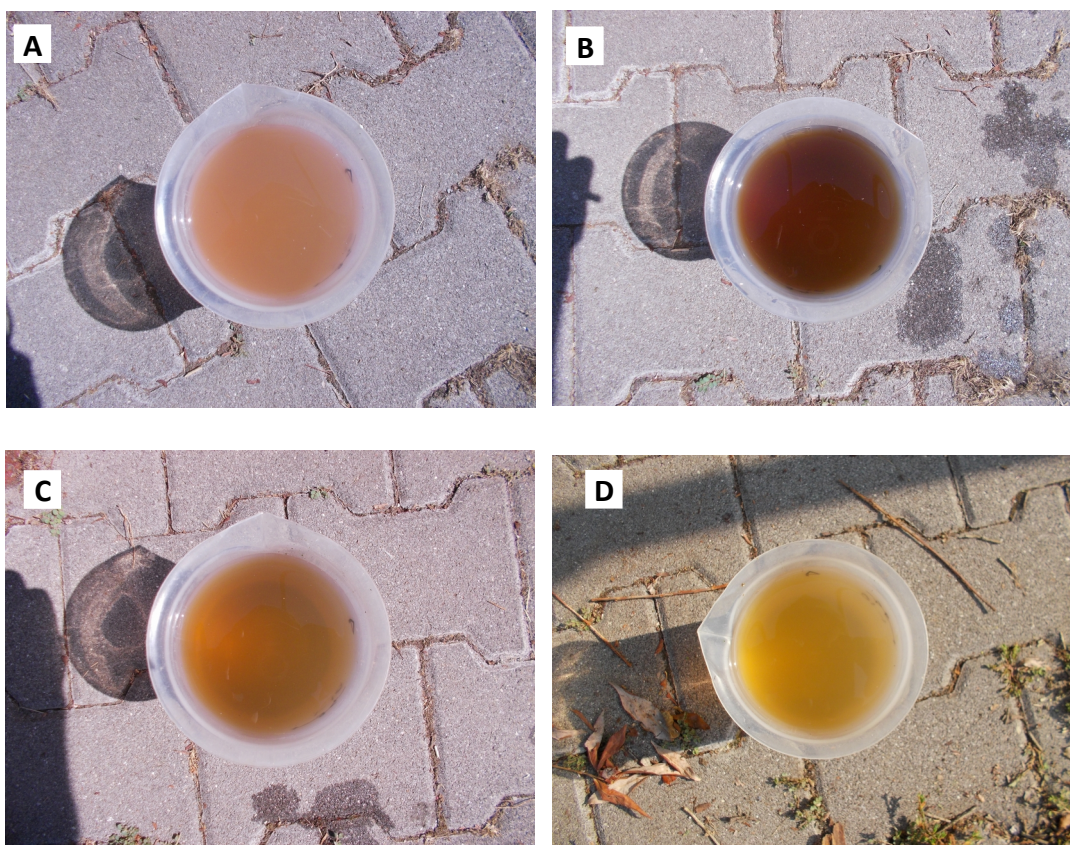


Figura 62: Differenze nel colore del refluo in entrata (A) e uscita dall'impianto, da *mentha* (B), *oenanthe* (C) e *lysimachia* (D).

### 3.3.2 SOSTANZA ORGANICA BOD<sub>5</sub> E COD

I composti organici biodegradabili e degradabili chimicamente sono stati quantificati attraverso la determinazione del BOD<sub>5</sub> e del COD, rispettivamente .

Per entrambi i parametri, le acque in input, presentano delle concentrazioni, che si trovano comunemente nelle acque di scarico delle cucine (Li et al., 2009).

Analizzando prima di tutto, la domanda chimica di ossigeno, sul refluo in ingresso è stato misurato un valore mediano di 502,00mg/L. Le altre misure si discostano poco da questo valore, anche se sono presenti alcuni picchi di concentrazione di 1104,00mg/L e 1561,00mg/L trovati all'inizio del monitoraggio, i quali rappresentano i valori massimi della distribuzione. Invece, la concentrazione minima osservata è pari a 391,00mg/L.

Prendendo in considerazione la capacità di ridurre il COD, da parte delle tre tipologie di piante usate nel sistema, si osserva che *mentha* sembra essere la meno efficiente, con una percentuale di riduzione media del 66,60%. L'analisi statistica dei valori misurati denota che le acque reflue in uscita dalle linee vegetate con questa specie sono significativamente differenti ( $p < 0,05$ ) dall'input, sebbene il livello di confidenza si accresca notevolmente con *oenanthe* e *lysimachia* ( $p < 0,001$ ). In effetti, queste ultime garantiscono il raggiungimento di performance superiori con abbattimenti medi, rispettivamente del 78,26% e del 76,68%.

Da sottolineare, è il fatto che per tutte le piante, il 75,00% dei valori di COD del refluo in uscita, determinati in laboratorio, si pone al di sotto dei 250,00mg/L, dato che determina la soglia limite per lo scarico in acque superficiali della colonna B, prevista nell'Allegato A, Tabelle 1 del DCR 107/2009.

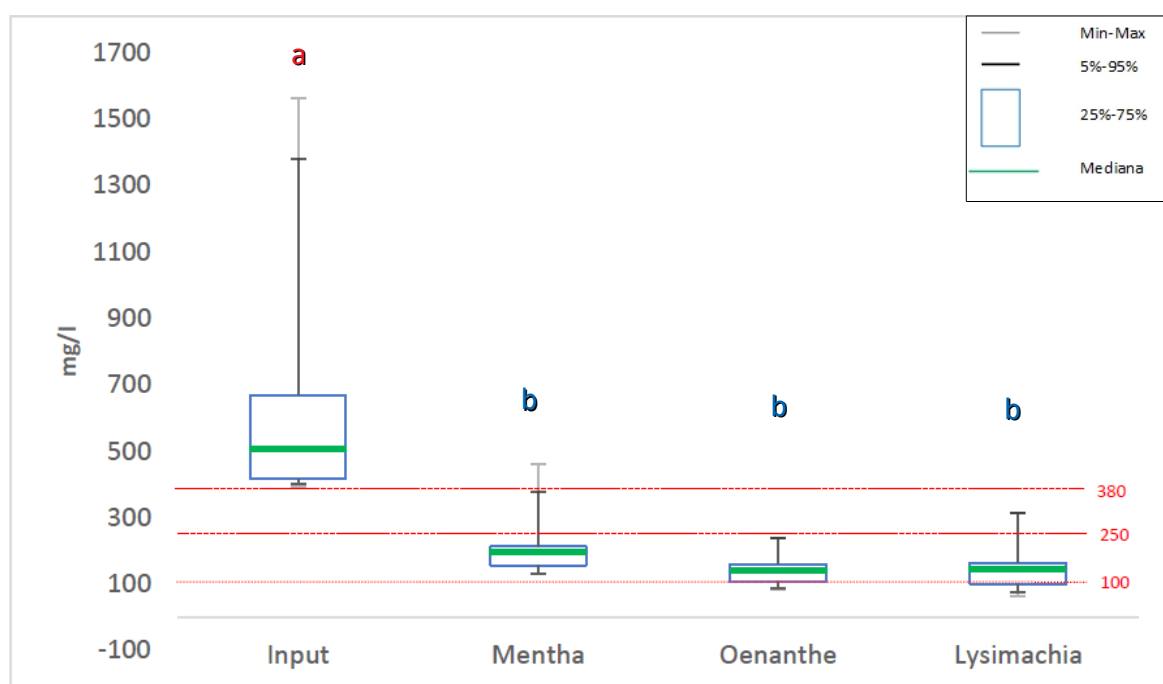


Figura 63: Concentrazioni di sostanza organica (COD) in entrata e uscita dall'impianto. Le linee rosse indicano la soglia per lo scarico in acque superficiali (Colonna A: 380mg/L- Colonna B: 250mg/L) e per il riutilizzo(100mg/L). Le lettere che non sono in comune indicano differenze statisticamente significative ad un livello di confidenza  $p < 0,001$ .

Anche la valutazione del contenuto di sostanza organica biodegradabile ( $BOD_5$ ), conferma quanto riportato precedentemente, riguardo alle performance delle varie specie vegetali. Per di più, in confronto con il COD, l'acqua di scarico in output si differenzia statisticamente dall'acqua di scarico in input, sebbene con un livello di confidenza inferiore pari all'1%.

Nel refluo in uscita dalle linee nelle quali sono state messe a dimora le piante di *oenanthe*, si riscontrano capacità di depurazione medie del 70,85%, così come *lysimachia* con il 70,25%, mentre

*mentha* dimostra potenzialità leggermente inferiori nell'ordine del 62,15%. Quest'ultima, in questo caso non è significativamente diversa ne dall'acqua in entrata, ne dalle altre linee del sistema. Per entrambi i parametri usati per determinare la sostanza organica, bisogna considerare che *mentha* è la specie in grado di concentrare maggiormente il refluo all'interno dei letti vegetati e per questo presenta i dati di concentrazione più elevati.

Come prima, anche questa volta, le acque di scarico risultano nella maggior parte dei casi, idonee all'emissione in corpi idrici recettori superficiali.

Tuttavia, i valori in input rivelano una concentrazione di sostanza organica minore rispetto al COD, poiché calcolando il rapporto medio BOD<sub>5</sub>/COD, si ottiene un valore di 0,36mg/L.

Difatti, il dato mediano in entrata si attesta sui 160,00mg/L, con il resto dei valori distribuiti tra un minimo di 100,00mg/L e un picco massimo, misurato il 20/04/2018, di 720,00mg/L.

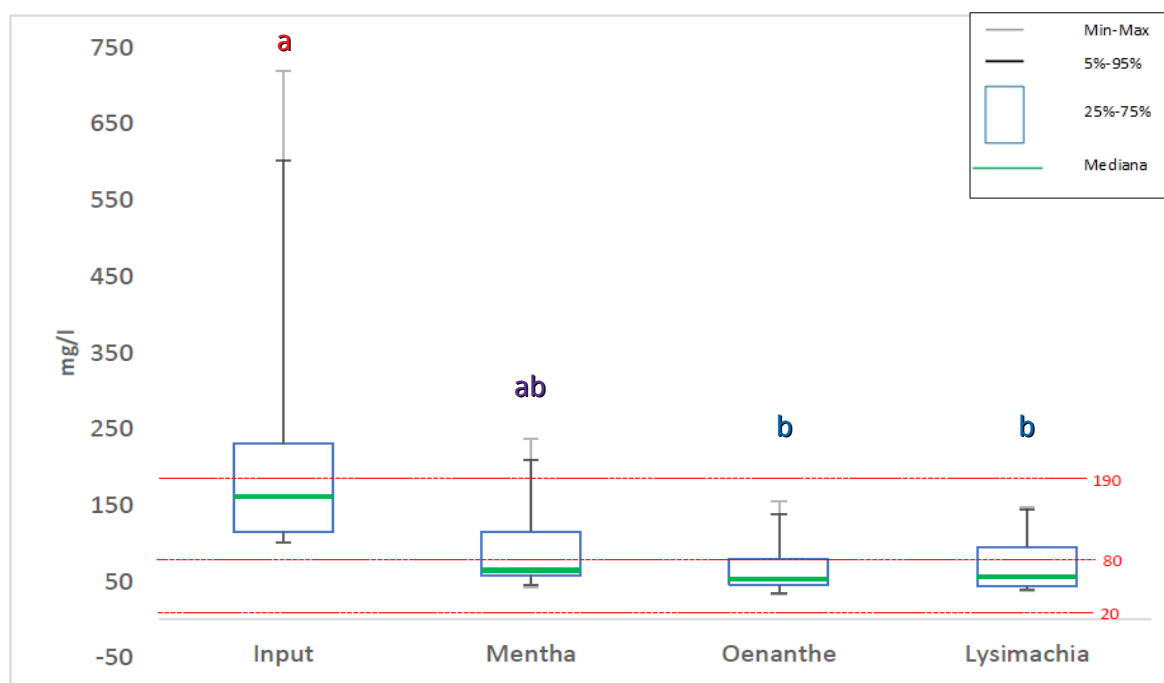


Figura 64: Concentrazioni di sostanza organica (BOD<sub>5</sub>) in entrata e uscita dall'impianto. Le linee rosse indicano la soglia per lo scarico in acque superficiali (Colonna A: 190mg/L- Colonna B: 80mg/L) e per il riutilizzo (20mg/L). Le lettere che non sono in comune indicano differenze statisticamente significative ad un livello di confidenza  $p < 0,01$ .

### 3.3.3 TENSIOATTIVI ANIONICI

Il fatto che il refluo depurato da questo impianto, abbia origine da una cucina, suggerisce che il suo contenuto in tensioattivi anionici sia piuttosto elevato. Le concentrazioni misurate all'ingresso dell'impianto variano da 9,44mg/L a 31,84 mg/L con una mediana di 17,82mg/L.

Nuovamente, l'impianto sperimentale si distingue per una buona capacità di abbattimento di questo tipo di sostanze, in particolare sulle linee 2 e 5, dove si trova *oenanthe*, le quali garantiscono rese depurative medie dell'80,89%.

Anche le linee vegetate con *mentha* e *lysimachia* confermano questa tendenza, grazie al raggiungimento di percentuali di riduzione del 75,93% per la prima specie e 76,24% per la seconda. Inoltre, come si può osservare dal grafico della figura 65, *oenanthe* presenta una ridotta variabilità dei dati di concentrazione del refluo in uscita, rispetto alle altre specie, visto che la differenza tra il primo quartile (25%) e il secondo quartile (75%) è di solo 0,95mg/L.

Ancora una volta, considerando il dato di concentrazione mediano, l'acqua scaricata dal sistema risulta idonea ad essere scaricata in corpi idrici superficiali, senza ricorrere alla fognatura.

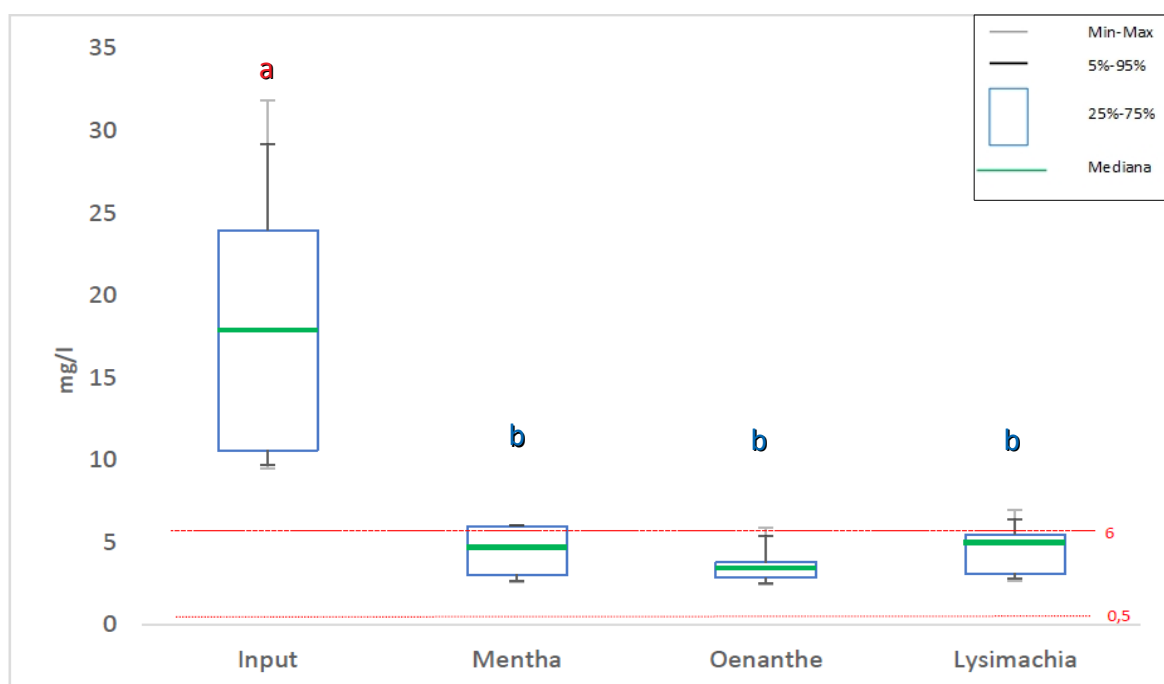


Figura 65: Concentrazioni dei tensioattivi anionici (MBAS) in entrata e uscita dall'impianto. Le linee rosse indicano la soglia per lo scarico in acque superficiali (6mg/L) e per il riutilizzo (0,5mg/L). Le lettere che non sono in comune indicano differenze statisticamente significative ad un livello di confidenza  $p < 0,001$ .



### 3.3.4 AZOTO

Le varie forme azotate, analizzate durante il monitoraggio e delle quali sono state valutate le performance di depurazione sono: l'azoto Kjeldahl (TKN), l'azoto elementare presente nei nitrati ( $\text{N-NO}_3$ ) e l'azoto elementare costituente l'ammonio ( $\text{N-NH}_4$ ).

Il TKN, il quale rappresenta la somma dell'azoto organico ed ammoniacale, è compreso in un intervallo, che per l'input, varia da 11,56mg/L a 57,00mg/L. La mediana della distribuzione dei dati misurati, si attesta sui 35,29mg/L.

La rimozione di questo parametro è moderata, rispetto a quanto visto per i parametri precedenti, dato che, la differenza statistica tra in ed out si manifesta con un livello di probabilità del 5%.

Per di più, se per le sostanze analizzate prima *oenanthe* era la specie in grado di fornire le migliori prestazioni depurative, ora è *mentha* a registrare una riduzione più alta, con un valore percentuale medio del 50,25%, dovuto principalmente alla minore variabilità delle concentrazioni di output misurate. Invece, *oenanthe* presenta un dato medio del 45,49% e *lysimachia* del 35,52%.

In riferimento a quest'ultima specie, i suoi valori non si distinguono statisticamente ne dalle concentrazioni misurate in input ne da quelle rilevate sulle altre linee.

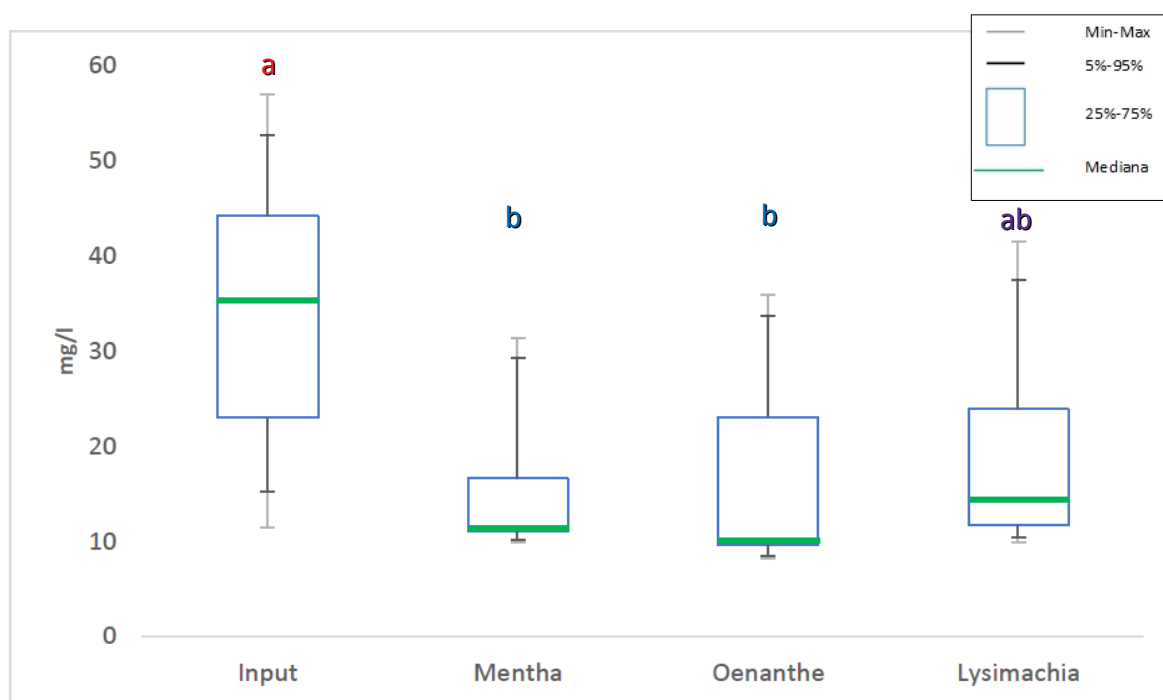


Figura 66: Concentrazioni di azoto Kjeldahl (TKN) in entrata e uscita dall'impianto. Le lettere che non sono in comune indicano differenze statisticamente significative ad un livello di confidenza  $p < 0,05$ .

Le analisi effettuate in laboratorio, confermano la totale assenza di nitrati sulle acque reflue in ingresso del sistema di fitodepurazione. Questo mette in evidenza, il fatto che nel refluo, prodotto dalla mensa, prima di entrare nell'impianto, prevalgono delle condizioni anaerobiche, le quali limitano il verificarsi di processi di nitrificazione. In particolare questo accade durante il periodo di permanenza del refluo all'interno della vasca settica tricamerale.

Di contro, basse concentrazioni di azoto, in un intervallo tra 0,0019mg/L e 3,08mg/L sono state rilevate nelle vasche di output, considerando tutte le linee. Ciò, dimostra come il flusso a cascata a

cui l'acqua è sottoposta scorrendo da un livello all'altro dell'impianto, favorisca, seppur in misura minima, l'ossigenazione del refluo, la quale permette la trasformazione dell'ammonio a nitrato, tramite il processo di nitrificazione.

E' importante sottolineare, che tra le varie specie sono state determinate delle sensibili differenze nelle quantità misurate in uscita dall'impianto. I dati relativi a *mentha* sono molto costanti (Minimo: 0,00mg/L; Massimo: 0,34mg/L) con una mediana di 0,015mg/L. *Oenanthe* ha una mediana di 0,10mg/L con valori compresi tra 0,00mg/L e 3,08mg/L. Infine le concentrazioni determinate su *lysimachia* si trovano in un intervallo fra 0,00mg/L e 1,95mg/L, la cui mediana si attesta su 0,13mg/L.

Questa variabilità, potrebbe dipendere dal diverso tasso di assorbimento dell'azoto da parte delle piante stesse, dato che *mentha*, la quale si distingue per un marcato sviluppo vegetativo in tutti i livelli, ha fatto registrare le concentrazioni minori.

Altro aspetto, a favore di questa ipotesi, è che i picchi e le quantità massime di nitrato misurate nelle vasche di "Out", si riferiscono per tutte e tre le specie all'analisi eseguita il 22/08/2018.

E' proprio intorno a questo periodo, caratterizzato da clima caldo, che le piante, sofferenti per le alte temperature, si trovavano in una fase di stasi vegetativa.

Durante il monitoraggio, è stato previsto il prelievo di un campione di acqua di precipitazione, in modo da determinare gli eventuali apporti di azoto, da parte della pioggia. In esse è stata misurata una concentrazione di N-NO<sub>3</sub> pari a 0,48mg/L, la quale è stata aggiunta ai valori di input per determinare la capacità di abbattimento del sistema relativa a questo parametro.

I risultati dimostrano un'ottima capacità di riduzione dell'azoto nitroso, per *mentha* (92,06%), seppur il sistema, favorendo lo sviluppo di processi di nitrificazione, tenda allo stesso tempo a produrre nitrato. Le altre due specie, *oenanthe* e *lysimachia* mostrano una minore capacità, rispettivamente del 34,28% e del 40,84%.

L'analisi statistica dei valori ottenuti mostra una diversità significativa tra in ed out, su *lysimachia* con un livello di confidenza  $p < 0,001$  e su *oenanthe* di  $p < 0,01$ , mentre *mentha* non mostra differenze significative.

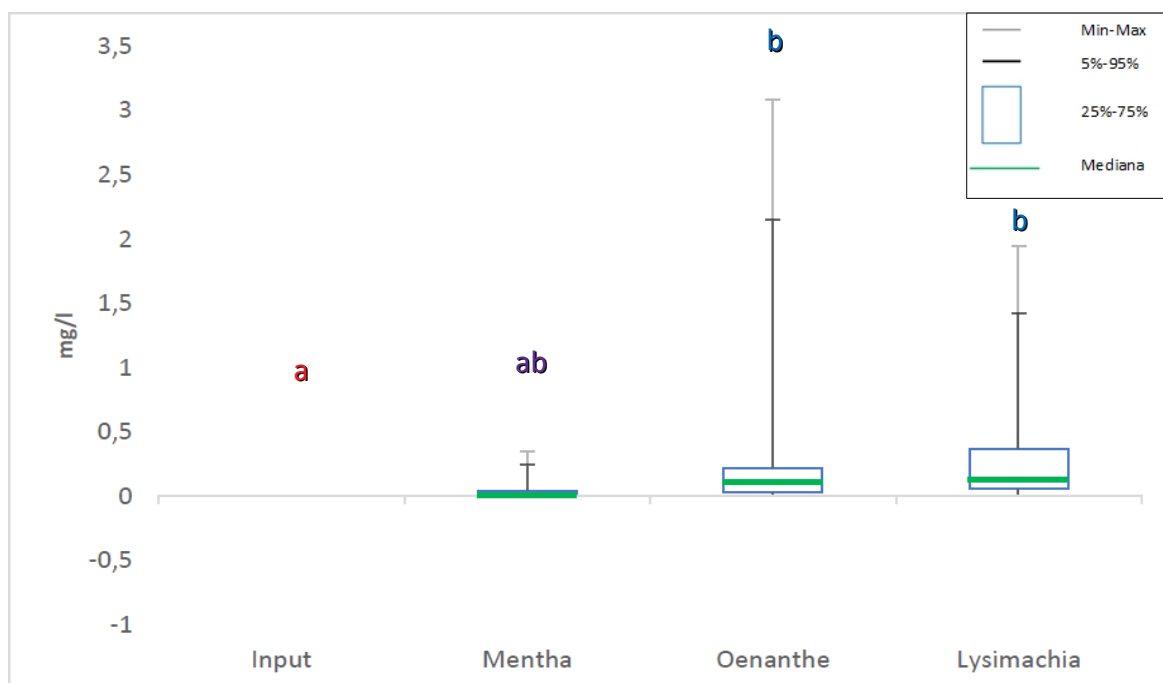


Figura 67: Concentrazioni di azoto nitrico ( $N-NO_3$ ) in entrata e uscita dall'impianto. Le lettere che non sono in comune indicano differenze statisticamente significative ad un livello di confidenza  $p < 0,001$ .

Per ultimo, l'azoto ammoniacale, derivante dalla degradazione dell'azoto organico si trova, nelle acque di scarico in input con delle concentrazioni relativamente basse. La distribuzione dei valori misurati è compresa tra un minimo di 5,33mg/L ed un massimo di 29,21mg/L. Il valore mediano ottenuto è di 11,00mg/L.

Questi dati risultano essere già inferiori ai limiti di emissione in corpi idrici superficiali, secondo quanto previsto dal DCR 107/2009 della Regione Veneto.

Nonostante questo la riduzione percentuale media di questo parametro è meno accentuata rispetto alle altre forme azotate, con prestazioni simili tra le varie specie:

- del 38,20% nelle linee vegetate con *mentha*;
- del 46,32% per *oenanthe*;
- del 31,94% in uscita da *lysimachia*.

Tutto ciò ci permette di osservare, che nonostante questo impianto sia progettato per accentuare l'ossigenazione del refluo, comunque prevalgono condizioni di tipo anaerobico, che limitano la degradazione dell'ammonio. A questo si aggiunge il fatto che questa forma azotata è meno soggetta ad essere assorbita dalle piante rispetto al nitrato.

L'analisi statistica dei dati non mostra scarti significativi tra le varie linee.

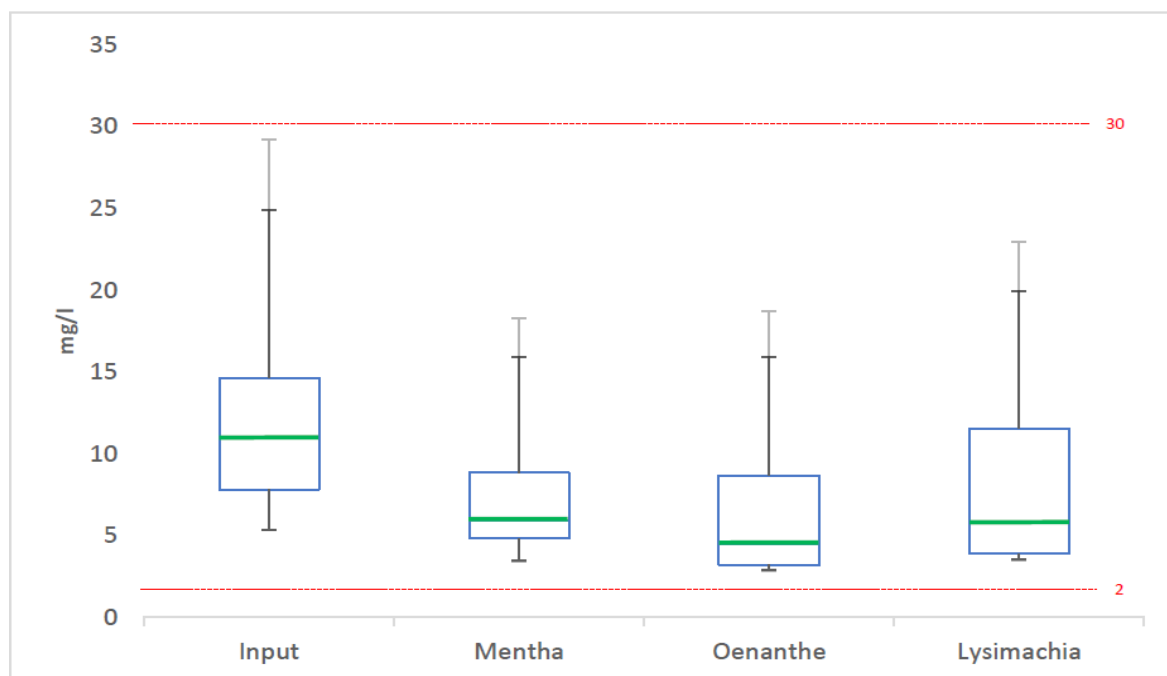
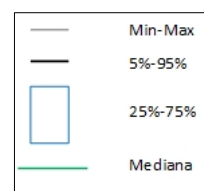


Figura 68: Concentrazioni di azoto ammoniacale ( $N-NH_4$ ) in entrata e uscita dall'impianto. Le linee rosse indicano la soglia per lo scarico in acque superficiali (23,3mg/L) e per il riutilizzo (2mg/L).



### 3.3.5 FOSFORO

I dati rappresentati si riferiscono al fosforo elementare che si trova all'interno dei fosfati, denominato ortofosfato ed al fosforo totale.

Le acque in entrata, sono caratterizzate da un tenore di fosfati più basso rispetto alle acque in uscita dal sistema sperimentale.

Infatti, queste sono caratterizzate da una mediana di 6,66mg/L, dalla quale si discosta un valore minimo di 3,54mg/L ed uno massimo di 9,77mg/L.

Anche in uscita, seppur aumentando, i valori non si differenziano molto dal refluo in entrata, però sono caratterizzati da una distribuzione dei dati più variabile.

Solamente *mentha* si caratterizza per una differenza significativa statistica dei valori con un livello di probabilità del 5%, rispetto all'acqua reflua in ingresso al sistema di fitodepurazione, probabilmente sempre dovuto alla maggiore capacità di evapotraspirazione.

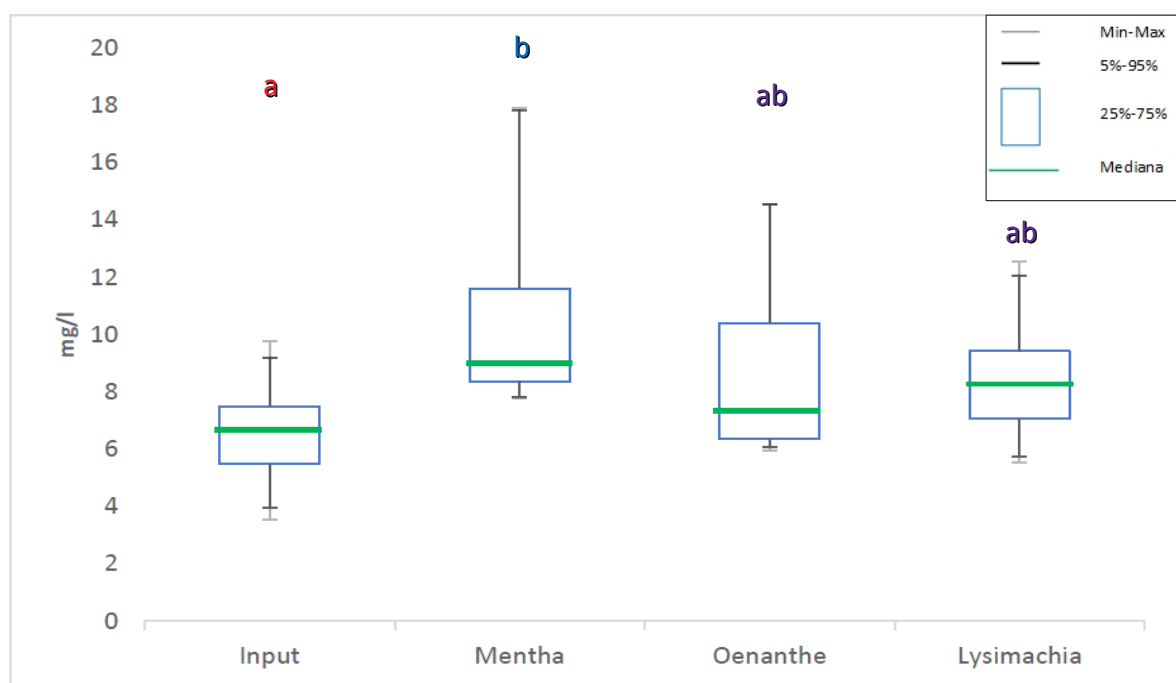


Figura 69: Concentrazioni di ortofosfato ( $P-PO_4$ ) in entrata e uscita dall'impianto. Le lettere che non sono in comune indicano differenze statisticamente significative ad un livello di confidenza  $p < 0,05$ .

Per quanto riguarda le concentrazioni relative al fosforo totale, il refluo in entrata presenta un valore mediano, piuttosto basso di 16,44mg/l, già di per se al di sotto della soglia limite per lo scarico in acque superficiali. Il resto dei valori si distribuisce tra un minimo di 12,58mg/L ed un massimo di 55,49mg/L.

Le concentrazioni nel refluo in output risultano poco differenti dalle precedenti. Tuttavia solo nelle linee dove è presente *lysimachia*, il valore mediano, di 15,55mg/l, è leggermente più basso rispetto all'input e quindi con una potenzialità depurativa limitata al 2,56%, anche se forse questa riduzione non è tanto dovuta ad un reale assorbimento da parte delle piante quanto ad una maggiore diluizione del refluo nelle vasche vegetate con questa specie.

La mediana di *mentha* ed *oenanthe*, invece è più elevata con valori rispettivamente di 21,61mg/L e 17,37mg/L.

Solamente il refluo in uscita da *mentha* ha una mediana di concentrazione superiore al limite di legge per lo scarico in corpi idrici superficiali, sempre per la presenza di un refluo più concentrato. Ecco che in questo caso, l'elevata evapotraspirazione tipica di questa specie vegetale rappresenta un fattore negativo, per il mancato rispetto dei limiti di legge.

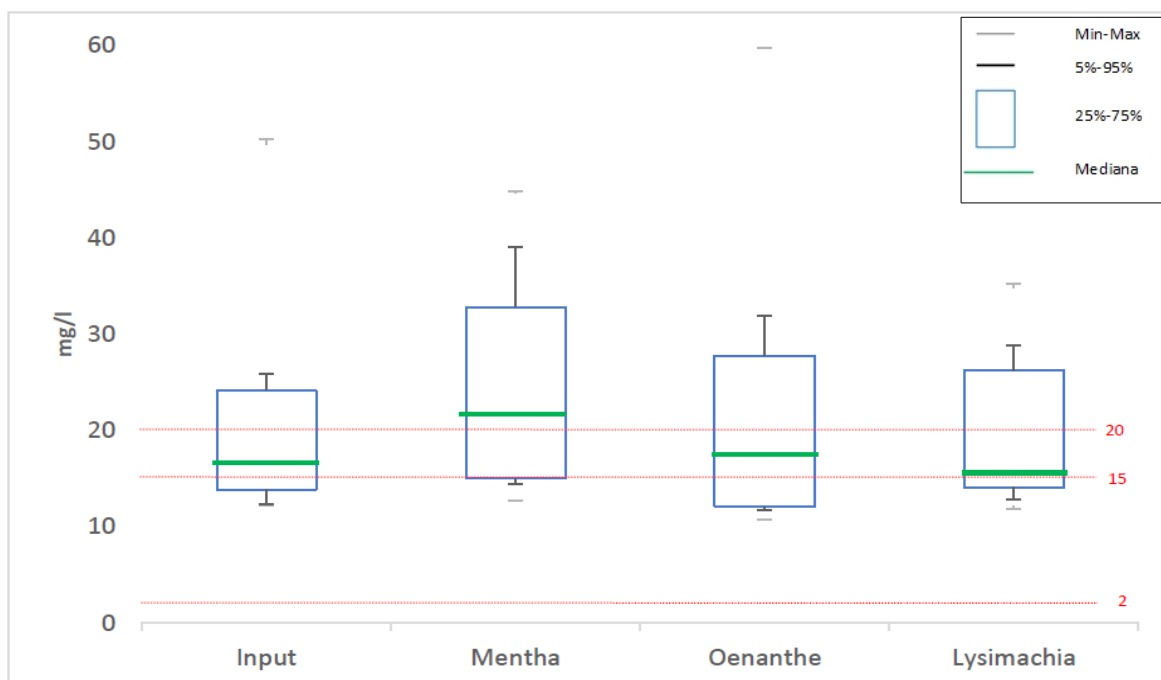


Figura 70: Concentrazioni di fosforo totale ( $P_{tot}$ ) in entrata e uscita dall'impianto. Le linee rosse indicano la soglia per lo scarico in acque superficiali (Colonna A: 20mg/L- Colonna B: 15mg/L) e per il riutilizzo (2mg/L).

### 3.4 BILANCIO DI MASSA

La somma delle quantità giornaliere, delle sostanze presenti all'interno delle acque di scarico della mensa,, ha permesso di determinare la reale potenzialità del sistema di fitodepurazione. In questo modo, è possibile quantificare con precisione la massa, per metro quadrato, effettivamente rimossa dall'impianto oggetto dello studio. I risultati sono descritti nelle pagine seguenti.

#### 3.4.1 SOSTANZA ORGANICA BOD<sub>5</sub> E COD

Nelle acque in ingresso nell'impianto, durante i novantanove giorni di campionamento, è stata misurata una quantità di ossigeno consumato per la degradazione chimica della sostanza organica (COD) pari a 641,31g/m<sup>2</sup>.

I valori nelle acque in uscita risultano piuttosto variabili, tra le tre specie vegetali utilizzate.

Il refluo di output dalle vasche vegetate con *oenanthe*, contiene la quota minore di COD, ossia 99,64g/m<sup>2</sup>, mentre dove si trova *mentha* sono stati misurati 117,07g/m<sup>2</sup> ed infine su *lysismachia* 140,52g/m<sup>2</sup>

Così come visto in precedenza per le concentrazioni (mg/L), *oenanthe*, conferma ancora una volta un buon indice medio percentuale di riduzione del COD, il quale si attesta all'84,46%, eliminando dal refluo 541,67g/m<sup>2</sup> netti.

Nonostante un indice percentuale di rimozione in termini di concentrazione simile alla specie precedente, *lysismachia* rimuove di meno, cioè 500,79g/m<sup>2</sup>, perciò con un rendimento del 78,09%.



Questo ci permette di capire che le concentrazioni sono basse per la presenza di un refluo maggiormente diluito e non per la reale capacità depurativa di *lysimachia*.

Per il motivo opposto, *mentha* si pone ad un livello intermedio con 524,24g/m<sup>2</sup> ed una performance di abbattimento dell'81,75%, anche se, analizzando i dati espressi come concentrazione nel refluo, risultava la specie meno efficiente nel rimuovere questo tipo di sostanze.

Dal grafico nella figura 71, è importante osservare la linea rappresentante i dati relativi all'acqua reflua in uscita dalle linee vegetate con *mentha*, la quale si caratterizza per un incremento che tende a decrescere nel tempo, a differenza delle altre due specie.

Infatti si è notato, così come per altri parametri, che le performance di rimozione di *mentha* migliorano nel tempo, poiché è la specie che garantisce lo sviluppo vegetativo più costante. Al contrario, a causa di un ritardo nella ripresa vegetativa, ad inizio stagione, rispetto alle altre due specie, il refluo delle vasche in cui è presente *mentha*, ha le quantità di sostanze cumulate più elevate.

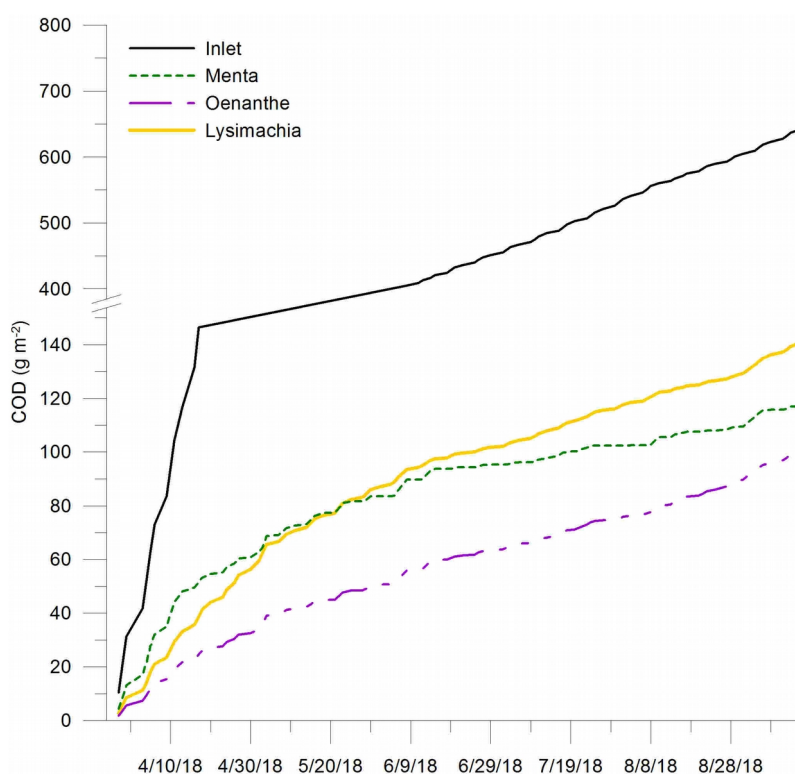


Figura 71: Quantità per unità di superficie di sostanza organica (COD), in entrata e uscita dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.

Prendendo in considerazione la domanda biochimica di ossigeno a cinque giorni (BOD<sub>5</sub>), i valori in input corrispondono a 288,38g/m<sup>2</sup>.

In output dal sistema di fitodepurazione, le quantità misurate sono caratterizzate da una minore variabilità tra le piante rispetto al COD. Per tutto il periodo di monitoraggio, in *mentha*, è stata calcolata una massa cumulata di ossigeno di 57,63g/m<sup>2</sup>, che determina una rimozione netta di

230,74g/m<sup>2</sup>. Di nuovo, *oenanthe* presenta un tasso di riduzione maggiore, di 237,10g/m<sup>2</sup>, con un contenuto nelle acque pari a 51,28g/m<sup>2</sup>. Per ultima *lysimachia* registra una quantità nell'output di 61,54g/m<sup>2</sup>, la quale determina un abbattimento di 226,84g/m<sup>2</sup>.

Leggermente inferiori, ma comunque molto simili a quelli relativi al COD, sono gli indici percentuali di depurazione in termini di massa, i quali per *mentha*, *oenanthe* e *lysimachia* sono rispettivamente nell'ordine dell'80,02%, 82,22% e 78,66%, per cui molto vicini tra loro.

Anche questa volta il grafico nella figura 72 mostra delle curve cumulate, che presentano un'evoluzione nel tempo come nell'immagine precedente (figura 71).

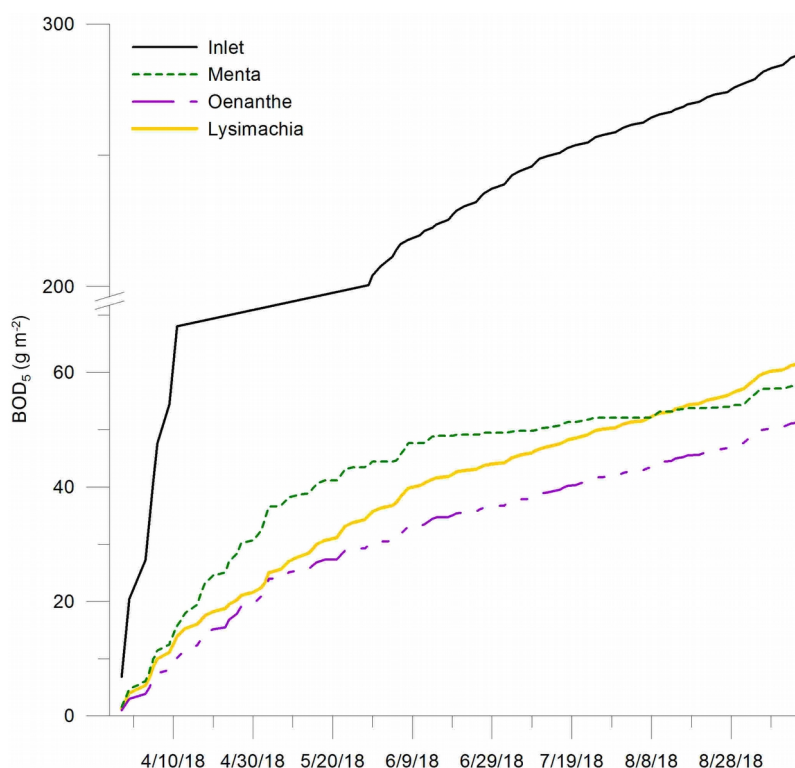


Figura 72: Quantità per unità di superficie di sostanza organica (BOD<sub>5</sub>), in entrata e uscita dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.

### 3.4.2 TENSIOATTIVI ANIONICI

La riduzione dei tensioattivi è molto buona. Attraverso l'acqua di scarico in entrata, nell'impianto ne sono stati immessi  $17,85\text{g/m}^2$ .

*Mentha* si caratterizza per il raggiungimento di una performance depurativa dell'87,48%, grazie ad un contenuto cumulato di tensioattivi, nell'acqua scaricata dall'impianto, di solo  $2,23\text{g/m}^2$ , perciò rimuovendo  $15,62\text{g/m}^2$ . Non da meno sono le altre due specie vegetali: *oenanthe* dimostra una quantità nell'output di  $2,47\text{g/m}^2$ , garantendo un abbattimento di  $15,38\text{g/m}^2$  ed una performance dell'86,18%; mentre *lysimachia* sembra essere leggermente meno efficiente (80,13%), per un reflu di uscita contenente  $3,55\text{g/m}^2$  di MBAS (rimozione netta:  $14,30\text{g/m}^2$ ).

Questi dati confermano i risultati ottenuti prendendo in considerazione le diverse concentrazioni misurate nel reflu, anche se in quel caso, le migliori prestazioni sono state raggiunte nelle linee dove sono insediate le piante di *oenanthe*.

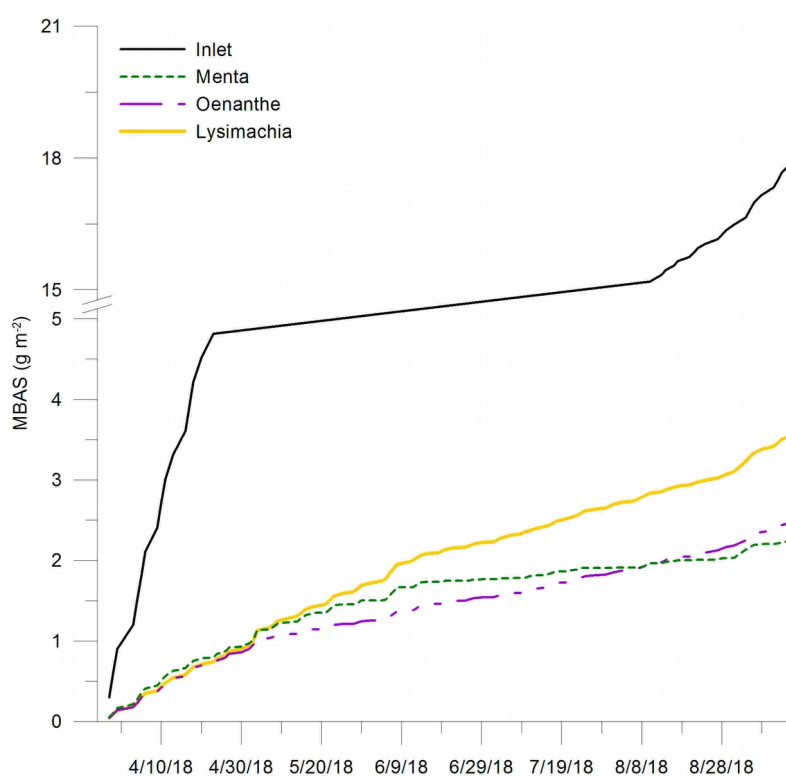


Figura 73: Quantità per unità di superficie di tensioattivi anionici (MBAS), in entrata e uscita dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.

### 3.4.3 AZOTO

Così come nel paragrafo 3.3.4 sono state calcolate le quantità cumulate nel tempo per l'azoto Kjeldahl (TKN), l'azoto nitroso ( $\text{N-NO}_3$ ) e l'azoto ammoniacale ( $\text{N-NH}_4$ ).

Del primo, il contenuto cumulato presente nel refluo in ingresso è nell'ordine di  $30,32\text{g/m}^2$ . Nel refluo in uscita si osserva una riduzione del parametro in tutte e tre le specie vegetali, in particolare per *mentha* ( $5,77\text{g/m}^2$ ), segue poi *oenanthe* ( $10,98\text{g/m}^2$ ) e infine *lysimachia* ( $15,17\text{g/m}^2$ ). Queste garantiscono il raggiungimento di una performance depurativa, rispettivamente dell'80,96%, del 63,78% e del 49,97%, visto che il contenuto di azoto rimosso assume un valore di  $24,55\text{g/m}^2$  per *mentha*, di  $19,33\text{g/m}^2$  per *oenanthe* e di  $15,15\text{g/m}^2$  per *lysimachia*.

I dati appena descritti in termini di massa per unità di superficie, rispecchiano bene quanto visto nel paragrafo 3.3.4, dove sono stati trattati i risultati, relativi a questa forma azotata, in termini di concentrazione in input ed output.

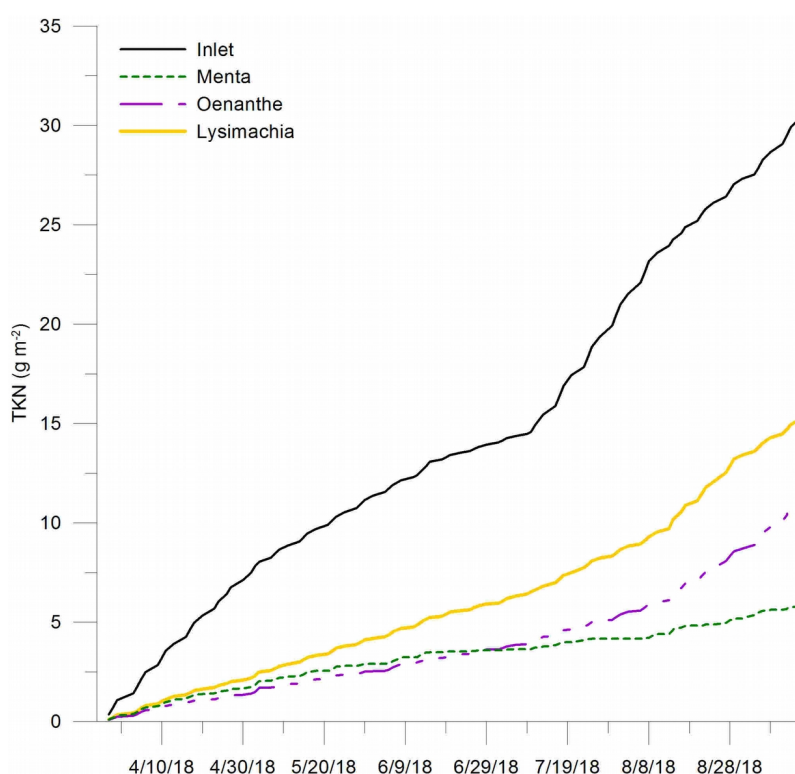


Figura 74: Quantità per unità di superficie di azoto Kjeldahl (TKN), in entrata e uscita dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.

Assente è il contenuto di azoto nitroso nelle acque di scarico in input, mentre viene rilevato in uscita dall'impianto, perché in parte apportato dalle acque meteoriche ( $0,04\text{g/m}^2$ ) ed in parte formato all'interno delle vasche dell'impianto di fitodepurazione.

I contenuti maggiori, quasi uguali tra loro, sono registrati dove sono state messe a dimora le piante di *oenanthe* ( $0,310\text{g/m}^2$ ) e *lysimachia* ( $0,308\text{g/m}^2$ ). Di contro, il refluo in uscita dalle linee 1 e 4, vegetate con *mentha*, contiene solamente  $0,012\text{g/m}^2$ .

Per cui, in queste ultime, tenendo conto del nitrato apportato dalla pioggia al sistema, si può osservare una rimozione netta nel tempo di  $0,03\text{g/m}^2$ , garantendo un indice percentuale di depurazione che si attesta su un valore di 71,16%

L'incremento improvviso che si verifica nel mese di agosto (figura 75), è causato dalla riduzione dell'attività vegetativa delle piante, dovuto al clima caldo e siccitoso, il quale, in particolare per *oenanthe* e *lysimachia*, ha provocato una diminuzione dell'assorbimento di questa sostanza. Lo stesso avviene anche per *mentha* sebbene in misura molto più limitata.

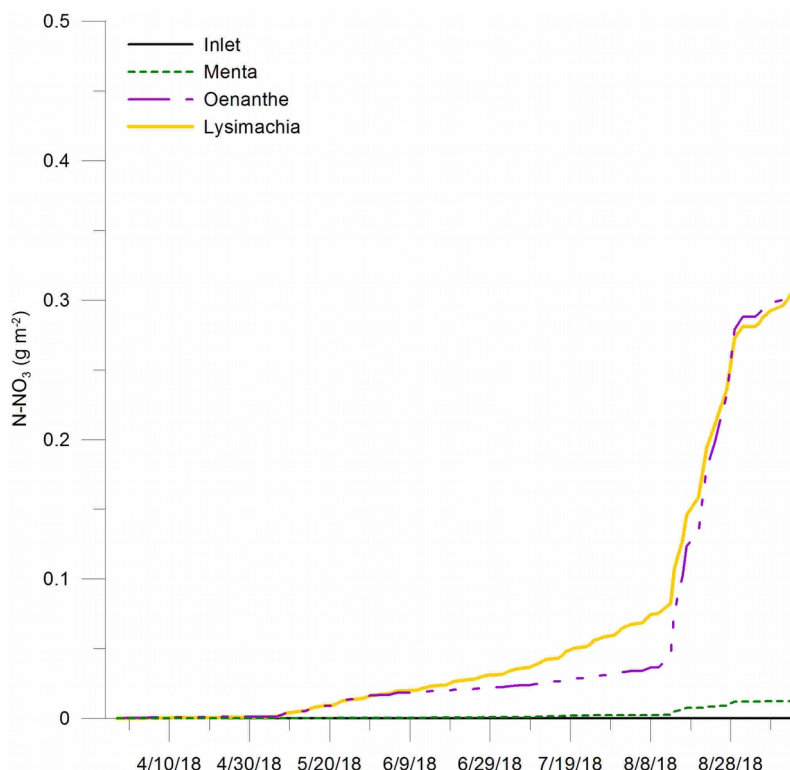


Figura 75: Quantità per unità di superficie di azoto nitroso ( $\text{N-NO}_3$ ), in entrata e uscita dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.

In seguito, esaminando l'azoto ammoniacale, la situazione si inverte, perché in questo caso si verifica una diminuzione abbastanza variabile del contenuto in entrata all'impianto che misura  $11,15\text{g/m}^2$ . Viceversa, in uscita è di  $2,86\text{g/m}^2$  per *mentha*,  $4,46\text{g/m}^2$  per *oenanthe* e  $6,85\text{g/m}^2$  per *lysimachia*.

A differenza di quanto visto per i dati relativi alle concentrazioni di questa forma azotata, nell'acqua reflua, dove le piante di *oenanthe* hanno dimostrato un'efficienza depurativa più elevata, qui è *mentha* a garantire i migliori risultati. Il suo indice di rimozione medio percentuale è del 74,37%, con una diminuzione netta di  $8,29\text{g/m}^2$ .

Minori risultano le prestazioni raggiunte nelle linee 2 e 5 (*oenanthe*), le quali sono nell'ordine del 59,97%, grazie ad un abbattimento cumulato di  $6,69\text{g/m}^2$ , mentre *lysimachia* si conferma ancora come la specie meno indicata rispetto alle altre, rimuovendo  $4,30\text{g/m}^2$  con una percentuale di depurazione del 38,57%.

Nell'influenzare i risultati, risulta sempre determinante la differente capacità di ridurre i volumi di refluo da parte delle diverse specie.

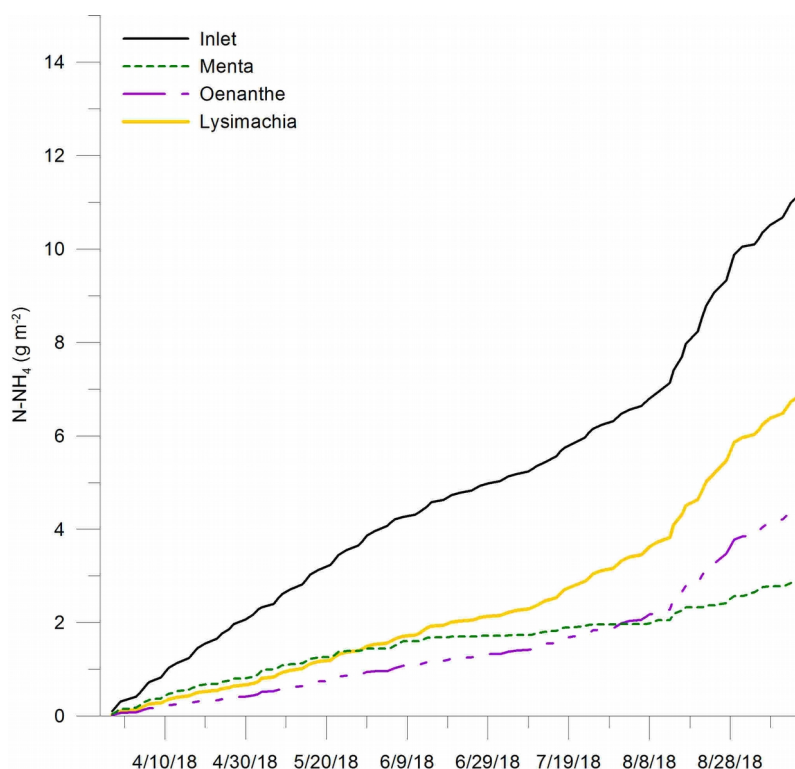


Figura 76: Quantità per unità di superficie di azoto ammoniacale ( $N-NH_4$ ), in entrata e uscita dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.

#### 3.4.4 FOSFORO

La rimozione dell'ortofosfato ( $P-PO_4$ ), è molto differente a seconda della specie vegetale considerata. Addirittura nelle vasche vegetate con *lysimachia*, durante il periodo di monitoraggio, si verifica un accumulo di  $1,05g/m^2$ , di questa sostanza. Infatti nel refluo in uscita è stato misurato un contenuto pari a  $7,33g/m^2$ , rispetto all'acqua di scarico in ingresso, la quale immette una quantità di  $6,28g/m^2$ .

Quasi in pari è il bilancio di massa ottenuto sulle linee dove è presente *oenanthe*, perché la rimozione ha un valore di  $0,23g/m^2$ , con un contenuto di  $P-PO_4$  misurato di  $6,06g/m^2$  ed una percentuale di rimozione di massa che si attesta al 3,60%.

Infine *mentha*, così come nel caso dell'azoto nitroso, riesce a rimuovere ben  $1,63g/m^2$  (25,97%), grazie ad un contenuto nel refluo in output di  $4,65g/m^2$ .

Nel caso di *mentha* si osserva una correlazione tra le performance depurative di rimozione di questo parametro e lo sviluppo vegetativo in termini di biomassa (peso fresco  $g/m^2$ ), determinata tramite l'analisi della regressione lineare, con un coefficiente di determinazione ( $r^2$ ) pari a 0,85. Questi dati sul contenuto in massa, differiscono da quelli espressi in termini di concentrazione, dato che in quel caso si può osservare che avviene solo un aumento del fosforo nell'acqua reflua all'uscita dall'impianto di fitodepurazione.



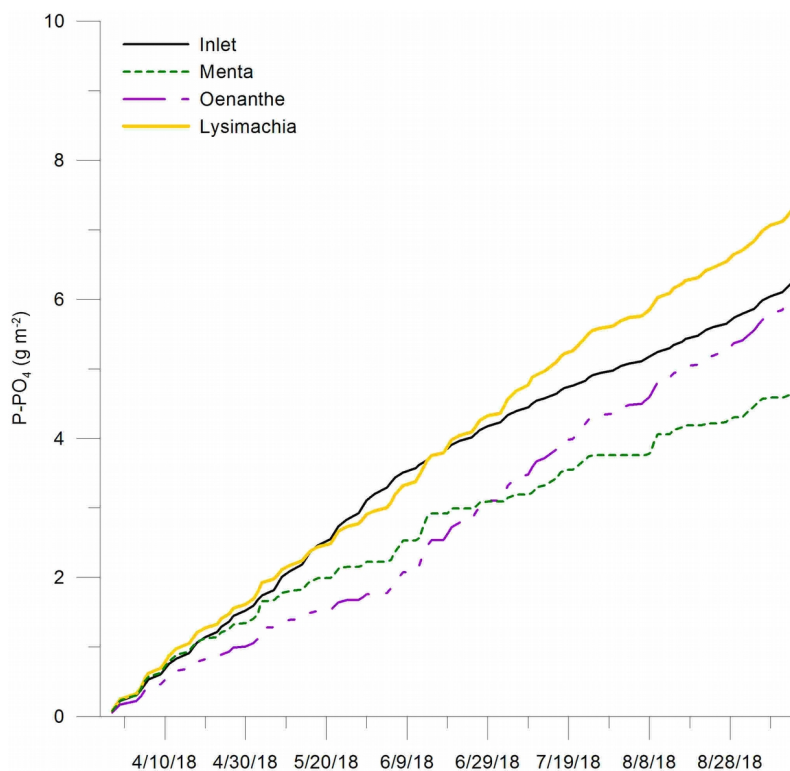


Figura 77: Quantità per unità di superficie di ortofosfato ( $P-PO_4$ ), in entrata e uscita dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.

Esaminando il fosforo totale, è stato misurato un contenuto nelle acque di scarico in input pari a  $21,04\text{g/m}^2$ . Molto simili risultano i valori di output sulle linee vegetate con *oenanthe* ( $15,82\text{g/m}^2$ ) e *lysimachia* ( $15,45\text{g/m}^2$ ), invece in uscita da *mentha* il valore è di  $8,63\text{g/m}^2$ .

Infatti quest'ultima, grazie ad un abbattimento netto di  $12,40\text{g/m}^2$ , è capace di fornire una prestazione depurativa del 58,96%. La potenzialità di rimozione è ridotta per più della metà sia nel caso di *oenanthe* che ha un valore del 24,77% (rimozione netta di  $5,21\text{g/m}^2$ ) sia per *lysimachia*, la quale dimostra una capacità di riduzione pari al 26,55% (rimozione netta di  $5,58\text{g/m}^2$ ).

Un aspetto particolare, evidenziato nel grafico delle figura 78, è che il refluo di *oenanthe*, fino alla fine del mese di giugno, ha un contenuto cumulato minore rispetto alle altre linee, il quale poi subisce un incremento tale, da superare la quantità di fosforo totale presente nelle linee dove si trova *lysimachia*. Questo fatto è da imputare probabilmente alla riduzione dell'attività vegetativa delle piante di *oenanthe*, a seguito del loro disseccamento della parte aerea, le cui cause sono da attribuire al caldo intenso ed alla maturazione dei semi, prodotti dopo la fioritura.

A discapito di quanto analizzato in termini di concentrazione, dove l'input era simile all'output, in questo caso si verifica una sostanziale riduzione del contenuto di fosforo in tutte le linee dell'impianto di fitodepurazione.

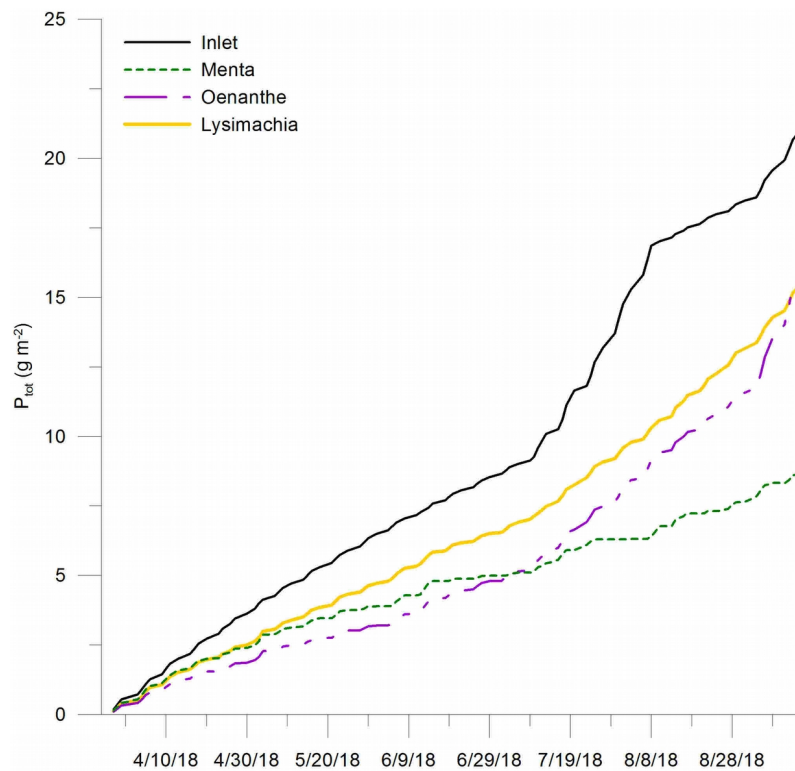


Figura 78: Quantità per unità di superficie di fosforo totale ( $P_{tot}$ ), in entrata e uscita dall'impianto, cumulata per l'intero periodo di monitoraggio.

Osservando i grafici del bilancio di massa di tutti i parametri analizzati, si può notare che il refluo delle vasche sulle quali si trova *mentha*, all'inizio del monitoraggio, ha le quantità più elevate, per poi mostrare a fine stagione i contenuti minori.

Ciò è da imputare alla più lenta ripresa vegetativa che ha caratterizzato questa specie, la quale però, a differenza delle altre piante, si distingue per una maggiore attività a fine stagione.

### 3.5 VEGETAZIONE

La valutazione qualitativa della vegetazione, durante l'intero arco di tempo nel quale è stato svolto il monitoraggio del sito sperimentale, permette di osservare uno sviluppo differente tra le varie specie vegetali, nonché una loro diversa adattabilità alle caratteristiche dell'acqua reflua con il quale viene alimentato l'impianto di fitodepurazione, oggetto della tesi.

#### 3.5.1 FENOLOGIA E SVILUPPO VEGETATIVO

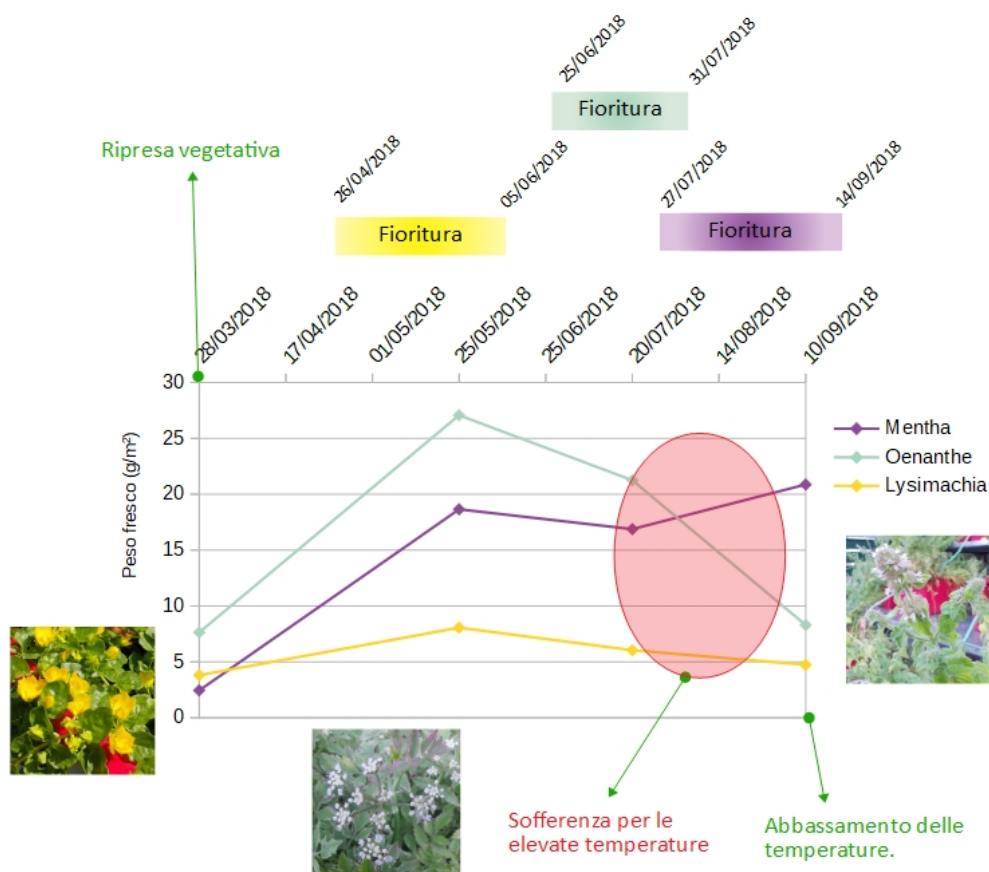


Figura 79: Sviluppo vegetativo e ciclo fenologico delle tre specie vegetali, messe a dimora nell'impianto. Il peso fresco ( $\text{g/m}^2$ ) di ogni pianta è calcolato come media di tutti i livelli dell'impianto.



La ripresa vegetativa delle piante, messe a dimora l'anno precedente, inizia dalla metà del mese di marzo. Sotto questo aspetto *mentha* si è dimostrata più lenta rispetto alle altre specie.

Da questo momento in poi, le piante dimostrano un buon sviluppo dell'apparato epigeo, ma con un incremento che si differenzia in base al livello considerato. Il 17/04/2018, *mentha* dimostra rapidi accrescimenti nel livello "Up", i quali diminuiscono nei livelli sottostanti. Invece *oenanthe* e *lysimachia* risultano più sviluppate nel livello intermedio ed anche se in misura minore, sulle vasche del piano "Down".

Figura 80: Ripresa vegetativa delle piante nel mese di marzo.

Di contro, entrambe, appaiono stentate nel livello superiore.

Nei giorni seguenti, a partire dalle vasche del livello "Med", si ha l'inizio della fioritura delle piante di *lysimachia*.

Successivamente, ad un ulteriore esame visivo eseguito il 01/05/2018, tutte le piante dimostrano una dimensione maggiore, mantenendo la dinamica di sviluppo tra i vari livelli, descritta in precedenza. Allo stesso tempo, la fioritura di *lysimachia* si estende anche al livello inferiore, mentre, la vegetazione del livello più alto, oltre a non sviluppare fiori, mostra degli accartocciamenti delle foglie che in parte disseccano e cadono.

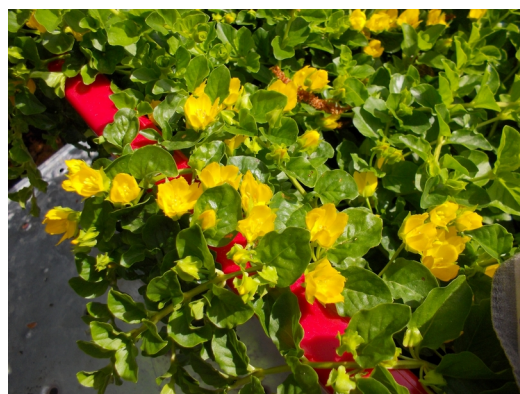


Figura 81: Particolare della fioritura di *lysimachia*.



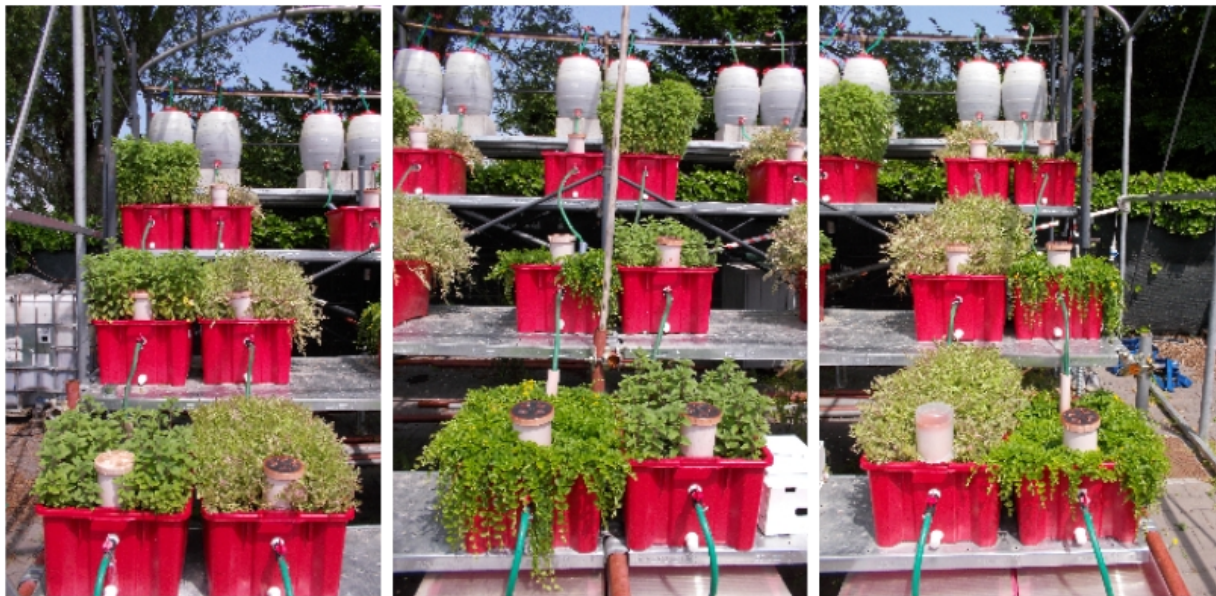


Figura 82: Sviluppo della vegetazione in data 08/05/2018. A sinistra linea 1-2; al centro linea 3-4; a destra linea 5-6.

Un aspetto particolare osservato nei letti vegetati con *oenanthe*, è che questa cresce maggiormente nella parte posteriore della vasca, nei pressi del punto di ingresso del refluo, forse a causa della maggiore ossigenazione dell'acqua di scarico in quel punto.

Al 25/05/2018, data nel quale è stato effettuato il secondo prelievo della vegetazione per la determinazione della biomassa, la situazione si mantiene piuttosto simile a quanto analizzato in precedenza.

Per di più, anche nella vasca sei del livello "Up", occupata da *lysimachia*, si verifica una parziale fioritura, la quale, così come per le altre vasche, si protrae ancora per circa una settimana.



Figura 83: Sviluppo della vegetazione nel mese di giugno. A sinistra linea 1-2; al centro linea 3-4; a destra linea 5-6.





Figura 84: Particolare della fioritura di *oenanthë* e morte della pianta di *lysimachia* nella vasca "UP linea 3".

Circa un mese dopo, inizia la fioritura di *oenanthë*, copiosa nei livelli "Med" e "Down", invece scarsa nel livello "Up". Allo stesso tempo si verifica la morte di una pianta di *lysimachia*, già da parecchio tempo sofferente, nella vasca tre del livello superiore, a causa di un eccessivo abbassamento del livello del refluo all'interno del letto vegetato. Infatti, questa specie, per la presenza di un ridotto sviluppo dell'apparato radicale, si è dimostrata particolarmente sensibile anche a leggere fluttuazioni nel livello del refluo nelle vasche.

Infine, le piante di *mentha* risultano tutte sane e rigogliose, mantenendo nel complesso un buon sviluppo vegetativo, il quale subisce un incremento anche nei livelli inferiori.

In seguito, a partire dal 20/07/2018, a causa dell'aumento della temperatura atmosferica, si verifica una riduzione generale dell'accrescimento della vegetazione, con il manifestarsi di disseccamenti diffusi della parte aerea e parziale perdita delle foglie in tutte le piante. Tutto ciò, favorito molto probabilmente anche dai piccoli spazi nei quali le piante sono costrette a vivere.

*Mentha*, inizia a fiorire il 27/07/2018, soprattutto nel livello superiore ed intermedio. Quasi contemporaneamente termina il periodo di fioritura di *oenanthë*. Pochi giorni dopo, sempre nella linea 3, ma questa volta sul livello intermedio si ha la morte di una seconda pianta di *lysimachia* il 06/08/2018.



Figura 85: Immagine della fioritura di *mentha*, della morte della pianta di *lysimachia* nella vasca "MED linea 3" e delle condizioni della vegetazione a fine luglio (linea 5-6).



Poi, in data 14/08/2018, la vegetazione mostra un generale stato di deperimento per le alte temperature e per l'elevata evaporazione d'acqua dalle vasche. Da questo punto di vista, *mentha* dimostra una maggiore resistenza rispetto alle altre specie, tollerando in numerose occasioni, per qualche giorno, la totale assenza di acqua reflua all'interno della vasca.

In questo periodo, le piante di *oenanthe*, a seguito della formazione e maturazione dei semi, prodotti dopo la fioritura, subiscono la totale defogliazione e senescenza dei fusti che hanno portato le infiorescenze.



Al termine del monitoraggio, complice il ritorno di condizioni climatiche più miti, si rileva una buona ripresa della vegetazione. In particolare, per *oenanthe*, la quale rigermoglia completamente alla base, a partire dai numerosi rizomi e stoloni prodotti nel corso della stagione vegetativa ed in breve tempo, ricopre l'intera superficie del letto vegetato.

Infine, la fioritura di *mentha*, seppur ridotta, continua in modo costante, anche a seguito del termine del periodo di rilevazione

Figura 86: Miglioramento delle condizioni delle piante a settembre.

dei dati.

Altro aspetto da sottolineare, è che le piante di *mentha* sono interessate nel corso della stagione, da numerosi attacchi da parte di parassiti, come afidi e cocciniglie. Diversamente, *lysimachia* subisce solamente una forte infestazione da parte di *Metcalfa pruinosa* nel mese di agosto, mentre in *oenanthe* non sono notati problemi degni di nota.

Riguardo lo sviluppo di insetti indesiderati nel sistema di fitodepurazione, soprattutto di zanzare, va riportato che i principali problemi sono riscontrati nelle vasche vegetate con *lysimachia*, nelle quali è osservata una forte presenza sia di insetti adulti, che di larve all'interno dell'acqua reflua.

Invece, la loro presenza è molto minore, dove sono insediate le altre due specie, probabilmente per il maggior profumo aromatico emesso dalle piante stesse.

In definitiva, nella tabella seguente sono riassunte le peculiarità di ciascuna specie oggetto di studio.

| CARATTERISTICA                     | SPECIE                                                                              |                                                                                     |                                                                                       |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    | <u>Mentha</u>                                                                       | <u>Oenanth</u>                                                                      | <u>Lysimachia</u>                                                                     |
| Ripresa vegetativa                 |    |    |    |
| Sviluppo vegetativo                |    |    |    |
| Vigoria                            |    |    |    |
| Dimensioni                         |    |    |    |
| Copertura della vasca              |    |    |    |
| Lunghezza del periodo di fioritura |    |    |    |
| Adattabilità al refluo             |    |    |    |
| Tolleranza alle alte temperature   |    |    |    |
| Tolleranza allo stress idrico      |    |    |    |
| Resistenza al vento                |   |   |   |
| Resistenza alle malattie           |  |  |  |
| Formazione di insetti indesiderati |  |  |  |
| Aromaticità                        |  |  |  |
| Capacità di attirare insetti utili |  |  |  |
| <u>Ornamentalità</u>               |  |  |  |

Tabella 20: Aspetti positivi e negativi di ciascuna specie.

In definitiva, si può stabilire che le piante di *mentha* si adattano meglio a vivere nei livelli superiori dell'impianto, con un refluo caratterizzato da: una minore salinità, un pH più basso e un maggior carico di sostanze inquinanti, non ancora degradate. Invece per *lysimachia* ed *oenanthe* avviene il contrario.

### 3.5.2 BIOMASSA VEGETALE

Lo studio della biomassa, misurata come peso fresco per unità di superficie ( $\text{g/m}^2$ ), prodotta da ciascuna specie nei tre livelli dell'impianto, pone ulteriore conferma alle osservazioni qualitative descritte nel paragrafo precedente.

| Data       | Specie            | Up                  | Med                | Down               | Media         |
|------------|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 28/03/2018 | <u>Mentha</u>     | 4,006 $\pm$ 1,510   | 2,268 $\pm$ 0,772  | 1,075 $\pm$ 0,403  | 2,450         |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 4,066 $\pm$ 1,065   | 13,017 $\pm$ 3,504 | 5,822 $\pm$ 0,509  | 7,635         |
|            | <u>Lysimachia</u> | 2,947 $\pm$ 1,551   | 6,109 $\pm$ 0,706  | 2,370 $\pm$ 0,283  | 3,809         |
| 25/05/18   | <u>Mentha</u>     | 26,940 $\pm$ 3,207  | 18,386 $\pm$ 3,570 | 10,626 $\pm$ 2,352 | 18,651        |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 16,501 $\pm$ 6,018  | 35,349 $\pm$ 0,781 | 29,362 $\pm$ 5,518 | 27,071        |
|            | <u>Lysimachia</u> | 4,055 $\pm$ 1,568   | 9,596 $\pm$ 0,806  | 10,537 $\pm$ 2,612 | 8,063         |
| 20/07/2018 | <u>Mentha</u>     | 23,275 $\pm$ 1,167  | 14,717 $\pm$ 3,925 | 12,653 $\pm$ 1,755 | 16,882        |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 6,072 $\pm$ 1,808   | 30,653 $\pm$ 3,897 | 27,038 $\pm$ 3,125 | 21,254        |
|            | <u>Lysimachia</u> | 2,755 $\pm$ 2,755   | 8,017 $\pm$ 0,074  | 7,361 $\pm$ 0,664  | 18,133        |
| 10/09/2018 | <u>Mentha</u>     | 38,237 $\pm$ 11,386 | 16,956 $\pm$ 4,071 | 7,421 $\pm$ 0,567  | 20,871        |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 2,123 $\pm$ 0,630   | 8,370 $\pm$ 1,283  | 14,393 $\pm$ 0,603 | 8,295         |
|            | <u>Lysimachia</u> | 3,395 $\pm$ 3,395   | 3,696 $\pm$ 3,696  | 7,147 $\pm$ 3,072  | 4,746         |
| Media      | <u>Mentha</u>     | 23,115              | 13,082             | 7,944              | <b>14,714</b> |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 7,191               | 21,847             | 19,154             | <b>16,064</b> |
|            | <u>Lysimachia</u> | 3,288               | 6,855              | 6,854              | <b>8,688</b>  |

Tabella 21: Biomassa vegetale espressa come peso fresco per unità di superficie ( $\text{g/m}^2$ ).

| Effetto              | SS       | g.d.l. | MS       | F     | p         |
|----------------------|----------|--------|----------|-------|-----------|
| Livello              | 4606     | 2      | 2303     | 4.35  | p = 0.048 |
| Specie               | 6.19E+04 | 2      | 3.09E+04 | 58.43 | p < 0.001 |
| Livello*Specie       | 7.58E+04 | 4      | 1.89E+04 | 35.79 | p < 0.001 |
| Tempo                | 7.06E+04 | 3      | 2.35E+04 | 25.75 | p < 0.001 |
| Tempo*Livello        | 1.18E+04 | 6      | 1971     | 2.16  | p = 0.079 |
| Tempo*Specie         | 4.99E+04 | 6      | 8319     | 9.1   | p < 0.001 |
| Tempo*Livello*Specie | 2.18E+04 | 12     | 1820     | 1.99  | p = 0.067 |

Tabella 22: Analisi statistica del peso fresco (SS: devianza; g.d.l.: gradi di libertà; MS: Varianza; F: Valore del Test F; p: livello di probabilità).

A seguito dell'analisi statistica eseguita sui dati della tabella 21, si può affermare, ad un livello di confidenza  $p = 0.048$ , che sono presenti differenze significative tra i vari livelli dell'impianto. Non significative, invece, le interazioni "Tempo x Livello" ( $p = 0.079$ ) e "Tempo x Livello x Specie" ( $p = 0.067$ ).

Invece, prendendo in considerazione l'effetto "Specie", si può stabilire con un livello di probabilità inferiore all'1%, che *mentha* ed *oenanthe* si differenziano da *lysimachia*, ma non tra di loro. Infatti, la media di tutti i dati raccolti durante il monitoraggio, senza quindi tenere conto delle differenze tra i vari livelli e tra le date in cui è stato eseguito il prelievo della vegetazione, ci permette di osservare come *oenanthe* faccia registrare il peso fresco più alto ( $16,064 \text{g/m}^2$ ). Poca differenza viene riscontrata con *mentha*, la quale si attesta su un valore di  $14,714 \text{g/m}^2$ . Di contro il peso medio di *lysimachia* ( $8,688 \text{g/m}^2$ ) risulta essere di poco superiore alla meta della biomassa delle specie precedenti.

Anche la variabile “Tempo” denota delle differenze significative di biomassa ad un livello di significatività  $p < 0,001$ . In particolare, i dati del primo prelievo sono diversi da tutti gli altri, soprattutto in riferimento a quelli del 25/05/2018 e del 20/07/2018, tra i quali non ci sono disuguaglianze.

I valori del 25 maggio si discostano in maniera molto significativa dalle pesate eseguite il 28/03/2018 ed in misura minore da quelle fatte il 10/09/2018, mentre il peso fresco del 20/07/2018 è diverso solo dal peso del primo campionamento.

La biomassa raccolta il 10/09/2018 presenta una forte disuguaglianza solamente dalle prime due date in cui è stata prelevata la vegetazione, mentre è simile al 20/07/2018.

Inoltre, valutando l'effetto “Livello x Specie” è stata provata una divergenza statistica con un livello di confidenza  $p < 0,001$ . In effetti i pesi mostrano che *mentha* presenta una biomassa sempre crescente dal livello inferiore a quello superiore. Le misure eseguite nelle linee in cui sono insediate le piante di *oenanthe*, hanno dimostrato, che nel livello “Med” la vegetazione si sviluppa in modo maggiore. Per ultima, *lysimachia*, ha un peso fresco molto basso sul livello più alto, il quale dimostra uno sviluppo stentato in tutte le vasche nel quale è stato effettuato il prelievo della parte aerea, mentre pesi leggermente superiori, si riscontrano negli altri due livelli.

Valutando le differenze tra le varie tipologie di piante, si può notare che *mentha* è la specie che meglio si adatta a vivere nel livello in cima al sistema di fitodepurazione.

Il peso fresco più elevato, nel livello intermedio, è dato dalle piante di *oenanthe*, a parte nell'ultimo campionamento, dove a causa del deperimento delle piante di *oenanthe*, prevale *mentha*.

Dopodichè, nel livello “Down”, prevale sempre *oenanthe*, mentre *mentha* e *lysimachia* si equivalgono.

Un'ulteriore differenza significativa con un livello di probabilità dell'1% si osserva esaminando la variabile “Tempo\*Specie”.

Prima di tutto il peso fresco di *mentha* assume uno scarto costante tra di se in tutte le date di campionamento. Di contro, *lysimachia* non presenta differenze nei suoi valori tra i vari prelievi eseguiti durante il monitoraggio. *oenanthe* dimostra un peso al 28/03/2018 simile al 10/09/2018 ed entrambi, allo stesso tempo, divergono dai pesi rilevati il 25/05/2018 e il 20/07/2018. Tuttavia, questi ultimi non hanno tra loro una difformità significativa.

Per ultimo, i dati di biomassa, tra le varie specie vegetali impiegate non sono significativamente diversi, solamente il 28/03/2018.

| Data       | Specie            | Up            | Med           | Down          | Media        |
|------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| 28/03/2018 | <u>Mentha</u>     | 0,472 ± 0,169 | 0,312 ± 0,058 | 0,158 ± 0,054 | 0,314        |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 0,465 ± 0,127 | 1,660 ± 0,375 | 0,867 ± 0,013 | 0,997        |
|            | <u>Lysimachia</u> | 0,725 ± 0,423 | 1,152 ± 0,102 | 0,620 ± 0,075 | 0,832        |
| 25/05/18   | <u>Mentha</u>     | 3,999 ± 0,736 | 2,868 ± 0,679 | 1,551 ± 0,343 | 2,806        |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 2,353 ± 0,838 | 4,472 ± 0,653 | 3,220 ± 0,806 | 3,348        |
|            | <u>Lysimachia</u> | 0,100 ± 0,387 | 2,079 ± 0,102 | 2,411 ± 0,528 | 1,530        |
| 20/07/2018 | <u>Mentha</u>     | 5,014 ± 0,311 | 3,083 ± 0,919 | 2,963 ± 0,456 | 3,687        |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 0,941 ± 0,398 | 4,505 ± 0,655 | 4,233 ± 0,384 | 3,226        |
|            | <u>Lysimachia</u> | 0,573 ± 0,573 | 1,743 ± 0,251 | 1,974 ± 0,201 | 1,430        |
| 10/09/2018 | <u>Mentha</u>     | 8,852 ± 2,776 | 3,772 ± 1,095 | 1,668 ± 0,143 | 4,764        |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 0,283 ± 0,106 | 0,816 ± 0,063 | 1,355 ± 0,161 | 0,818        |
|            | <u>Lysimachia</u> | 0,640 ± 0,640 | 0,650 ± 0,650 | 1,502 ± 0,538 | 0,931        |
| Media      | <u>Mentha</u>     | 4,584         | 2,509         | 1,585         | <b>2,893</b> |
|            | <u>Oenanthe</u>   | 1,011         | 2,863         | 2,419         | <b>2,097</b> |
|            | <u>Lysimachia</u> | 0,510         | 1,406         | 1,627         | <b>1,181</b> |

Tabella 23: Biomassa vegetale espressa come peso secco per unità di superficie (g/m<sup>2</sup>).

| Effetto              | SS   | G.d.l | MS    | F     | p         |
|----------------------|------|-------|-------|-------|-----------|
| Livello              | 72   | 2     | 35.9  | 1.61  | p = 0.25  |
| Specie               | 1297 | 2     | 648.5 | 29.06 | p < 0.001 |
| Livello*Specie       | 2193 | 4     | 548.2 | 24.57 | p < 0.001 |
| Tempo                | 1960 | 3     | 653.3 | 16.05 | p < 0.001 |
| Tempo*Livello        | 619  | 6     | 103.2 | 2.54  | p < 0.05  |
| Tempo*Specie         | 2181 | 6     | 363.5 | 8.93  | p < 0.001 |
| Tempo*Livello*Specie | 930  | 12    | 77.5  | 1.9   | p = 0.08  |

Tabella 24: Analisi statistica del peso secco (SS: devianza; g.d.l.: gradi di libertà; MS: Varianza; F: Valore del Test F; p: livello di probabilità).

Prendendo in considerazione i dati di biomassa espressi come peso secco per metro quadrato, non si riscontrano sostanziali differenze con il peso fresco descritto nella tabella 21.

Come si può vedere nella tabella 24, viene ulteriormente confermata, con un livello di confidenza  $p=0.25$ , la mancanza di differenze significative tra i vari livelli dell'impianto e questo vale anche per l'effetto "Tempo\*Livello\*Specie" ( $p=0.08$ ).

A differenza del peso fresco, la variabile "Tempo\*Livello" mostra una difformità ad un livello di probabilità del 5% ( $p<0.05$ ).

Per di più, analizzando la media totale dei valori e quindi l'effetto "Specie" ( $p<0.001$ ), si può stabilire che i dati di biomassa divergono tutti tra loro. Infatti il peso secco più alto è calcolato sulle piante di *mentha*, il quale misura  $2,893\text{g/m}^2$ . Dopodiché si trova *oenanthe* ( $2,097\text{g/m}^2$ ) e su *lysimachia* si riscontra sempre il valore minore, cioè  $1,181\text{g/m}^2$ .

Alla fine, esaminando l'effetto "Tempo" si è visto, contrariamente al peso fresco, che solo la biomassa raccolta il 28/03/2018 si discosta dai valori relativi alle altre date, le quali questa volta, non presentano fra loro differenze significative.

Risulta importante sottolineare, che *oenanthe* presenta, nei confronti di *mentha*, una biomassa vegetale più alta, analizzando il peso fresco, mentre si verifica il contrario osservando i dati relativi al peso secco. Questo potrebbe essere dovuto ad un maggiore contenuto di acqua presente nei tessuti delle piante di *oenanthe*.

### 3.6 CONFRONTO CON IL MONITORAGGIO DELL'ANNO 2017

Un confronto tra i risultati ottenuti in questo studio, e quelli ottenuti durante il monitoraggio effettuato nella stagione primaverile-estiva precedente (Boschiero, 2017), ha fatto emergere alcune differenze.

Innanzitutto, per quanto riguarda l'evoluzione nel tempo dei parametri chimico-fisici, l'unica dissomiglianza è rilevata nel pH. Prima di tutto, è da evidenziare il fatto che nel 2017, i valori di pH dell'acqua reflua in ingresso all'impianto, risultavano maggiori rispetto all'acqua in uscita, mentre nel 2018, avviene il contrario. Inoltre, dai risultati raccolti l'anno scorso, nei letti vegetati con *lysimachia* sono stati misurati i valori più elevati, di contro, quest'anno i dati più alti sono stati determinati nelle vasche dove è insediata *mentha*.

In seguito, le principali incongruenze, osservate esaminando le concentrazioni delle sostanze presenti nel refluo trattato sono riconducibili:

- alla sostanza organica (BOD<sub>5</sub>): nel 2017, *oenanthe* non si distingue statisticamente in maniera significativa dal refluo in input all'impianto, così come accade nel 2018; Probabilmente questa specie necessita di più tempo per dimostrare le proprie reali potenzialità depurative.
- ai tensioattivi anionici (MBAS): per i quali l'anno precedente, le piante di *mentha* permettevano il raggiungimento delle performance di rimozione migliori, a differenza di quest'anno in cui risulta la specie con una potenzialità di abbattimento più limitata, anche se bisogna considerare che è la pianta che concentra maggiormente il refluo scaricato nel sistema di fitodepurazione;
- all'azoto Kjeldahl (TKN): nel quale si verifica l'esatto contrario di quello che è stato appena descritto per i tensioattivi. Per di più, se nel 2017 le concentrazioni delle varie linee dell'impianto non erano diverse tra loro, nel 2018, si manifesta un leggero divario confermato dall'analisi statistica;
- all'azoto nitroso (N-NO<sub>3</sub>), dove quest'anno, *oenanthe* presenta una disuguaglianza significativa, nei confronti dell'acqua reflua in ingresso al sistema di fitodepurazione, mentre nel monitoraggio precedente, ciò non avviene, anche se la differenza è estremamente limitata;
- all'azoto ammoniacale, le cui concentrazioni determinate in questa tesi risultano circa dieci volte più elevate. Ciò può derivare dall'aumento del volume d'acqua utilizzata per alimentare l'impianto e quindi dal minor tempo nel quale questa rimane stoccata all'interno della cisterna, limitando così le perdite di azoto per denitrificazione.
- all'ortofosfato, dove nel 2017, tra le linee non c'è una differenza statistica significativa, però i dati di concentrazione sono maggiori, rispetto al 2018;

Poi, prendendo in considerazione le quantità cumulate delle sostanze, rilevate nelle acque di scarico immesse nel sito sperimentale, i risultati emersi da questo lavoro di ricerca si distinguono dall'altro, per questi ulteriori aspetti:

- *oenanthe*, si caratterizza per una potenzialità di abbattimento della sostanza organica migliore, a scapito di *mentha*, su entrambi i parametri analizzati in laboratorio (COD, BOD<sub>5</sub>);
- i valori di tensioattivi anionici, calcolati nel refluo in output, dalle vasche di *oenanthe* e *lysimachia*, sono meno simili tra loro;
- solo nelle vasche vegetate con *mentha* si nota una rimozione dell'azoto nitroso. Di contro per le altre due specie avviene un accumulo.



## 4 CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo lavoro è di determinare la capacità depurativa di un'innovativa tipologia di impianto di fitodepurazione. Questo, tramite il calcolo dei volumi di refluo che potenzialmente possono essere trattati, l'osservazione del diverso comportamento della vegetazione impiegata e mediante la valutazione della possibile applicabilità di questo sistema in un contesto più ampio.

Valutando le specie impiegate nell'impianto oggetto di ricerca, si può affermare che sia *mentha* sia *oenanthe* sono le specie che hanno fornito le prestazioni migliori, in termini di prestazioni, sviluppo e resistenza. Tenendo conto dei risultati ottenuti nel monitoraggio dell'anno precedente, si può inoltre notare come *mentha* sia in grado di rispondere in maniera immediata alle esigenze del sistema, mentre *oenanthe* necessita di più tempo per esprimere le proprie potenzialità.

Di contro *lysimachia* sembra essere meno adatta ad essere impiegata in questo contesto, poiché oltre a non essere in grado di fornire delle prestazioni così elevate, è soggetta ad una maggiore sensibilità alle caratteristiche del refluo ed alle condizioni climatiche. Per questo, nonostante il suo habitus di crescita estremamente adatto per questi impianti verticali, probabilmente il suo impiego potrebbe trovare maggiore successo in sistemi che depurano reflui con un carico inquinante minore.

In definitiva, le tre specie vegetali utilizzate si caratterizzano per una diversa adattabilità alle disomogenee condizioni del refluo, che variano da un livello all'altro. Inoltre, esse presentano uno sviluppo vegetativo diversificato, influenzato dalle differenti condizioni climatiche ed ambientali che si manifestano nel corso dell'anno.

Tutto questo, si ripercuote sullo stato di salute delle piante stesse e di conseguenza sulle performance di riduzione degli inquinanti, dell'intero sistema di fitodepurazione.

Ecco perché, durante la progettazione di un impianto di fitodepurazione, per mantenere delle alte rese depurative di quest'ultimo è necessario combinare l'utilizzo di più piante, in modo da sfruttare i vantaggi di ciascuna specie e realizzare dove possibile delle consociazioni specifiche all'interno dello stesso letto vegetato sulla base delle caratteristiche dell'acqua reflua da trattare.

L'associazione di piante diverse, le quali non devono ostacolarsi a vicenda, inserite negli stessi spazi consente di coprire le eventuali inefficienze, anche momentanee, che si possono verificare su una determinata pianta. Ad esempio di ciò, si riporta il ritardo nella ripresa vegetativa delle piante di *mentha*, sopperito dalle altre due specie, oppure la stasi nello sviluppo da parte di *oenanthe* e *lysimachia*, durante il periodo estivo, la quale ha interessato *mentha* in misura minore.

I risultati ottenuti dimostrano chiaramente la reale efficacia di questo sistema nell'abbattimento delle principali sostanze contenute nel refluo prodotto dalla mensa del campus universitario di Agripolis. Inoltre, rispetto all'anno precedente, nel corso di questo monitoraggio, l'impianto ha dimostrato una maggiore capacità di abbattimento, dovuta alla vegetazione insediata già da un anno.

Infatti le concentrazioni rilevate nelle acque reflue depurate, permettono a queste ultime di essere direttamente scaricate all'interno di corpi idrici superficiali senza essere sottoposte ad ulteriori trattamenti.

Ottima risulta anche la rimozione di massa delle principali sostanze analizzate nel monitoraggio, soprattutto nei confronti della sostanza organica e dei tensioattivi.

Tenuto conto di un volume di acqua grigia prodotto, pari a circa 2-5 litri per persona a pasto, l'impianto, con le sue dimensioni attuali di 2,84m<sup>2</sup> è in grado di gestire un volume di refluo

mediamente prodotto da 14 a 34 studenti al giorno. Di conseguenza se opportunamente dimensionato secondo una superficie compresa tra  $12,15\text{m}^2$  e  $39,30\text{m}^2$ , potrebbe potenzialmente trattare il refluo totale prodotto dai 191 studenti che mediamente pranzano ogni giorno alla mensa (circa  $247,00\text{L/gg}$ ), senza effettuare lo scarico nella rete fognaria.

Infine si può affermare che questo sistema di fitodepurazione intensificato, se opportunamente progettato e vegetato in base al contesto di applicazione, potrebbe rappresentare una valida soluzione per il trattamento dei reflui prodotti da singoli edifici o da piccoli agglomerati, allo stesso tempo riducendo i costi di manutenzione e gestione necessari per il suo funzionamento. Per il momento, non è stato possibile ottenere un'acqua di scarico, idonea al riutilizzo. Per questo è estremamente importante continuare questa sperimentazione, per vedere se nei prossimi anni, mediante una vegetazione sempre più sviluppata, è possibile raggiungere questo obiettivo di gestione sostenibile delle acque grigie.

## BIBLIOGRAFIA

Belli M., Centioli D., de Zorzi P., Sansone U., Capri S., Pagnotta R. e Pettine M. 2003. Metodi analitici per le acque. Roma: I.G.E.R. s.r.l.

Borin M. 2003. Fitodepurazione: soluzioni per il trattamento dei reflui con le piante. Bologna: Edagricole.

Boschiero M. 2017. Prestazioni di un sistema di fitodepurazione a cascata per il trattamento di acque grigie. Tesi di Laurea magistrale. Università degli Studi di Padova, a.a. 2017-2018.

Cirelli G.L. 2003. I trattamenti naturali delle acque reflue urbane: fitodepurazione, lagunaggio, accumulo in serbatoi, aggiornato al D.M. Ambiente 12 Giugno 2003 n. 185. Napoli: Esselibri

Cristina S.C. Calheiros, Vânia S. Bessa, Raquel B.R. Mesquita, Hans Brix, António O.S.S. Rangel e Paula M.L. Castro. 2015. Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*. Volume 79, pag 1-7.

Dalla Fior G. 1985. La nostra flora. Guida alla conoscenza della flora della regione Trentino-Alto-Adige. Trento: casa editrice G.B. Monauni.

Dixit A., Dixit S. e Goswami C.S. 2011. Process and plants for wastewater remediation: a review. *Scientific Reviews and Chemical Communications*. Volume 1, pag 71-77.

Donner E., Eriksson E., Revitt D.M., Scholes L., Holten Lützhøf H.C., Ledin A. 2010. Presence and fate of priority substances in domestic greywater treatment and reuse systems. *Science of the Total Environment*. Volume 408, pag 2444-2451.

Ferrari M., Marcon E., Menta A., Marconi M., Ferrari G. e Zanichelli F. 2001. Ecologia del paesaggio ed ecologia applicata. Bologna: Edagricole.

Ghunmi A.L., Zeeman G., Fayyad M. e van Lier J.B. 2011. Grey water treatment systems: a review. *Environmental Science and Technology*. Volume 41, pag 657-698.

Kadlec R. H., Wallace S. 2008. Treatment wetlands. Florida: CRC press.

Leal L.H., Temmink H., Zeeman G. e Buisman C.J.N. 2011. Characterization and anaerobic biodegradability of grey water. *Desalination*. Volume 270, pag 111-115.

Li F., Wichmann K. e Otterpohl R. 2009. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment*. Volume 407, pag 3439-3449.

Masotti L. e Verlicchi P. 2005. Depurazione delle acque di piccole comunità. Tecniche naturali e tecniche impiantistiche. Milano: Hoepli

Otterpohl R. 2002. Options for alternative types of sewerage and treatment systems

directed to improvement of the overall performance. *Water Science Technology*. Volume 45, pag. 149-158.

Pignatti S. 1982. *Flora d'Italia*. Bologna: Edagricole.

Romagnolli F., Ferrari S., Spaggiari R. e Garuti G. 2002. *Manuale di Fitodepurazione*. Reggio Emilia: Tipografia S. Martino.

Salvati S., Bianco A., Bardasi G., Cecilia M., de Mattia M.C., Giovannelli L., Canepel R. e Natalia M.C. 2012. *Guida tecnica per la progettazione e gestione dei sistemi di fitodepurazione per il trattamento delle acque reflue urbane*. Roma: ISPRA Editoria.

Scheumann R., Masi F., El Hamouri B. e Kraume M. 2009. Greywater treatment as an option for effective wastewater management in small communities. *Desalination and Water Treatment*. Volume 4, pag 1-3.

Tamiazzo J., Breschigliaro S., Salvato M. e Borin M. 2015. Performance of a wall cascade constructed wetland treating surfactant-polluted water. *Environmental Science and Pollution Research International*. Volume 22, pag 12816-12828

Vera I., García J., Sáez K., Moragas L. e Vidal G. 2011. Performance evaluation of eight years experience of constructed wetland systems in Catalonia as alternative treatment for small communities. *Ecological Engineering*. Volume 37, pag 364-371.

Vymazal J. 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*. Volume 35, pag 1–17.

Wu F.Y., Chung A.K.C., Tam N.F.Y. e Wong, M.H. 2012. Root exudates of wetland plants influenced by nutrient status and types of plant cultivation. *International Journal of Phytoremediation*. Volume 14, pag. 543-553.

Zapater M., Gross A. e Soares M.I.M. 2011. Capacity of an on-site recirculating vertical flow constructed wetland to withstand disturbances and highly variable influent quality. *Ecological Engineering*. Volume 37, pag 1572-1577

Zeeman G., Kujawa K., de Mes T., Hernandez L., de Graaff M., Abu-Ghunmi L., Mels A., Meulman B., Temmink H., Buisman C., van Lier J. e Lettinga G. 2008. Anaerobic treatment as a core technology for energy, nutrients and water recovery from source-separated domestic waste(water). *Water Science Technology*. Volume 57, pag 1207-1212.

2006. Decreto legislativo 03/04/2006 n. 152. Norme in materia ambientale. *Gazzetta Ufficiale* n. 88, supplemento ordinario n. 96, 14 Aprile.

2012. Decreto del Presidente della Repubblica 19/10/2011 n. 227. Regolamento per la semplificazione di adempimenti amministrativi in materia ambientale gravanti sulle imprese, a norma dell'articolo 49, comma 4-quater, del decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122. *Gazzetta Ufficiale* n. 28, 3 Febbraio.

2018. Decreto del Consiglio Regionale 05/11/2009 n. 107. Piano di tutela delle acque, Norme tecniche di attuazione e successive modifiche e integrazioni. Aggiornamento a Luglio 2018.

Siti web consultati:

Iridra s.r.l. 2017. [www.iridra.eu/it/](http://www.iridra.eu/it/)

Istat. 2015. Censimento delle acque per uso civile. [www.istat.it](http://www.istat.it)

Istat. 2017. Giornata mondiale dell'acqua . [www.istat.it](http://www.istat.it)

Water Plants Italy. 2016. [www.waterplantsitaly.com](http://www.waterplantsitaly.com)

Hach. 2017. [www.it.Hach.com](http://www.it.Hach.com)

## RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare il Dott. Nicola Dal Ferro ed il Prof. Maurizio Borin per il prezioso aiuto e supporto fornitomi nella stesura di questa tesi, oltre che per l'infinita disponibilità che hanno mostrato nei miei confronti.

Voglio inoltre ringraziare Laura, la quale mi ha assistito durante le prime analisi in laboratorio, Luciano, tecnico del laboratorio La.Chi, il Dott. Carmelo Maucieri, gli operai dell'azienda agraria "Lucio Toniolo" e tutte le persone che hanno collaborato con me nello svolgere questo lavoro di ricerca.

Infine non posso che ringraziare di cuore la mia famiglia, sempre pronta a sostenermi anche nei momenti di difficoltà e senza la quale non avrei mai affrontato questo percorso universitario di cui sono molto fiero.