



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI SALERNO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

TESI DI DOTTORATO IN:

Rischio e Sostenibilità dei sistemi dell'Ingegneria Civile, Edile e Ambientale,
XXXV Ciclo, DICIV, a.a. 2022/2023

Curriculum A

TECNOLOGIE AVANZATE, INFRASTRUTTURE E PROTEZIONE
DEL TERRITORIO PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE

**LA NUOVA GENERAZIONE DEI SISTEMI
ACQUAPONICI AVANZATI PER LO
SVILUPPO SOSTENIBILE E LA
BIOECONOMIA CIRCOLARE**

**NEXT GENERATION OF ADVANCED AQUAPONIC
SYSTEM TO IMPROVE DI CIRCULAR BIOECONOMY
AND THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT**

Allievo:

DOMENICO GIAQUINTO

MATR. 880210007

Relatore:

PROF. ING. VINCENZO NADDEO

Correlatori:

PROF. ING. TIZIANO ZARRA

PROF. ING. VINCENZO BELGIORNO

Coordinatore del dottorato:

PROF. ING. FERNANDO FRATERNALI

LA NUOVA GENERAZIONE DEI SISTEMI ACQUAPONICI AVANZATI PER
LO SVILUPPO SOSTENIBILE E LA BIOECONOMIA CIRCOLARE

Copyright © 2023 SEED (Sanitary Environmental Engineering Division), Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno – Via Giovanni Paolo II, 132 – 84084 Fisciano (SA), Italy – web: www.seed.unisa.it

Proprietà letteraria, tutti i diritti riservati. La struttura ed il contenuto del presente volume non possono essere riprodotti, neppure parzialmente, salvo espressa autorizzazione. Non ne è altresì consentita la memorizzazione su qualsiasi supporto (magnetico, magnetico-ottico, ottico, cartaceo, etc.).

Benché l'autore abbia curato con la massima attenzione la preparazione del presente volume, Egli declina ogni responsabilità per possibili errori ed omissioni, nonché per eventuali danni dall'uso delle informazioni ivi contenute.

Seduta di laurea del 07/02/2023

A mia madre,
per i sacrifici economici e
per gli sforzi da lei affrontati
al fine di rendermi un uomo e un ingegnere migliore,
nonchè per essermi stata vicina sempre,
nei momenti di gioia e di tristezza

INDICE GENERALE

INDICE GENERALE.....	i
indice delle figure.....	vi
indice delle tabelle.....	xiv
SOMMARIO.....	xvii
ABSTRACT.....	xxi
RINGRAZIAMENTI.....	xxv
About the author.....	xxvii
1 Introduzione.....	1
2 L'agricoltura urbana.....	4
2.1 Excurcus storico.....	6
2.2 Vantaggi e svantaggi dell'agricoltura urbana.....	10
2.3 I diversi approcci dell'agricoltura urbana.....	11
2.3.1 La tecnologia del verde pensile.....	14
2.3.2 La struttura delle serre.....	20
2.3.3 Le Vertical Farms.....	33
2.4 La sostenibilità delle pratiche di urban farming.....	38
3 L'Acquaponica.....	41
3.1 L'acquacoltura.....	41
3.2 Impianti di acquacoltura.....	44
3.2.1 Intensità di allevamento.....	45
3.2.2 Ricambio idrico.....	48
3.3 Strutture per l'acquacoltura.....	49
3.3.1 Lo stagno.....	50
3.3.2 Raceway.....	52
3.3.3 Le vasche.....	53
3.3.4 Le gabbie.....	55
3.3.5 Sistemi di acquacoltura a ricircolo RAS.....	55
3.4 L'Acquacoltura in Italia.....	59
3.5 Vantaggi e svantaggi dell'acquacoltura.....	63
3.5.1 L'utilizzo di antibiotici.....	64
3.5.2 La produzione di anidride carbonica.....	67
3.6 L'idroponica.....	70
3.6.1 Sistemi di coltivazione idroponica.....	74

3.6.2	La Nutrient Film Technique (NFT)	77
3.6.3	La Floating system.....	79
3.6.4	La Deep Water Culture (DWC)	81
3.6.5	Ebb and flow	83
3.6.6	Sistema a stoppino	84
3.6.7	Sistema a gocciolamento	85
3.6.8	Aeroponica	87
3.7	Vantaggi e svantaggi dell'idroponica.....	90
3.8	Sistemi acquaponici	92
3.8.1	Funzionamento dei sistemi acquaponici.....	97
3.8.2	Il feed rate ratio	100
3.8.3	Componenti principali.....	101
3.8.4	Le specie animali utilizzati in acquaponica	104
3.8.5	Le specie vegetali utilizzate in acquaponica.....	105
3.8.6	Parametri di controllo	106
4	I fotobioreattori microalgali e l'algaponica	113
4.1	Tipologie di fotobioreattori.....	114
4.1.1	Sistema tubolare verticale.....	115
4.1.2	Sistema tubolare orizzontale.....	117
4.1.3	Sistema a pannelli	117
4.1.4	Sistema elicoidale.....	118
4.2	Fotobioprocessi: le microalghe.....	119
4.2.1	Parametri di progetto	122
4.3	Potenzialità delle microalghe.....	124
4.3.1	Derivati delle microalghe.....	127
4.4	Utilizzo delle microalghe nell'acquacoltura.....	131
4.5	Combinazioni tra fotobioreattori microalgali e sistemi idroponici 139	
4.6	Utilizzo delle microalghe nell'acquaponica	141
5	Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici.....	157
5.1	Micronutrienti e macronutrienti	157
5.2	Ciclo dei nutrienti	161
5.2.1	Ciclo dell'azoto	162
5.2.2	Ciclo del fosforo.....	165
5.2.3	Ciclo del carbonio	166
5.3	L'attività microbica	168
5.4	Trattamenti recuperare nutrienti in acquaponica	173
5.5	Trattamenti fisico-meccanici.....	175
5.6	Vasche di sedimentazione	176

5.6.1	Sedimentatore a pianta rettangolare.....	177
5.6.2	Sedimentatore conico	177
5.6.3	Separatore meccanico a vortice (Swirl filter)	178
5.6.4	Separatore meccanico a flusso radiale (Radial flow separator).....	178
5.6.5	Filtri meccanici.....	178
5.6.6	Filtro meccanico con griglia (Screen filter).....	179
5.6.7	Filtro meccanico a tamburo (Drum filter)	179
5.6.8	Filtro meccanico a dischi (Disc filter)	180
5.6.9	Filtri domestici	180
5.7	Trattamenti biologici	181
5.7.1	Biofiltri	182
5.7.2	Biofiltro a letto percolatore (Trickling bio-filter).....	184
5.7.3	Filtri MBBR (Moving bed bio-reactors).....	185
5.7.4	Filtri a letto fluido (Fluidized-sand bio-filters).....	186
5.8	Trattamenti avanzati nei sistemi acquaponici.....	186
5.8.1	Bioreattori a membrana (MBR).....	187
5.8.2	Membrane dinamiche auto-formanti (SFDM)	192
5.8.3	Meccanismi di disinfezione	195
5.8.4	Processi di ossidazione avanzata (AOPs)	197
5.8.5	Ozono	198
5.8.6	Raggi UV	201
5.9	Esempi applicativi del recupero dei nutrienti in acquaponica.....	203
5.9.1	Effetto dei trattamenti avanzati sui nutrienti.....	206
5.9.2	Conversione dei nutrienti in biomassa	207
5.10	Quadro normativo e riutilizzo dei reflui in agricoltura	210
5.10.1	Quadro normativo acque reflue	211
5.10.2	Classificazione delle acque reflue	214
5.11	riutilizzo acque reflue in agricoltura.....	215
5.12	Refluo caseario per il riutilizzo in agricoltura	220
5.13	Trattamento per il riutilizzo dei reflui in acquaponica	223
5.13.1	Riutilizzo dei reflui in idroponica.....	223
5.13.2	Riutilizzo dei reflui in acquacoltura	225
5.13.3	Riutilizzo dei reflui in acquaponica.....	226
6	L'Attività sperimentale.....	230
6.1	Descrizione del sistema.....	232
6.1.1	Unità di acquacoltura	232
6.1.2	Unità idroponica	238
6.1.3	Ulteriori componenti	241

6.1.4	Bioreattori.....	243
6.1.5	Lampada UV.....	251
6.1.6	Generatore di ozono.....	252
6.2	Strumentazione utilizzata.....	254
6.2.1	Sonda multiparametrica.....	254
6.2.2	Turbidimetro.....	255
6.2.3	Cromatografo.....	256
6.2.4	Analizzatore a carbonio.....	257
6.2.5	Spettrofotometro.....	258
6.2.6	Strumentazione per prova microbiologica.....	259
6.3	I cicli sperimentali.....	262
6.3.1	Set-up sperimentale cicli I-IV.....	264
6.3.2	Set-up sperimentale cicli V-VI.....	266
6.3.3	Set-up sperimentale cicli VII-VIII.....	268
6.3.4	Set-up sperimentale cicli IX-X.....	270
7	Risultati dei cicli sperimentali.....	273
7.1	Risultati ciclo sperimentale I-IV.....	273
7.1.1	Torbidità.....	275
7.1.2	Ammoniaca.....	278
7.1.3	Nitrati.....	279
7.1.4	Crescita specie ittica.....	280
7.1.5	Crescita specie vegetale.....	282
7.2	Risultati ciclo sperimentale V-VI.....	286
7.2.1	Torbidità.....	286
7.2.2	TAN.....	287
7.3	Risultati ciclo sperimentale VII-VIII.....	288
7.3.1	pH.....	289
7.3.2	Ossigeno disciolto.....	292
7.3.3	Temperatura.....	293
7.3.4	TAN.....	294
7.3.5	Prove microbiologiche.....	295
7.4	Risultati ciclo sperimentale IX-X.....	297
7.4.1	Torbidità.....	298
7.4.2	COD.....	299
7.4.3	Tasso di crescita specie vegetale.....	300
8	Discussione dei risultati e sviluppi futuri.....	301
8.1	Sviluppi futuri.....	301
9	Conclusioni.....	305
	Bibliografia.....	307

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1 Sfide sociali della società che possono essere mitigate attraverso l'agricoltura urbana, riadattato da Khan et al., 2020.....	6
Figura 2-2 Giardino persiano (tratta dal web: https://www.tripadvisor.it/ShowUserReviews-g316021-d1894809-r439777167-Eram_Garden_Baq_e_Eram-Shiraz_Fars_Province.html 26/12/2021).....	7
Figura 2-3 Monaci benedettini a lavoro nei campi (tratta dal web: http://www.camminocamaldolese.org/pagina-13.html 26/12/2021).....	8
Figura 2-4 Operai che lavorano in un orto di guerra (tratta dal web: https://guerrainfame.it/orti_di_guerra 28/12/2021)	9
Figura 2-5 Excursus storico agricoltura urbana (adattata da Orsini et al., 2020).....	10
Figura 2-6 “Food Miles” distanza percorsa dal cibo dai campi della fattoria alla tavola da pranzo. La mappa illustra il caso del viaggio degli ingredienti base per un vasetto di yogurt alla fragola negli USA.....	12
Figura 2-7 Tetto verde tipo con (1) vegetazione, (2) miscela di substrato per inverdimenti intensivi, (3) telo filtrante, (4) strato di accumulo, drenaggio e aerazione, (5) feltro di accumulo e protezione, (6) impermeabilizzazione in membrana sintetica antiradice, (7) strato di separazione, (8) isolamento termico, (9) barriera al vapore, (10) piano di copertura in c.a. (Harpo verdepensile, 2020).....	16
Figura 2-8 Vista dell’OrtoAlto Le Fonderie Ozanam, Torino (OrtoAlto Le Fonderie Ozanam, 2020).....	18
Figura 2-9 Elementi costituenti la serra dell’ICTA-ICP Rooftop Greenhouse Laboratory (RTG-Lab) (Sanyé-Mengual et al., 2015).....	21
Figura 2-10 La prima serra di Gotham Greens a Greenpoint, New York City (Gotham Greens, 2020)	24
Figura 2-11 La serra di Gotham Greens sul tetto di Whole Foods, New York City (Gotham Greens, 2020)	26
Figura 2-12 Sistema NFT a ricircolo (AmHydro, 2018).....	27
Figura 2-13 Ferme Abattoir, Brussels (BIGH, 2018).....	28
Figura 2-14 Vista della serra e dell’orto pensile, Ferme Abattoir, Brussels (BIGH, 2018).....	29

Figura 2-15 Coltivazione di pomodori con il sistema acquaponico, Ferme Abattoir, Brussels (BIGH, 2018).....	31
Figura 2-16 Coltivazione idroponica di erbe aromatiche biologiche in vaso, Ferme Abattoir, Brussels (Beckers, 2019).....	32
Figura 2-17 Sistemi multipiano verticali in una PFAL (Planet Farms, 2019).....	34
Figura 2-18 Vertical Harvest, Jackson Hole (Vertical Harvest, 2020)	36
Figura 2-19 Global Headquarters di AeroFarms, Newark (AeroFarms, 2020).....	37
Figura 2-20 Tecnologia aeroponica brevettata di AeroFarms (AeroFarms, 2020).....	38
Figura 3-1 Bassorilievo sulla tomba di Aktihetep che mostra una rete da pesca sul Nilo 2500 A.C. (www.waterandfoodsecurity.org).....	41
Figura 3-2 Sistemi di acquacoltura in base all'intensità di allevamento ...	46
Figura 3-3 Sistemi di acquacoltura in base alla struttura.....	50
Figura 3-4 Piccolo stagno per l'allevamento di trote iridee in Islanda (Manuale Europeo di Acquacoltura)	51
Figura 3-5 Raceways per l'allevamento di trote nel Parco Nazionale dei Monti Sibillini (www.allevamentotrote.com).....	52
Figura 3-6 Vasche circolati in Islanda (Manuale Europeo di Acquacoltura)	54
Figura 3-7 Schema del sistema di acquacoltura a ricircolo RAS.....	56
Figura 3-8 Schema sistema RAS con ulteriori trattamenti (Van de Ven R. et al., 2014 – 2018)	57
Figura 3-9 Produzione in Italia dal 1950 al 2019	59
Figura 3-10 Impianti di molluschicoltura in provincia di La Spezia (www.olpagenova.it).....	60
Figura 3-11 Tipologie di allevamenti in Campania 2019	63
Figura 3-12 Emissioni di CO ₂	68
Figura 3-13 Giardini pensili babilonesi disegnati da famosi archeologi (Fonte: wikipedia modificato).....	71
Figura 3-14 Principali tecniche idroponiche.....	76
Figura 3-15 Dettaglio di uno schema di coltivazione NTF. (Fonte: Tecniche di coltivazione idroponiche– Aspetti progettuali e consumi idrici, 2015).....	77
Figura 3-16 Schema di un sistema NTF. (Fonte: Idroponica: le tecniche).....	79
Figura 3-17 Dettaglio schema di coltivazione in “floating system”. (Fonte: Tecniche di coltivazione idroponiche– Aspetti progettuali e consumi idrici, 2015).....	80

Figura 3-18 Esempio di una coltivazione in “floating system”. (Fonte: http://pandeglang.work/)	81
Figura 3-19 Dettaglio di uno schema di coltivazione “Deep Water Culture”. (Fonte: https://www.greenandvibrant.com/deep-water-culture)	82
Figura 3-20 Esempio di coltivazione di un sistema “Deep Water Culture”(Fonte: https://www.epicgardening.com/deep-water-culture-get-started/).....	83
Figura 3-21 Dettaglio di uno schema di coltivazione “Ebb and flow”. (Fonte: https://www.botanicaurbana.com/sistemi-idroponici-a-marea/)	84
Figura 3-22 Dettaglio di uno schema di coltivazione a stoppino. (Fonte: https://www.royalqueenseeds.it/blog-tutto-quello-che-devi-sapere-sui-sistemi-idroponici-a-stoppino-n1068)	85
Figura 3-23 Dettaglio di uno schema di coltivazione a gocciolamento. (Fonte: https://www.casahitech.it/serra-idroponica-guida-acquisto/) ..	87
Figura 3-24 Sistema aeroponico (Fonte: https://www.botanicaurbana.com/sistemi-aeroponici/)	88
Figura 3-25 Esempio di un sistema aeroponico.	90
Figura 3-26 Ciclo nei sistemi acquaponici (adattata da Thorarinsdottir, 2015).....	94
Figura 3-27 Sistema acquaponico disaccoppiato (adattata da Thorarinsdottir, 2015).....	95
Figura 3-28 Rappresentazione schematica del funzionamento di un sistema acquaponico (Fonte: www.produzionidalbasso.com)	99
Figura 3-29 Equilibrio nel sistema acquaponico (Fonte: Manuale acquaponica, FAO)	100
Figura 3-30 Ciclo dell'azoto nei sistema acquaponici (miglioracquario.com)	103
Figura 3-31 Solubilità dell'ossigeno in acqua al variare della temperatura (fonte: graphspro.wordpress.com).....	108
Figura 4-1 Tipologie di PBR chiusi.....	115
Figura 4-2 Schematizzazione di un reattore tubolare verticale Air lift. Immissione della CO ₂ tramite sparger all'interno del tubolare (Fonte: www.researchgate.net)	116
Figura 4-3 Sistema a tubolari orizzontali in serie e parallelo con diametro di 15 cm (Fonte: terraevita.edagricole.it).....	117
Figura 4-4 Sistema a pannelli costituito da lastre trasparenti in configurazione verticale (Fonte: webapi.ingenio-web.it)	118

Figura 4-5 Sistema elicoidale con tubi in polietilene a raggio costante e sistema di illuminazione interno (Fonte: biorefining.cfans.umn.edu) ...	119
Figura 4-6 Potenzialità della biomassa algale (Fonte: ars.els-cdn.com) .	126
Figura 4-7 Potenzialità delle microalghe	127
Figura 4-8 Potenzialità delle microalghe	130
Figura 4-9 Microalghe essiccate (Fonte: www.ruminantia.it)	132
Figura 4-10 Produzione di microalghe in PBR (Fonte: it.wikipedia.org)	136
Figura 4-11 Diagramma concettuale di un sistema acquaponico con alghe (tratta da Y. Zhang et al., 2022)	147
Figura 4-12 Sistema acquaponico realizzato nello studio di Addy et al., 2017: 1) vasca dei pesci; 2) vasca di chiarificazione; 3) vasca di mineralizzazione; 4) vasca di degasaggio; 5) unità idroponica; 6) pompe per il ricircolo; 7) pompe per l'aerazione	152
Figura 4-13 Schema del sistema acquaponico PRO-AP integrato con alghe (tratta da Y. Zhang et al., 2022)	154
Figura 5-1 Effetto di alcune carenze nutrizionali su una foglia di lattuga (fonte: https://hydrilla.in/)	160
Figura 5-2 Ciclo dell'azoto (fonte: www.humansgarden.it)	164
Figura 5-3 Schema esemplificativo dei trattamenti convenzionali in un impianto acquaponico (fonte: Thorarinsdottir, 2015)	174
Figura 5-4 Filtro meccanico a tamburo (fonte: img.directindustry.it) ...	180
Figura 5-5 Introduzione del biofiltro a seconda di diversi sistemi idroponici (fonte: aquaponictrend.blogspot.com	183
Figura 5-6 Sintesi dei possibili trattamenti implementabili in acquaponica	187
Figura 5-7 Stratificazione della membrana auto-formante (fonte: link.springer.com , Zhang et al. 2014)	193
Figura 5-8 Reattore a ozono	200
Figura 5-9 Funzionamento di una lampada UV (fonte: www.alfauv.com)	202
Figura 5-10 Trattamento con BAF (Fonte: Zhang et al., 2020)	204
Figura 5-11 Recupero del fosforo (Fonte: Yogev et al., 2020)	205
Figura 5-12 Vantaggi della coltivazione di microalghe in acqua proveniente da sistemi di acquacoltura a ricircolo (RAS)	210
Figura 5-13 Classificazioni paesi in relazione all'indice di stress idrico. (figura tratta dall'articolo di (Bixio et al., 2006))	216
Figura 6-1 Laboratorio di Ingegneria sanitaria ed ambientale (SEED) dell'Università degli studi di Salerno	230

Figura 6-2 Logo progetto WAFRA	231
Figura 6-3 Illustrazione acquario adottato nell'attività sperimentale	232
Figura 6-4 Acquario "Milo 100 Luxline Black"	233
Figura 6-5 Filtro meccanico interno all'acquario	234
Figura 6-6 Specie ittica presente nell'acquario - Tilapia (12/09/2022 – <i>Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED - Università degli Studi di Salerno</i>).....	236
Figura 6-7 Mangime adoperato e valori nutrizionali	237
Figura 6-8 Mangiatoia automatica.....	237
Figura 6-9 Vasche idroponiche	238
Figura 6-10 Lampada del tipo "Bulbo HPS Agro Sylvania"	239
Figura 6-11 Lattuga nell'unità idroponica (02/07/2022 – <i>Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED - Università degli Studi di Salerno</i>).....	240
Figura 6-12 Basilico nell'unità idroponica (12/09/2022 – <i>Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED - Università degli Studi di Salerno</i>).....	241
Figura 6-13 Pompa peristaltico Lead Fluid BT300L.....	242
Figura 6-14 Sistema di aereazione "Hailea ACO 9610"	243
Figura 6-15 Fotobioreattore microalgale	244
Figura 6-16 Alghe <i>Chlorella vulgaris</i> (05/09/2022 – <i>Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED - Università degli Studi di Salerno</i>).....	245
Figura 6-17 Preparazione del refluo caseario sintetico	246
Figura 6-18 Reattore per il contenimento del refluo caseario.....	247
Figura 6-19 Illustrazione modulo membrana dinamica auto-formante.....	248
Figura 6-20 Layer della membrana dinamica autoformante	249
Figura 6-21 Membrana dinamica autoformante assemblata in laboratorio	249
Figura 6-22 SFDM nel reattore dei primi cicli sperimentali.....	250
Figura 6-23 Cilindro metallico con alloggio luce UV.....	251
Figura 6-24 Cappa aspirante a naso di elefante.....	252
Figura 6-25 Generatore di ozono con timer	253
Figura 6-26 Tubo ad U per il trattamento ad ozono.....	253
Figura 6-27 Sonda multiparametrica.....	255
Figura 6-28 Turbidimetro e campioni.....	256
Figura 6-29 Campioni cromatografo	257
Figura 6-30 Analizzatore di carbonio	257
Figura 6-31 Beute per il test dell'azoto ammoniacale.....	258
Figura 6-32 Spettrofotometro	259
Figura 6-33 Terreno di coltura	260
Figura 6-34 Preparazione dei campioni per la filtrazioni.....	260

Figura 6-35 Strumentazione per prova microbiologica e capsule Petri.	261
Figura 6-36 Set-up sistema acquaponico convenzionale ciclo I-IV(sistema 1)	265
Figura 6-37 Set-up sistema acquaponico avanzato ciclo I-IV(sistema 1)	266
Figura 6-38 Set-up sistema acquaponico convenzionale ciclo VII-VIII(sistema 1)	269
Figura 6-39 Set-up sistema acquaponico avanzato ciclo VII-VIII(sistema 2)	270
Figura 6-40 Set-up sistema acquaponico convenzionale ciclo IX-X(sistema 1)	271
Figura 6-41 Set-up sistema acquaponico avanzato ciclo IX-X(sistema 2)	271
Figura 7-1 Legenda box plot.....	275
Figura 7-2 Tasso di abbattimento torbidità, cicli sperimentali I-IV.....	277
Figura 7-3 Acquario 1, ciclo IV, scatto istantanea a distante di qualche giorno dall'ultima manutenzione effettuata	277
Figura 7-4 Acquario 2, ciclo IV, scatto istantanea a distante di qualche giorno dall'ultima manutenzione effettuata	278
Figura 7-5 Abbattimento ammoniaca, cicli I-IV.....	279
Figura 7-6 Abbattimento nitrati, cicli I-IV	280
Figura 7-7 Crescita specie ittica, acquario 1, cicli I-IV.....	281
Figura 7-8 Crescita specie ittica, acquario 2, cicli I-IV.....	281
Figura 7-9 Rappresentazione mediante box plot della crescita della specie ittica	282
Figura 7-10 Crescita specie vegetale, ciclo IV, sistema 1	284
Figura 7-11 Crescita specie vegetale, ciclo IV, sistema 2.....	285
Figura 7-12 Torbidità del sistema algacquacoltura, cicli V-VI.....	287
Figura 7-13 TAN del sistema algacquacoltura, cicli V-VI.....	288
Figura 7-14: Andamento pH acquacolture, cicli VII-VIII	290
Figura 7-15 Andamento pH idroponiche, cicli VII-VIII	290
Figura 7-16 Andamento pH fotobioreattore microalgale, cicli VII-VIII	292
Figura 7-17 Ossigeno disciolto, cicli VII-VIII	293
Figura 7-18 Temperatura, cicli VII-VIII.....	294
Figura 7-19 TAN, cicli VII-VIII	294
Figura 7-20 Tasso di abbattimento escherichia coli, cicli VII-VIII	295
Figura 7-21 Abbattimento carica batterica, ciclo IX, sistema 1	296
Figura 7-22 Abbattimento carica batterica, ciclo IX, sistema 1	297

Figura 7-23 Andamento torbidità, ciclo IX	299
Figura 7-24 Andamento COD, ciclo IX	299
Figura 7-25 Tasso di crescita specie vegetale, ciclo IX	300
Figura 8-1 Sistema acquaponico a scala pilota	302
Figura 8-2 Riutilizzo di vecchie cabine telefoniche, Osaka, Giappone, 2012 (fonte: https://www.millionaire.it/in-giappone-le-vecchie-cabine-telefoniche-diventano-acquari/)	303

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2-1 Serre idroponiche su tetto di Gotham Greens (Goodman & Minner, 2019; Gotham Greens, 2020)	24
Tabella 2-2 Vertical farms di AeroFarms (AeroFarms, 2020)	36
Tabella 3-1 Produzione globale di acquacoltura 1950 – 2017: quantità e percentuale (FAO – Sezione Informazioni e statistiche sulla pesca e l'acquacoltura - 19/11/2019)	43
Tabella 3-2 Comparazione delle caratteristiche generali dei sistemi di allevamento estensivi ed intensivi (Manuale Europeo di Acquacoltura)	48
Tabella 3-3 Vantaggi e svantaggi dei sistemi RAS (Demir E. et al., 2014)	58
Tabella 3-4 Impianti nelle regioni italiane per ogni specie allevata	61
Tabella 3-5 Tipologie di allevamento in Italia	62
Tabella 3-6 Malattie batteriche dei pesci (Fonte: manuale FAO, 2014) ..	64
Tabella 3-7 Vantaggi e svantaggi acquacoltura	69
Tabella 3-8 Vantaggi e svantaggi idroponica	91
Tabella 4-1 Contenuto lipidico microalghe (www.iat.unina.it)	128
Tabella 4-2 Nutrienti in effluente di acquacoltura (Fonte: Guo et. al, 2013)	144
Tabella 4-3 Nutrienti addizionali per coltivazione di microalghe in reflui di acquacoltura (Fonte: Kuo et al, 2015)	145
Tabella 4-4 Caratteristiche di un refluo di acquacoltura (tratta da Tejido-Nuñez et al., 2020)	148
Tabella 4-5 Parametri di dimensionamento e controllo di un fotobioreattore combinato con sistemi di acquacoltura	151
Tabella 5-1 Funzione dei macronutrienti	158
Tabella 5-2 Funzione dei micronutrienti	159
Tabella 5-3 Sintesi recupero nutrienti	206
Tabella 5-4 Effetto trattamenti sui nutrienti	207
Tabella 5-5 Recupero nutrienti con microalghe (Fonte: Nie et al., 2020)	208
Tabella 5-6 Proteine, carboidrati e lipidi <i>Chlorella</i> (Fonte: Nie et al., 2020)	208

Tabella 5-7 Limiti di emissione per gli impianti di acque reflue urbane	211
Tabella 5-8 Principali parametri per il riutilizzo delle acque reflue	213
Tabella 5-9 Prescrizioni di qualità delle acque affinate a fini irrigui in agricoltura	214
Tabella 5-10 Caratteristiche reflui caseari. Fonte (Goli et al., 2019)	222
Tabella 5-11 Principali elementi contenuti nei reflui caseari. Fonte (Goli et al., 2019)	222
Tabella 6-1 Dimensioni acquario	233
Tabella 6-2 Parametri per la tilapia (fonte: manuale FAO, 2014)	235
Tabella 6-3 Tabella riassuntiva dei cicli sperimentali	263
Tabella 6-4 Parametri di riferimento predimensionamento sistema ibrido	267
Tabella 6-6 Predimensionamento sistema ibrido	268
Tabella 7-1 Tabelle riassuntiva delle analisi effettuate nei cicli I-IV	274

SOMMARIO

Secondo le previsioni dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO), la domanda alimentare è in continua crescita. Al tempo stesso si stima che entro il 2050 si avrà un aumento della risorsa idrica pari al 90% in più rispetto a quella attuale.

Per fronteggiare queste problematiche, si sta cercando sempre più di implementare soluzioni ispirate alla natura, tra queste l'agricoltura urbana. L'agricoltura urbana è una recente pratica che considera di produrre cibo in modo sostenibile, minimizzando gli spazi e riducendo il consumo idrico. Inoltre, rispetto alle pratiche agricole tradizionali, non richiede utilizzo di fertilizzanti che sono fra i principali inquinanti che si trovano non solo nel suolo, ma anche nei corpi idrici superficiali.

Va anche considerato l'inquinamento annesso alle pratiche per la gestione e manutenzione di tali sistemi. Con la pratica di agricoltura urbana non solo si riesce a fronteggiare tali criticità, ma soprattutto sarà possibile produrre risorse a km 0. Tali soluzioni risulteranno pertanto sostenibili sotto qualsiasi punto di vista: economico, in quanto forniranno cibo dal valore aggiunto; sociale, in quanto creeranno nuovi posti di lavoro e nuove conoscenze all'interno della società; ambientale, in quanto si produrrà cibo in maniera sicura e sostenibile.

Una delle principali applicazioni dell'agricoltura urbana è l'acquaponica. L'acquaponica è la combinazione sinergica di dell'acquacoltura, ovvero dell'allevamento di specie ittica e dell'idroponica, ovvero della coltivazione di specie vegetale in assenza di acqua.

L'acquacoltura nasce in quanto la richiesta di alimenti non potrà più essere soddisfatta solo dalla attività di pesca, per questo motivo l'acquacoltura, sta assumendo un ruolo sempre più importante aumentando l'offerta globale di alimenti e mostrando un enorme potenziale per affrontare la malnutrizione e le malattie legate all'alimentazione.

Dall'altro lato invece l'idroponica rappresenta una valida alternativa alle tecniche di coltivazione convenzionali basate sul suolo. Infatti, svolgendo confronti in termini di efficacia, qualità, consumo di acqua e velocità di

produzione, si è visto che il sistema idroponico sia in grado di produrre una resa significativamente migliore rispetto alle tecniche convenzionali.

Ma il beneficio maggiore si ottiene quando questi due sistemi lavorano in maniera sinergica, creando per l'appunto i sistemi acquaponici che saranno in grado di fornire un'opportunità per rafforzare la sicurezza alimentare, incrementare l'offerta di specie ittiche e vegetali, e riutilizzare risorse fondamentali. Con i sistemi acquaponici è possibile ottenere la produzione contemporanea sia di specie acquatiche, sia di specie vegetali utilizzando quantità ridotte di acqua, di fertilizzanti e di area di coltura.

I sistemi acquaponici si basano su processi biologici, dove deve esserci un perfetto equilibrio fra i vari attori in gioco. L'unità di acquacoltura, tramite l'attività metabolica dei pesci produce sostanze di scarto e composti azotati che, grazie alla presenza di una filtrazione meccanica e di una biologica, vengono ridotti. I batteri presenti all'interno del biofiltro favoriscono la trasformazione dell'azoto ammoniacale in ione ammonio, che può essere convertito successivamente in nitriti e nitrati tramite i processi di nitrificazione. Le piante assorbono l'ultima forma dell'azoto, i nitrati. Questa è una fonte di nutrimento necessaria, che offre la possibilità di non introdurre fertilizzanti nel sistema, riducendo i costi e garantendo un'economia circolare. Oltre ai composti azotati, le piante assorbono anche altri nutrienti come fosforo e potassio realizzando una fitodepurazione dell'acqua. Una volta depurata, l'acqua potrà essere reimpressa nell'acquario dei pesci per consentirne lo svolgimento delle attività vitali.

Nell'impianto acquaponico si crea così un vero e proprio ecosistema in grado di autosostenersi e di produrre simultaneamente più prodotti: possono essere coltivate sia verdure a foglia verde, sia erbe aromatiche sia frutti, ed allevare diverse specie ittiche, sia commestibili che ornamentali in funzione della necessità. Il vantaggio principale dal punto di vista ambientale è costituito dalla riduzione della risorsa acqua utilizzata, oltre che dalla riduzione delle acque reflue, che non potrebbero essere immesse nell'ambiente in assenza di un appropriato trattamento.

Ma i sistemi acquaponici convenzionali presentano grosse limitazioni, legate soprattutto ai lunghi tempi di manutenzione, alla difficoltà nella gestione delle unità di acquacoltura e idroponica, all'emissione in atmosfera della CO₂ da parte dell'unità di acquacoltura, etc... Inoltre non di poco conto, va considerato che spesso vengono utilizzati

antibiotici o simili nelle unità di acquacoltura, che se non opportunamente trattati, entrano nel ricircolo idrico, oltre alla presenza di patogeni: questi vengono anche assorbiti dalla radici della specie vegetale. Va ricordato che tali prodotti sono destinati al consumo umano, pertanto bisogna assicurarsi che vi sia sempre un'efficienza del processo. Va tenuto conto che tale importanza è legata soprattutto ai processi biologici che avvengono nei sistemi acquaponici e al ruolo che i batteri svolgono. Molto spesso tale equilibrio non viene garantito con il rischio di bilanciare i nutrienti. Infatti, la presenza di un quantitativo elevato di nutrienti in un reflu immesso in un corso d'acqua, provocherebbe l'eutrofizzazione dell'ambiente acquatico. Va sottolineato inoltre che i sistemi acquaponici hanno continue perdite idriche dovute alle perdite per evaporazione degli acquari e di evotraspirazione dell'idroponica, con la necessità di ripristinare pertanto i livelli delle diverse unità.

Ed è per tale motivo che nasce questo lavoro di tesi, con lo scopo di creare una nuova generazione di sistemi acquaponici avanzati per il recupero dei nutrienti e lo sviluppo sostenibile, nell'ottica dell'economia circolare. L'attività sperimentale è stata svolta presso il Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale (SEED) dell'Università degli Studi di Salerno in 10 cicli sperimentali.

In ognuno dei diversi cicli, l'attività di studio è stata incentrata sul confronto fra due sistemi acquaponici differenti: un sistema acquaponico convenzionale ed uno innovativo. Sono stati analizzati i principali parametri di qualità dell'acqua per valutare l'efficacia dei trattamenti implementati ed il ciclo dei nutrienti. Sono stati misurati sia parametri fisico/chimici (temperatura, conducibilità, ORP, pH, ossigeno disciolto, salinità, azoto ammoniacale e torbidità), sia anioni e carbonio (organico, inorganico, totale). Inoltre, sono stati effettuati test microbiologici al fine di valutare la presenza di colonie batteriche patogene che potessero compromettere la crescita dei vegetali, e monitorare il loro abbattimento tramite i trattamenti di disinfezione.

Nei primi 4 cicli sperimentali è stato in particolar modo verificata l'efficacia di combinare sistemi di disinfezione, quali UV ed ozono, con una innovativa tipologia di membrana, denominata membrana dinamica autoformante, in grado di trattare le acque reflue di acquacoltura. Tali processi, hanno mostrato risultati soddisfacenti sia per una migliore qualità

dell'acqua di acquacoltura che per una crescita migliore e della specie ittica e della specie vegetale.

Nei cicli successivi invece, si è voluto implementare un nuovo sistema acquaponico innovativo in cui ad esso, oltre i medesimi trattamenti sopra menzionati, è stato implementato all'interno del ricircolo idrico un fotobioreattore microalgale. Scopo di tale implementazione era quello di valutare come le microalghe possano migliorare il processo di trattamento dei reflui di acquacoltura assicurando al tempo stesso i nutrienti alla specie vegetale. Inoltre, tale microalgale una volta essiccate, sono stati utilizzate come mangime per i pesci. Ulteriore beneficio dato delle microalghe è stato relativo ad un miglior trattamento dei reflui di acquacoltura.

Negli ultimi due cicli sperimentali, ha avuto come scopo quello di rendere il sistema autosufficiente dal punto di vista idrico e del ciclo dei nutrienti. E' stato aggiunta una ulteriore unità con lo scopo di trattare reflui caseari, che sono ricchi di nutrienti. Durante questa fase però sono stati rimossi i trattamenti di disinfezione, mentre la membrana dinamica autoformante ha assunto un ruolo chiave: trattare le acque reflue preservando i nutrienti contenuti in esso. Al tempo stesso, il trattamento biologico con le microalghe si è dimostrato essenziale, riuscendo fin da subito ad assicurare un giusto apporto nutritivo alla specie vegetale, e lavorando in maniera efficace e continua.

Nei capitoli successivi dopo aver descritto le principali tecniche di agricoltura urbana, nonché di acquacoltura, idroponica, acquaponica, e coltivazione di alghe, sono stati illustrati in maniera dettagliata i diversi set-up sperimentali, nonché le analisi e le strumentazioni implementate. Infine sono stati presentati i principali risultati, nonché gli sviluppi futuri con le considerazioni conclusive.

ABSTRACT

According to forecasts by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), the demand for food is constantly growing. At the same time it is estimated that by 2050 there will be an increase in water demand equal to 90% more than the current one.

To address these issues, there is an increasing effort to implement nature-inspired solutions, including urban agriculture.

Urban agriculture is a recent practice that considers producing food in a sustainable way, minimizing spaces and reducing water consumption. Furthermore, compared to traditional agricultural practices, it does not require the use of fertilizers which are among the main pollutants found not only in the soil, but also in surface water bodies.

The pollution associated with the practices for the management and maintenance of these systems must also be considered. With the practice of urban agriculture it is not only possible to face these critical issues, but above all it will be possible to produce resources at km 0. These solutions will therefore be sustainable from any point of view: economic, as they will provide food with added value; social, as they will create new jobs and new knowledge within society; environmental, as food will be produced in a safe and sustainable way.

One of the main applications of urban agriculture is aquaponics. Aquaponics is the synergistic combination of aquaculture, i.e. the breeding of fish species, and hydroponics, i.e. the cultivation of plant species in the absence of water.

Aquaculture was born as the demand for food can no longer be satisfied only by fishing activity, for this reason aquaculture is assuming an increasingly important role by increasing the global supply of food and showing enormous potential to address the malnutrition and diet-related diseases.

On the other hand, hydroponics represents a valid alternative to conventional soil-based cultivation techniques. In fact, by carrying out comparisons in terms of effectiveness, quality, water consumption and

production speed, it has been seen that the hydroponic system is able to produce a significantly better yield than conventional techniques.

But the greatest benefit is obtained when these two systems work in synergy, precisely creating aquaponic systems that will be able to provide an opportunity to strengthen food security, increase the supply of fish and plant species, and reuse basic resources. With aquaponic systems it is possible to obtain the simultaneous production of both aquatic species and vegetable species using reduced quantities of water, fertilizers and cultivation area.

Aquaponic systems are based on biological processes, where there must be a perfect balance between the various players involved. The aquaculture unit, through the metabolic activity of the fish, produces waste substances and nitrogenous compounds which, thanks to the presence of a mechanical and biological filtration, are reduced. The bacteria present inside the biofilter favor the transformation of ammoniacal nitrogen into nitrites and nitrates through nitrification processes. Plants absorb the last form of nitrogen, nitrates. This is a necessary source of nutrition, which offers the possibility of not introducing fertilizers into the system, reducing costs and ensuring a circular economy. In addition to nitrogenous compounds, plants also absorb other nutrients such as phosphorus and potassium, creating a phytoremediation of the water. Once purified, the water can be returned to the fish aquarium to allow them to carry out their vital activities.

In this way a real ecosystem is created in the aquaponic system capable of self-sustaining and of simultaneously producing several products: both green leafy vegetables, aromatic herbs and fruits can be grown, and various fish species can be raised, both edible and ornamental of necessity. The main advantage from an environmental point of view is the reduction of the water resource used, as well as the reduction of wastewater, which could not be released into the environment without appropriate treatment.

But conventional aquaponic systems have major limitations, linked above all too long maintenance times, the difficulty in managing the aquaculture and hydroponic units, the emission of CO₂ into the atmosphere by the aquaculture unit, etc...

Also not insignificant, it should be considered that they are often used antibiotics or similar in aquaculture units, which, if not properly treated, enter the water recirculation, in addition to the presence of pathogens:

these are also absorbed by the roots of the plant species. It must be remembered that these products are intended for human consumption, therefore it must be ensured that there is always an efficiency of the process. It should be borne in mind that this importance is linked above all to the biological processes that take place in aquaponic systems and to the role that bacteria play. Very often this balance is not guaranteed with the risk of balancing the nutrients. In fact, the presence of a high quantity of nutrients in a wastewater introduced into a watercourse would cause the eutrophication of the aquatic environment. It should also be emphasized that aquaponic systems have continuous water losses due to evaporation loss of the aquariums and evapotranspiration of hydroponics, with the need to therefore restore the levels of the various units.

And it is for this reason that this thesis work was born, with the aim of creating a new generation of advanced aquaponic systems for the recovery of nutrients and sustainable development, in the perspective of the circular economy. The experimental activity was carried out at the Sanitary Environmental Engineering Division (SEED) at the University of Salerno in 10 experimental cycles.

In each of the different cycles, the study activity was focused on the comparison between two different aquaponic systems: a conventional aquaponic system and an innovative one. The main water quality parameters were analyzed to evaluate the effectiveness of the implemented treatments and the nutrient cycling. Both physical/chemical parameters (temperature, conductivity, ORP, pH, dissolved oxygen, salinity, ammonia nitrogen and turbidity), as well as anions and carbon (organic, inorganic, total) were measured. Furthermore, microbiological tests were carried out to evaluate the presence of pathogenic bacterial colonies that could compromise the growth of plants, and to monitor their elimination through disinfection treatments.

In the first 4 experimental cycles, the effectiveness of combining disinfection systems, such as UV and ozone, with an innovative type of membrane, called dynamic self-forming membrane, capable of treating aquaculture wastewater, was specifically verified. These processes have shown satisfactory results both for a better quality of the aquaculture water and for a better growth of the fish species and of the vegetable species.

In the subsequent cycles, however, we wanted to implement a new innovative aquaponic system in which, in addition to the same treatments

mentioned above, a microalgal photobioreactor was implemented within the water recirculation. The purpose of this implementation was to evaluate how microalgae can improve the treatment process of aquaculture wastewater while ensuring nutrients to the plant species. Furthermore, these microalgae, once dried, have been used as fish feed. Further benefit given by microalgae was related to a better treatment of aquaculture wastewater.

In the last two experimental cycles, the aim was to make the system self-sufficient in terms of water and nutrient cycling. An additional unit has been added with the aim of treating dairy waste, which is rich in nutrients. During this phase, however, the disinfection treatments were removed, while the dynamic self-forming membrane assumed a key role: treating the wastewater while preserving the nutrients contained in it. At the same time, the biological treatment with microalgae has proved to be essential, managing to immediately ensure a correct nutrient supply to the plant species, and working effectively and continuously.

In the following chapters, after having described the main urban agriculture techniques, as well as aquaculture, hydroponics, aquaponics, and algae cultivation, the different experimental set-ups, as well as the analyzes and instruments implemented, were illustrated in detail. Finally, the main results were presented, as well as future developments with concluding considerations.

RINGRAZIAMENTI

Alla fine di questo percorso è doveroso ringraziare tutte le persone che sono state fondamentali per il raggiungimento di questo traguardo.

Ringrazio in primis il mio relatore, nonché tutor della mia attività di ricerca, il professore Vincenzo Naddeo, il quale sin dal primo giorno mi ha saputo motivare e spronare a dare sempre il meglio di me stesso. Lo ringrazio per essere stato sempre disponibile con me, per i preziosi consigli ricevuti, nonché per la passione che mi ha trasmesso per le discipline ambientali.

Ringrazio i miei correlatori il prof. Tiziano Zarra e il prof. Vincenzo Belgiorno, per il supporto motivazionale e scientifico ricevuto durante il mio percorso di dottorato.

Ringrazio Paolo e Antonio, per il supporto ricevuto durante la realizzazione dei set-up sperimentali e durante le analisi di routine in laboratorio.

Ringrazio tutti i tesisti di laurea triennale e magistrale, nonché studenti internazionali che hanno preso parte a questa attività di ricerca.

Ringrazio tutta la famiglia del SEED, dai borsisti ai contrattisti, dai dottorandi ai ricercatori, tutti colleghi con i quali durante questi 3 anni ho avuto modo di interagire e collaborare.

Ringrazio i miei colleghi del XXXV ciclo, la segreteria del dottorato, il prof. Fernando Fraternali in qualità di coordinatore e il collegio tutto, per la formazione e l'organizzazione tecnico-scientifica di questo percorso.

Ringrazio tutti i miei amici al di fuori dell'ambito universitario per l'interesse mostrato durante questa mia crescita personale.

Ringrazio tutta la mia famiglia, per esserci stata sempre e comunque in ogni passo della mia vita. Ringrazio in maniera particolare mia madre, a

cui dedico questo lavoro di tesi, una donna a cui devo tutto e se oggi sono un uomo e un ingegnere migliore lo devo a lei.

Ringrazio la mia dolce metà Alessia, con la quale ho deciso di condividere tutti i giorni della mia vita, con la quale periodicamente ho condiviso i momenti vissuti all'interno di questo percorso. A lei devo i miei sentiti ringraziamenti per essere stata la prima a credere in me, sin dal primo giorno di questo percorso universitario bello e stimolante.

Infine, ringrazio coloro i quali non sono più vicino a me, ma di cui ho sempre sentito il loro apporto, soprattutto nei momenti di difficoltà. Spero che anche nel più alto dei cicli arrivi il mio grazie e la mia promessa ad essere e restare sempre quello che sono oggi, un uomo ed un ingegnere che nel suo piccolo cerca di contribuire a rendere questo mondo migliore.

ABOUT THE AUTHOR

Domenico Giaquinto nasce a Battipaglia il 13 Giugno 1991. Nel 2010 si diploma presso il Liceo Scientifico “Giovanni Da Procida”, Salerno (SA). Nel 2018 consegue il titolo di laurea in Ingegneria Edile-Architettura presso l’Università degli Studi di Salerno. Nel 2019 consegue il titolo di laurea di Master di II livello in “Gestione Energetica di edifici e infrastrutture” del Politecnico di Milano. Si iscrive nell’anno 2019/2020 al corso di Dottorato del XXXV ciclo in “Rischio e Rischio e Sostenibilità dei sistemi dell’Ingegneria Civile, Edile e Ambientale” e sta conseguendo il titolo di dottore di ricerca con una tesi sperimentale dal titolo “LA NUOVA GENERAZIONE DI SISTEMI ACQUAPONICI AVANZATI PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE E LA BIOECONOMIA CIRCOLARE”.

Domenico Giaquinto was born in Battipaglia on June 13, 1991. In 2010 he graduated from the "Giovanni Da Procida" Scientific High School, Salerno (SA). In 2018 he obtained the degree in Building Engineering-Architecture at the University of Salerno. In 2019 he obtained the II level Master's degree in “Gestione Energetica di edifici e infrastrutture” from Politecnico di Milano. In the year 2019/2020 he enrolled in the PhD course of the XXXV cycle in "Risk and Sustainability in Civil, Architectural and Environmental Engineering Systems" and is pursuing the title of PhD with an experimental thesis entitled "NEXT GENERATION OF ADVANCED AQUAPONIC SYSTEM TO IMPROVE DI CIRCULAR BIOECONOMY AND THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT ”.

1 INTRODUZIONE

La crescita della popolazione mondiale, dell'industrializzazione, della richiesta di cibo e delle emissioni in atmosfera, sono delle problematiche attuali in grado di compromettere la salute dell'uomo e dell'ambiente. Infatti, i cambiamenti climatici stanno causando diversi danni sia alla salute, sia alla società sia all'economia, basti pensare alle alluvioni e agli eventi meteorici estremi, capaci di distruggere il patrimonio edilizio, le colture e le specie selvatiche. Le cause principali di tali problematiche sono le attività antropiche: le emissioni incontrollate di inquinanti in atmosfera, nelle acque e la produzione di rifiuti. Per questo motivo è necessario controllarle al fine di soddisfare i bisogni della popolazione, ma in modo sostenibile. In questo scenario si inserisce il presente lavoro di tesi.

Per garantire una produzione adeguata di specie ittiche, è necessario intensificare gli allevamenti di pesce aumentando inevitabilmente la produzione di acque reflue e di anidride carbonica. L'acquacoltura intensiva necessita di grossi quantitativi di acqua per garantire l'allevamento e la produzione di specie acquatiche in ambienti controllati dall'uomo. Con l'attività metabolica svolta dai pesci si ha la contaminazione delle acque, la produzione di composti di azoto e di fosforo che immessi nell'ambiente creano problemi di eutrofizzazione, ovvero la modificazione dell'equilibrio ecologico del corso d'acqua. Per questo motivo è necessario eseguire trattamenti di depurazione che riducano il contenuto di nutrienti e restituiscano all'ambiente acque con parametri di qualità adeguati. Inoltre, le colture intensive immettono grosse quantità di anidride carbonica in atmosfera, che possono alterare il ciclo del carbonio e provocare impatti negativi sul sistema ambientale.

Le pratiche agricole non sostenibili, allo stesso modo, contribuiscono negativamente alla preservazione della qualità ambientale. Per ottenere la produzione di grandi quantità di raccolto, è necessario disporre di ampi terreni di coltura, elevate quantità di acqua ed utilizzare fertilizzanti e pesticidi per garantire l'integrità della produzione. L'immissione di queste sostanze nell'ambiente, soprattutto nelle falda acquifere, provoca la contaminazione delle stesse e, certamente, un danno ambientale. Negli ultimi anni, anche riprendendo tradizioni degli antichi, si sta sviluppando

Introduzione

l'idroponica, ovvero la coltura fuori suolo, in grado di ridurre i problemi legati alla scarsità di suolo ed i consumi di acqua.

Cresce, pertanto, la necessità di utilizzare nuove tecniche di produzione di pesce e specie vegetali che possano avere vantaggi ecologici, produttivi e sulla sicurezza alimentare. Con l'acquaponica, che unisce l'acquacoltura con l'idroponica, si crea un sistema simbiotico in cui pesci, piante e batteri svolgono un ruolo attivo e fondamentale creando un nuovo ecosistema. L'acqua viene condivisa e ricircolata tra le varie componenti portando alla riduzione dei consumi e all'abbattimento delle sostanze di scarto tramite una serie di processi naturali. L'adozione di questo nuovo modello di produzione agricola da parte dei Paesi mondiali non solo consente di contribuire all'alimentazione umana del futuro, ma determina tutta una serie di impatti positivi, quali minor utilizzo di suolo naturale, assorbimento della CO₂ prodotta dal traffico veicolare, regolazione termica e igrometrica, benessere psicofisico fornito dai profumi e dalla varietà dei colori e aumento del valore degli immobili. È per questo motivo che, oltre all'acquaponica, si pone un'attenzione particolare anche al recupero di nutrienti tramite la produzione di microalghe. Questo processo avviene all'interno di reattori in cui si fornisce luce, anidride carbonica e ovviamente nutrienti, questi ultimi derivanti, come sempre, dalle acque di scarto dell'attività ittica.

Il seguente lavoro di tesi riguarderà lo studio dei sistemi acquaponici e l'implementazione di trattamenti innovativi per il miglioramento della qualità delle acque ed il recupero dei nutrienti in esse presenti. Il recupero di nutrienti è fondamentale nell'ottica dell'economia circolare perché, oltre a migliorare la qualità delle acque, permette il loro reimpiego in altri processi, come ad esempio il reimpiego come fertilizzanti in agricoltura.

Tra le diverse tecniche di trattamento, risulta innovativo l'impiego delle microalghe. Esse presentano grosse potenzialità poiché, non solo sono in grado di ridurre il contenuto dei nutrienti nelle acque e trasformarlo in biomassa, ma anche di ridurre le emissioni di anidride carbonica legate agli allevamenti di acquacoltura. L'intero ciclo si chiude con l'utilizzo di queste microalghe come cibo alternativo per i pesci. Infine è possibile utilizzare tali microalghe come processo di trattamento dei reflui caseari. In questo modo si crea un sistema algacquaponico dove si riesce a combinare in un unico processo il recupero dei nutrienti, preservando la risorsa idrica e di

Introduzione

suolo, in maniera completamente sostenibile, nei pieni principi dell'economia circolare.

2 L'AGRICOLTURA URBANA

La domanda che si pone un interessante studio condotto da (Specht et al., 2016) è “Come mangeremo e produrremo nelle città del futuro?” in conseguenza ad una situazione che porta il mondo ad affrontare tempi di cambiamento climatico, crescita della popolazione, processi di urbanizzazione e diminuzione delle terre coltivabili.

In un sistema dove la globalizzazione guida gli sviluppi delle catene alimentari, rende difficile capire da dove proviene il cibo e come viene prodotto. La mancanza della tracciabilità dei prodotti e il susseguirsi di scandali alimentari portano ad un aumento della domanda di cibo locale.

Studiosi mostrano, in casi di studio locali e regionali, una tendenza verso una diminuzione dell'agricoltura industrializzata. Le ragioni riguardano, nei paesi sviluppati, il maggior ricavo da parte degli agricoltori sulla soddisfazione dei consumatori di avere freschezza e qualità dei prodotti. Numerosi accademici di diverse discipline, dalla sociologia rurale, alla geografia, all'antropologia e al marketing, hanno dimostrato che i consumatori cercano sempre più cibi locali per motivi diversi che vanno dalla sua qualità, freschezza e gusto, ad attributi più intangibili come i suoi benefici nel contribuire alla economia locale, alla conservazione del patrimonio culturale, alle questioni ambientali e alla maggiore sicurezza alimentare (Masi et al., 2022).

La ricerca di (Galli & Brunori, 2017) è stata focalizzata sulla valutazione di una semplice domanda: “il locale è più sostenibile del globale?”, dai risultati hanno evidenziato che le catene alimentari locali sono più sostenibili di quelle globali per caratteristiche quali biodiversità, benessere degli animali, valore aggiunto locale e nutrizione.

Un importante sistema di produzione alimentare locale è l'agricoltura urbana, che è correlata anche a una serie di vantaggi di sostenibilità come l'accesso a cibi sani, la promozione della coesione sociale, la creazione di opportunità per l'attività fisica, il miglioramento del benessere economico urbano e il rilancio delle comunità a basso reddito (Angotti, 2015).

2. L'agricoltura urbana

La consapevolezza del consumatore che apprezza il cibo prodotto in modo sostenibile, ha innescato un movimento alimentare locale che ha influenzato l'offerta verso una produzione più vicina al consumatore.

L'agricoltura urbana innesca un processo che lega l'agricoltura alla comunità, basato su legami faccia a faccia tra produttori e consumatori, il che determina connessione sociale, reciprocità e fiducia. In questo modo il consumatore accetta di buon grado prezzi premium per prodotti di alta qualità (Hinrichs, 2000).

Tuttavia, l'agricoltura urbana affronta anche rischi e limitazioni, quali la contaminazione del suolo, l'inquinamento dell'acqua e dell'aria possono interferire con la sicurezza alimentare dei prodotti (Specht et al., 2014).

Infatti, per la problematica relativa alla contaminazione del suolo, uno studio su 54 orti comunitari a New York ha rilevato che il 70% aveva un campione che superava i valori di salute raccomandati, concentrazioni di piombo e altri metalli pesanti prodotti di quasi un secolo di emissioni di benzina con piombo. Ciò non significa necessariamente che i rischi dell'agricoltura urbana superino i benefici, sebbene suggeriscano l'importanza di applicare il principio di precauzione. Per gli agricoltori urbani si presentano due scelte: bonificare il suolo o importare suolo sano da utilizzare in aiuole rialzate. Tuttavia, questa preoccupazione rimanda indefinitamente la prospettiva di risanare il suolo, migliorare l'ambiente urbano e rompere con il modello industriale di produzione agricola (Angotti, 2015).

L'incertezza su come soddisfare in modo sostenibile la domanda alimentare delle generazioni future e le opportunità economiche emergenti derivanti dalle mutevoli richieste dei consumatori guidano lo sviluppo e la promozione di approcci innovativi alla produzione alimentare urbana. Per ottenere una produzione alimentare efficiente e sicura, l'agricoltura urbana è progredita verso l'utilizzo di apparecchiature di alta tecnologia in ambiente controllato. Queste innovazioni tecnologiche sono per lo più progettate per utilizzare lo spazio in modo efficiente ma anche per sfruttare le sinergie con l'ambiente costruito delle città (Khan et al., 2020).

2. L'agricoltura urbana

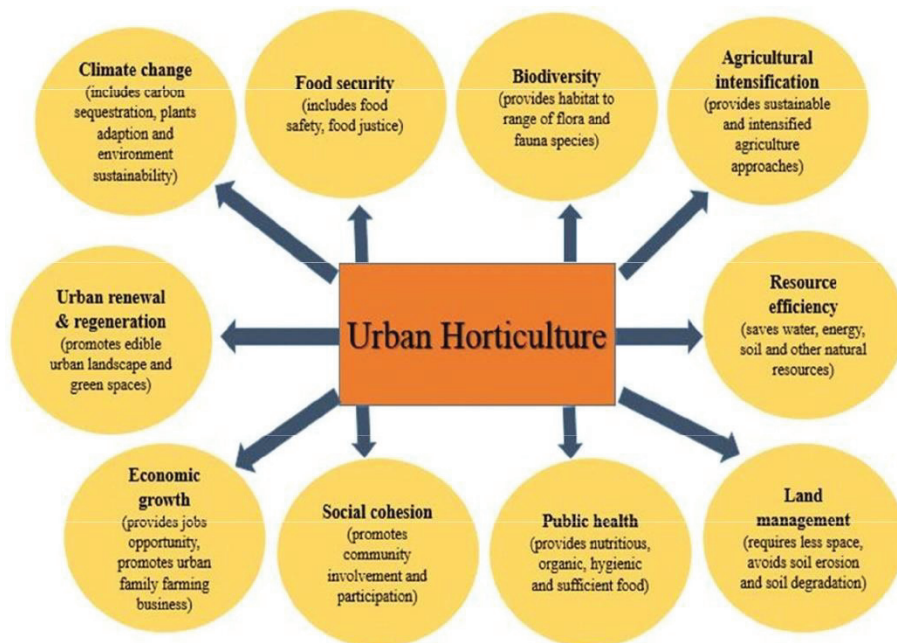


Figura 2-1 Sfide sociali della società che possono essere mitigate attraverso l'agricoltura urbana, riadattato da Khan et al, 2020

2.1 EXCURCUS STORICO

La prima forma di agricoltura, intesa come orticoltura, risale al Neolitico e veniva praticata dalle donne al fine di integrare la selvaggina che gli uomini portavano a casa, dopo la caccia (Hansen et al., 2015). La prima applicazione dell'agricoltura urbana si ottiene quando l'uomo decide di fornire alla natura forme geometriche regolari mediante la progettazione di giardini (Hosseinpour et al., 2022): infatti, già nell'antico Egitto, i giardini venivano realizzati seguendo schemi geometrici ben precisi; una simile cultura agricola emerse anche dai famosi giardini pensili di Babilonia o anche dalle cosiddette "terre sacre" della Grecia classica usate esclusivamente per la produzione di cibo; nei giardini romani si potevano trovare, addirittura, specie esotiche, come testimoniano i giardini sommersi di Pompei (Orsini et al., 2020). I giardini persiani erano specializzati nell'orticoltura ed utilizzavano piante molto produttive

2. L'agricoltura urbana

(Abbas et al., 2016); gli alberi fornivano zone d'ombra, mentre fiori e piante ornamentali contribuivano a rendere l'ambiente più gradevole alla vista (Hosseinpour et al., 2022).



Figura 2-2 Giardino persiano (tratta dal web: https://www.tripadvisor.it/ShowUserReviews-g316021-d1894809-r439777167-Eram_Garden_Baq_e_Eram-Shiraz_Fars_Province.html 26/12/2021)

La pratica di coltivazione delle piante in città e nei villaggi si consolidò nel Medioevo nella semplice forma di orto, in cui le relazioni, le dimensioni e le figure traevano spunto dai Pitagorici (Steenbergen & Reh, 2003). Gli orti venivano realizzati entro le mura difensive della città, in modo da garantire cibo nei periodi di guerra (Orsini et al., 2020). L'orticoltura si diffuse anche nei monasteri (Figura 2.6), dove il lavoro agricolo seguiva l'insegnamento di San Benedetto (Aben & de Wit, 1999). I giardini arabi, invece, coniugavano la bellezza e le esperienze sensoriali, basandosi sugli effetti benefici che le piante potevano avere sull'uomo (Orsini et al., 2020).

2. L'agricoltura urbana



Figura 2-3 Monaci benedettini a lavoro nei campi (tratta dal web: <http://www.camminocamaldolese.org/pagina-13.html> 26/12/2021)

Nell'età moderna, dal Rinascimento fino al Romanticismo, continuò ad esserci un connubio tra spazio rurale e spazio urbano: venivano coltivate piante esotiche nelle ville private o in parchi botanici urbani e nacquero scuole di giardinaggio in Italia, Francia e Inghilterra, spianando la strada all'architettura moderna (Orsini et al., 2020).

In età contemporanea, a partire dalla Rivoluzione Industriale, gli orti venivano realizzati entro i confini della città per fornire cibo in sicurezza ai lavoratori che migravano (Partalidou & Anthopoulou, 2017). Durante i conflitti mondiali del ventesimo secolo furono istituiti dai governi "orti della guerra" o "orti della vittoria" per rifornire di cibo la popolazione civile (Keshavarz & Bell, 2016). Negli anni del dopoguerra, l'orticoltura urbana assunse un ruolo economico, sociale e politico importante: ne sono un esempio le iniziative riguardanti il "community gardening", che permette la cura del verde da parte di una comunità di persone e il "guerrilla gardening", un'attività mediante la quale si cerca di reclamare

2. L'agricoltura urbana

suoli urbani inutilizzati e trascurati coltivandoli e abbellendoli tramite azioni di giardinaggio (Orsini et al., 2020; Ralston, 2012). In questi anni la rapida crescita economica e l'urbanizzazione portarono all'allontanamento dell'agricoltura che si spostò fuori città, in zone considerate più salubri e meno inquinate (Mok et al., 2014). Il ventunesimo secolo ha aperto le porte ad una rapida evoluzione delle tecnologie agricole, permettendo di realizzare forme di coltivazione multiple e sistemi circolari (es. sistemi acquaponici), ma anche di creare strutture e costruzioni civili in simbiosi con la natura, come testimoniano i progetti di agricoltura verticale e di agricoltura sui tetti (La Rosa et al., 2014).



Figura 2-4 Operai che lavorano in un orto di guerra (tratta dal web: https://guerrainfame.it/orti_di_guerra 28/12/2021)

Di seguito si riporta uno schema riassuntivo dell'exkursus storico.

2. L'agricoltura urbana

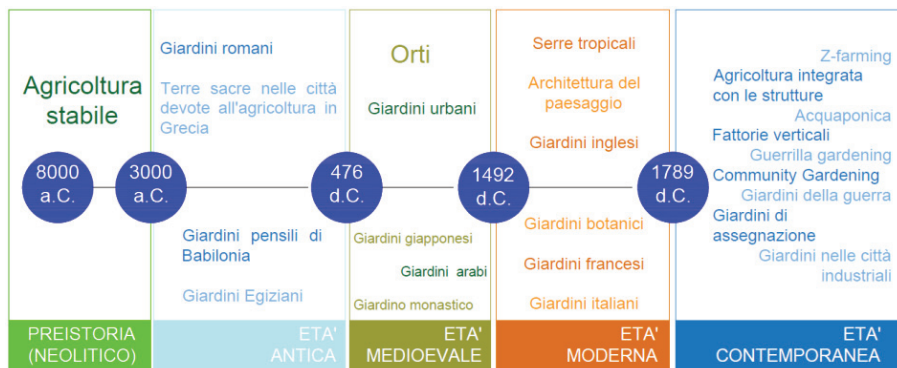


Figura 2-5 Excursus storico agricoltura urbana (adattata da Orsini et al., 2020)

2.2 VANTAGGI E SVANTAGGI DELL'AGRICOLTURA URBANA

L'agricoltura urbana presenta vantaggi e svantaggi che afferiscono a tutti e tre i pilastri dello sviluppo sostenibile: ambientale, sociale ed economico (Ayambire et al., 2019; Azunre et al., 2019; Batitucci et al., 2019; Hosseinpour et al., 2022; Tapia et al., 2021).

I benefici che apporta l'agricoltura urbana riguardano, dal punto di vista ambientale e della salute pubblica, la protezione della biodiversità (Hui, 2011), il miglioramento della qualità dell'aria mediante la cattura della CO₂ emessa principalmente al traffico veicolare (Hui, 2011; Kullu et al., 2020; Mok et al., 2014), il riciclo dei rifiuti urbani biodegradabili (Hui, 2011; Orsini et al., 2020), il miglioramento del benessere e della salute pubblica (Mayer & Frantz, 2004), la riduzione dell'effetto "isola di calore" in riferimento ad aree, quali strade, costruzioni, parcheggi e altre strutture che risultano molto più calde delle aree rurali adiacenti (Ackerman et al., 2014; Hui, 2011; LeJava P. & Goonan J., 2012; van Veenhuizen, 2006), una gestione più efficiente delle acque di pioggia, grazie anche alla mitigazione degli effetti delle tempeste d'acqua che si abbattano sulle città (Ackerman et al., 2014; Hui, 2011) e la riduzione dell'impronta ecologica dovuta alle emissioni del trasporto di cibo (Deng, 2021; Hui, 2011); dal punto di vista economico, la sicurezza alimentare grazie al commercio e la trasformazione di cibo locale fresco (Edmondson et al., 2020; Kullu et al., 2020; Lin et al., 2015), la generazione di lavoro e di reddito (Hui, 2011;

2. L'agricoltura urbana

Kullu et al., 2020; Lawson, 2016), l'aumento del valore degli immobili (Castiglioni & Rocca, 2017); dal punto di vista sociale, l'incremento del verde cittadino che migliora la percezione dei luoghi e contribuisce ad un'amenità visiva (Hui, 2011; Kullu et al., 2020), la partecipazione della comunità a momenti di svago, ricreazione ed educazione nell'ottica di una maggiore inclusione sociale (Hui, 2011; Lawson, 2016; Salomon et al., 2022).

Per quanto riguarda i rischi e i conflitti che possono emergere bisogna annoverare, dal punto di vista ambientale e della salute pubblica, l'utilizzo di fitofarmaci e di reflui non sufficientemente pretrattati possono determinare potenziali contaminazioni di aria, acqua e suolo (Mok et al., 2014; Sroka et al., 2021; Tapia et al., 2021; van Veenhuizen, 2006); dal punto di vista economico, la competizione che può nascere nei confronti di impieghi alternativi del suolo, per esempio a scopo residenziale, e la bassa redditività delle fattorie urbane rispetto alle altre attività che vengono svolte nell'ambito urbano (Mazzocchi et al., 2013); dal punto di vista sociale, i rischi associati all'integrazione urbano-rurale, inclusi i conflitti con i residenti legati all'aumento del traffico veicolare a seguito dell'utilizzo di macchinari agricoli, nonché alla diffusione dei rumori degli stessi macchinari e degli animali, di odori e di allergeni vari (LeJava P. & Goonan J., 2012).

2.3 I DIVERSI APPROCCI DELL'AGRICOLTURA URBANA

Secondo lo studio condotto da (Lal, 2020) il trasporto dei prodotti alimentari necessario al sostentamento delle città, coprono una distanza media compresa tra 800 e 1.500 km, comportando un dispendio di energia e una vulnerabilità ad interruzioni come quella causata da COVID-19. Infatti per quanto riguarda il trasporto, in altro studio di ricerca portato avanti da Al-Kodmany dell'Università di Chicaco (Al-Kodmany, 2018a) evidenzia che le "miglia alimentari" (*food miles*), cioè la distanza percorsa dai raccolti per raggiungere le popolazioni urbane centralizzate, in media percorrono circa 1.500 miglia (2.414 km) dal campo della fattoria al tavolo da pranzo. In circostanze speciali, ad esempio il freddo, le miglia alimentari possono aumentare drasticamente quando per soddisfare le richieste di negozi, ristoranti e ospedali la fornitura avviene per trasporto aereo

2. L'agricoltura urbana

dall'estero. Su base regolare, oltre il 90% del cibo nelle principali città degli Stati Uniti viene spedito dall'estero. Uno studio del 2008 di Weber and Scott (Hopp & Gussow, 2009) ha concluso che le “miglia alimentari” sono responsabili di 0,4 tonnellate di emissioni di anidride carbonica per famiglia all'anno e uno dei principali modi per ridurre l'impronta di carbonio del singolo consumatore è quello di seguire una dieta con produzione locale. Ciò è particolarmente importante data la crescente distanza tra aziende agricole e città densamente urbanizzate e globalizzate. Pertanto, vi è un'urgente necessità di adottare sistemi alimentari resilienti per soddisfare un fabbisogno alimentare locale. L'agricoltura urbana sta già producendo circa il 15-20% dell'approvvigionamento alimentare mondiale e questo può svolgere un ruolo ancora più critico nel raggiungimento della sicurezza alimentare durante una crisi globale come quella creata dal virus COVID-19. Un sistema alimentare resiliente per la città può tradursi in modi completamente nuovi di produrre cibo come gli orti urbani, l'agricoltura indoor, l'agricoltura verticale, le serre sui tetti, l'acquaponica, l'allevamento di insetti commestibili o la produzione di alghe. Tutti questi approcci possono affrontare gli attuali problemi della autosufficienza alimentare e avere il potenziale per contribuire a una produzione alimentare più sostenibile in futuro.

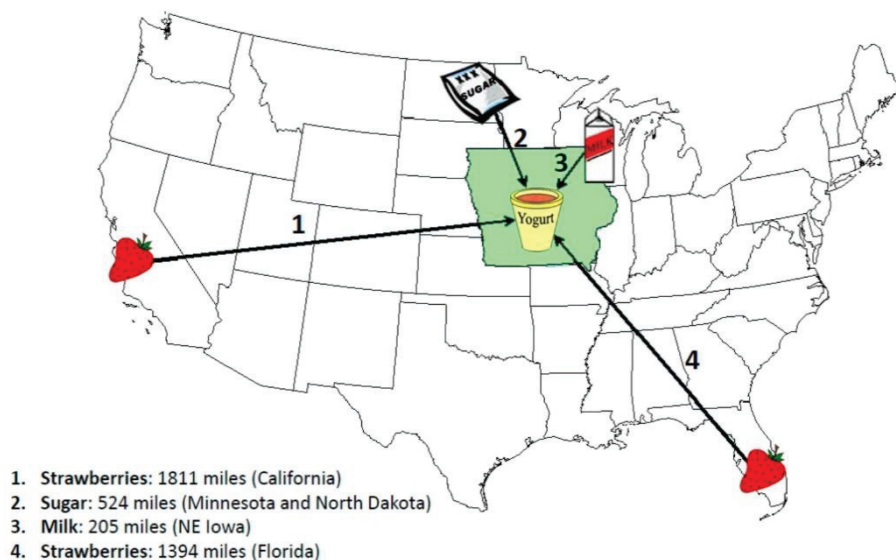


Figura 2-6 “Food Miles” distanza percorsa dal cibo dai campi della fattoria alla tavola da pranzo. La mappa illustra il caso del viaggio degli ingredienti base per un vasetto di yogurt alla fragola negli USA.

2. L'agricoltura urbana

Per mettere in atto pratiche di agricoltura urbana si possono utilizzare diversi approcci, da progetti in piccola scala, a livello residenziale o destinati alla comunità, a progetti su scala commerciale. La scelta è orientata dal tipo di quartiere in cui devono essere realizzati (Ackerman, 2012).

La forma più classica di agricoltura urbana è quella “*ground-based*”, ovvero quelle aziende agricole localizzate in lotti vuoti, sottoutilizzati o dismessi e che utilizzano le tecniche di produzione tradizionali, ma negli ultimi anni si sta diffondendo una nuova tipologia, quella che Thomaier *et al.* definiscono “*Zero-Acreage Farming*” (ZFarming), progetti localizzati sulle coperture o all'interno di edifici esistenti caratterizzati dal non-utilizzo di superficie (Ackerman, 2012; Thomaier et al., 2015).

Le principali soluzioni di ZFarming sono (Thomaier et al., 2015):

- gli orti pensili;
- le serre su tetto;
- le “*vertical farms*”.

Le serre su tetto e le vertical farms, che sono generalmente su scala commerciale, utilizzano tecniche di coltura fuori suolo e sono più tecnologicamente avanzate. Ad esse ci si riferisce con il termine di “*Controlled Environment Agriculture*” (CEA), per indicare che la produzione avviene in ambiente controllato (Ackerman, 2012; Goodman & Minner, 2019). Gli orti pensili, invece, sono più destinati alla comunità e utilizzano metodi di produzione meno sofisticati basati sul suolo (Ackerman, 2012; Thomaier et al., 2015).

Gli edifici ospitanti possono essere sia a destinazione mista che riprogettati esclusivamente per queste pratiche di agricoltura urbana, che possono comprendere anche l'allevamento di animali (Thomaier et al., 2015).

I progetti di ZFarming offrono un'opportunità nell'ambito del discorso sullo sviluppo sostenibile delle città qualora si preveda un'integrazione negli edifici ospitanti non solo in termini di localizzazione, ma anche di scambio delle risorse, quali acqua, aria ed energia, realizzando quella che Gould e Caplow definiscono “*Building-Integrated Agriculture*” (BIA) (Gould & Caplow, 2012; Thomaier et al., 2015). Le soluzioni integrate di

2. L'agricoltura urbana

agricoltura urbana, infatti, permettono la produzione di cibo a km 0 per gli abitanti e il contemporaneo miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici e, di conseguenza, della qualità ambientale dell'intorno (Thomaier et al., 2015).

La carenza di terreni agricoli nelle aree urbane ha portato alla ricerca di siti alternativi per la produzione di cibo e le coperture inutilizzate degli edifici sono da subito apparse adatte a questo scopo (Ackerman, 2012; Al-Kodmany, 2018b).

Gli orti pensili combinano i vantaggi della tradizionale tecnologia del verde pensile con la coltivazione di frutta e ortaggi in un sistema che è parte integrante dell'involucro dell'edificio (Al-Kodmany, 2018b).

Questo tipo di soluzione viene adottato soprattutto per quelle tipologie di ZFarms orientate a (Thomaier et al., 2015):

- fornire attività come ristoranti o caffetterie che si trovano nell'edificio ospitante con prodotti di alta qualità, freschi e locali;
- creare iniziative di inclusione sociale e di formazione per scuole, università e altre istituzioni educative e sociali;
- migliorare la qualità di vita di residenti e/o impiegati di edifici residenziali, commerciali o a destinazione d'uso mista, creando uno spazio verde e ricreativo.

I fattori critici da tenere in considerazione nell'integrazione degli orti pensili sono diversi, dalla capacità strutturale e accessibilità del tetto all'esposizione alle condizioni ambientali (Ackerman, 2012; Al-Kodmany, 2018b). Oggi, comunque, la loro realizzazione è supportata dalle istituzioni tramite programmi di finanziamento, incentivi e detrazioni fiscali (Agenzia delle Entrate, 2020; European Commission, 2020; OrtiAlti, 2020b).

2.3.1 La tecnologia del verde pensile

I sistemi a verde pensile si differenziano in (Allnut et al., 2014):

2. L'agricoltura urbana

- estensivi, progettati come misura di mitigazione e compensazione ambientale per supportare piante che richiedono substrati poco profondi e poca manutenzione (Sedum, erbe, muschi, fiori selvatici);
- intensivi, progettati per creare spazi ricreativi simili ai giardini tradizionali con prati, alberature, cespugli, che richiedono substrati di spessore superiore ai 200 mm, una maggiore capacità strutturale della copertura e una cura intensa;
- semintensivi, sistemi intermedi che rispetto a quelli estensivi possono includere arbusti e che richiedono uno spessore del substrato di 100-200 mm e una manutenzione contenuta.

Gli elementi costituenti un sistema a verde pensile, che vengono installati sul solaio di copertura, sono (Allnut et al., 2014; Harpo verdepensile, 2020):

- barriera antiradice per evitare che radici e rizomi intacchino la membrana impermeabilizzante, può essere chimica o fisica ed integrata o meno nell'impermeabilizzazione;
- strato di accumulo e di protezione in geotessile per proteggere la membrana impermeabilizzante ed integrare la riserva d'acqua, con spessore di 2-12 mm;
- strato di accumulo e di drenaggio per rendere disponibile l'acqua per i periodi prolungati di siccità e drenare quella in eccesso verso i pluviali, può essere in plastica dura, polistirene, schiuma, ghiaia, laterizi frantumati, a seconda delle necessità;
- strato filtrante in geotessile per trattenere solidi fini e sedimenti;
- substrato per la crescita delle piante costituito da una frazione organica (torba, compost vegetale) e una inorganica (lapillo vulcanico, pomice, zeoliti), deve fornire alle radici adeguati livelli di aria, acqua e nutrienti e rilasciare l'acqua in eccesso.

La figura che segue mostra un esempio di stratigrafia di un tetto verde.

2. L'agricoltura urbana

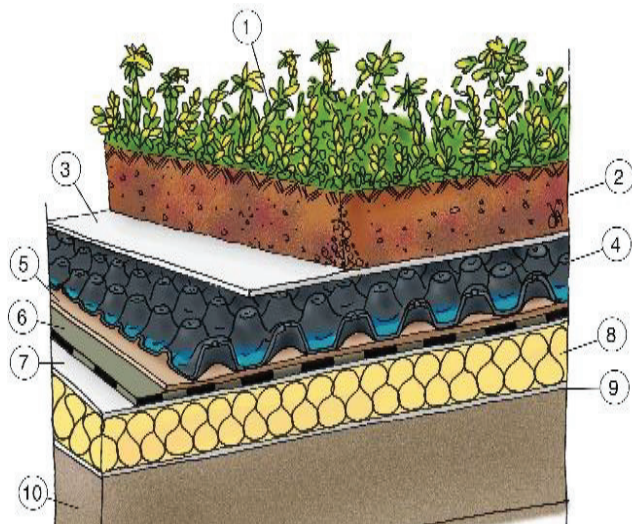


Figura 2-7 Tetto verde tipo con (1) vegetazione, (2) miscela di substrato per inverdimenti intensivi, (3) telo filtrante, (4) strato di accumulo, drenaggio e aerazione, (5) feltro di accumulo e protezione, (6) impermeabilizzazione in membrana sintetica antiradice, (7) strato di separazione, (8) isolamento termico, (9) barriera al vapore, (10) piano di copertura in c.a. (Harpo verdepensile, 2020)

I sistemi intensivi possono essere utilizzati per la coltivazione di orti urbani, realizzando quelli che vengono definiti orti pensili (Harpo verdepensile, 2020).

I tetti verdi sono una delle “*Nature-Based Solutions*” (NBS) promosse dalla Commissione Europea per affrontare le attuali sfide ambientali, sociali ed economiche in modo sostenibile (European Commission, 2020).

I benefici che apportano agli edifici e in generale al contesto urbano sono diversi (Allnut et al., 2014).

Le coperture a verde pensile aumentano la superficie permeabile nelle aree urbane riducendo il rischio di sovraccarico del sistema fognario durante piogge abbondanti o prolungate e di conseguenti inondazioni (Ackerman, 2012; Allnut et al., 2014). In questi termini, rientrano tra quelli che vengono definiti “*Sustainable urban Drainage Systems*” (SuDS), sistemi di drenaggio che si basano su processi naturali e possono affiancare le infrastrutture tradizionali nell’ottica di uno sviluppo sostenibile (Allnut et al., 2014; European Commission, 2015).

I tetti verdi agiscono attraverso due processi (Ackerman, 2012):

2. L'agricoltura urbana

- quello di ritenzione, per cui parte dell'acqua piovana viene trattenuta dal substrato per poi evaporare direttamente o attraverso l'evapotraspirazione delle piante;
- quello di detenzione, per cui la restante parte dell'acqua piovana viene trattenuta dal substrato e rilasciata gradualmente nei pluviali una volta raggiunto il punto di saturazione.

Attraverso l'acqua di ritenzione, che evaporando abbassa la temperatura dell'aria circostante, e il sistema multistrato, che evita l'assorbimento da parte della copertura della radiazione solare durante il giorno e il suo conseguente rilascio nelle ore notturne, questi sistemi riducono quello che viene definito effetto isola di calore urbano, "*Urban Heat Island (UHI) effect*", l'innalzamento della temperatura nel centro città (Ackerman, 2012; Allnut et al., 2014).

L'effetto evaporativo e il sistema multistrato comportano, inoltre, una riduzione dei consumi energetici dell'edificio per il raffrescamento estivo, e delle conseguenti emissioni di CO₂, e un maggiore isolamento acustico (Allnut et al., 2014).

Infine, i tetti verdi hanno importanti benefici sulla qualità ambientale dell'intorno (Al-Kodmany, 2018b; Allnut et al., 2014):

- migliorano la qualità dell'aria e dell'acqua drenata grazie al processo di fotosintesi delle piante e alla filtrazione delle particelle fini trasportate dall'acqua piovana o di irrigazione;
- incentivano la nascita di nuovi habitat e il ripristino della biodiversità nell'ambiente urbano attirando specie selvatiche come uccelli e insetti;
- permettono l'assorbimento dei rumori di frequenza più elevata, come quelli prodotti da traffico, macchinari e aerei, riducendo l'inquinamento acustico urbano.

Di seguito si riporta un caso studio relativo alla realizzazione di un orto pensile nell'ambito di un progetto di recupero di un complesso industriale abbandonato nella città di Torino.

L'OrtoAlto Le Fonderie Ozanam è il primo orto pensile realizzato nell'ambito del progetto OrtiAlti dell'associazione omonima che opera

2. L'agricoltura urbana

nella città di Torino, il cui intento è quello di recuperare e trasformare tetti piani in orti pensili di comunità (OrtoAlti, 2020a).



Figura 2-8 Vista dell'OrtoAlto Le Fonderie Ozanam, Torino (OrtoAlto Le Fonderie Ozanam, 2020)

Questo progetto è stato realizzato nel 2016 sulla copertura del ristorante Le Fonderie Ozanam che occupa alcuni locali di un ex complesso industriale nato nel quartiere Borgo Vittoria agli inizi del '900 come stamperia di lamiere, divenuto poi Casa Ozanam di proprietà della città di Torino che l'ha affidata ad associazioni e cooperative sociali (OrtoAlto Le Fonderie Ozanam, 2020).

Una metà della copertura della manica est del complesso, di superficie totale pari a 300 m², è stata destinata all'orto all'aperto installando uno strato impermeabilizzante in PVC e un sistema intensivo ad orto pensile, dopo aver realizzato una scala di accesso, parapetti e camminamenti (OrtoAlto Le Fonderie Ozanam, 2020).

I 25 cm di substrato permettono la coltivazione di diverse tipologie di ortaggi, fra cui pomodori, insalate, peperoni, melanzane, zucchine, che

2. L'agricoltura urbana

vengono utilizzati nel ristorante gestito da una cooperativa sociale (Harpo verdepensile, 2020; OrtoAlto Le Fonderie Ozanam, 2020).

L'OrtoAlto è aperto agli abitanti del quartiere per coinvolgerli nella sua cura e gestione ed è luogo di iniziative di inclusione sociale e inserimento lavorativo per richiedenti asilo politico, di educazione ambientale e animazione culturale (OrtiAlti, 2017).

Il progetto è stato autofinanziato e supportato da soggetti privati per un totale di 100.000 € ed è oggi in fase di ampliamento con la realizzazione di un giardino mellifero sulla copertura della manica ovest del complesso (OrtiAlti, 2017).

La stagionalità della produzione legata all'agricoltura all'aperto, soprattutto nelle regioni con inverni rigidi, ha portato a sviluppare un interesse per le serre, che nelle aree urbane, data la scarsità e i costi dei terreni liberi e la necessità di ampia luce solare, vengono costruite sulle coperture degli edifici, sia nuovi che già esistenti (Ackerman, 2012; Proksch et al., 2019). L'ambiente controllato e la produttività delle tecniche di urban farming utilizzate, infatti, permettono di rifornire gli abitanti con prodotti freschi per tutto l'anno (Ackerman, 2012).

Le serre su tetto possono essere sia implementate su scala commerciale, affiliate ad un singolo rivenditore o con più canali di distribuzione, su edifici commerciali o industriali, sia realizzate da istituti di ricerca e organizzazioni non-profit per studiare e promuovere tecniche di produzione nuove e più sostenibili (Thomaier et al., 2015). In entrambi i casi possono essere aperte al pubblico per visite o programmi di formazione (Thomaier et al., 2015).

Gli elevati costi di costruzione e consumi energetici, questi ultimi legati soprattutto al riscaldamento nei mesi invernali, rappresentano dei fattori critici per la realizzazione e gestione di una serra su tetto su scala commerciale, ma la creazione di sinergie con l'edificio ospitante e la produzione di prodotti di alta qualità possono contenerli e permetterne la sostenibilità sia economica che ambientale (Ackerman, 2012; Proksch et al., 2019).

2. L'agricoltura urbana

2.3.2 La struttura delle serre

La tipologia costruttiva più utilizzata per le serre su tetto è quella definita “*Venlo*” o olandese, caratterizzata da un tetto a falde multiple e da un ampio spazio di ventilazione (Proksch et al., 2019; Rabensteiner S.r.l., 2020b).

La struttura portante può essere in alluminio o acciaio, mentre i sistemi di vetratura sono costituiti da pannelli in vetro singolo o in policarbonato multistrato (Gould & Caplow, 2012).

Gli impatti ambientali e i costi di una serra su tetto possono rappresentare dei limiti per la sua realizzazione (Sanyé-Mengual et al., 2015).

È importante tenere in considerazione quelle che vengono definite “*embodied energy*” e “*embodied carbon*”, ovvero le quantità di energia e di emissioni di gas serra totali legate alla fase di produzione dei materiali, dall'estrazione all'assemblaggio (Proksch et al., 2019).

Uno studio condotto dall'ICTA (Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals) dell'Universitat Autònoma de Barcelona su una delle due serre idroponiche situate sul tetto dell'edificio condiviso con l'ICP (Institut Català de Paleontologia) ha rilevato che nell'intero ciclo di vita della struttura i fattori che più contribuiscono agli impatti ambientali e ai costi totali sono la produzione e il mantenimento dei materiali, riferiti rispettivamente all'acciaio e alla sostituzione degli elementi plastici, in particolare del policarbonato (Sanyé-Mengual et al., 2015). La Tabella 3.1 mostra i risultati delle analisi di impatto ambientale ed economica. Si rileva che la serra oggetto dell'analisi, la cui struttura è rappresentata in Figura 3.1, ha una superficie di circa 125 m² e che la “*Life Cycle Assessment*” (LCA) è stata condotta, considerando un ciclo di vita di 50 anni, in relazione a tre indicatori (Sanyé-Mengual et al., 2015):

- “*Normalised-ReCiPe*”, che rappresenta l'indicatore di impatto aggregato dato dalla sommatoria di 18 indicatori ambientali intermedi, normalizzati e pesati (RIVM, 2011);
- “*Global Warming Potential*” (GWP), che rappresenta il rapporto tra la quantità di forzante radiativo aggiuntivo, aggregato in un certo intervallo di tempo, causato da un'emissione di 1 kg di gas serra e quello causato dal rilascio di 1 kg di CO₂ nello stesso intervallo temporale (RIVM, 2017);

2. L'agricoltura urbana

- “*Cumulative Energy Demand*”, che rappresenta la quantificazione dei consumi energetici diretti ed indiretti durante il ciclo di vita di un prodotto (energia primaria), tra cui quelli legati ai processi di estrazione, manifattura e smaltimento delle materie prime ed ausiliarie (Huijbregts et al., 2006).

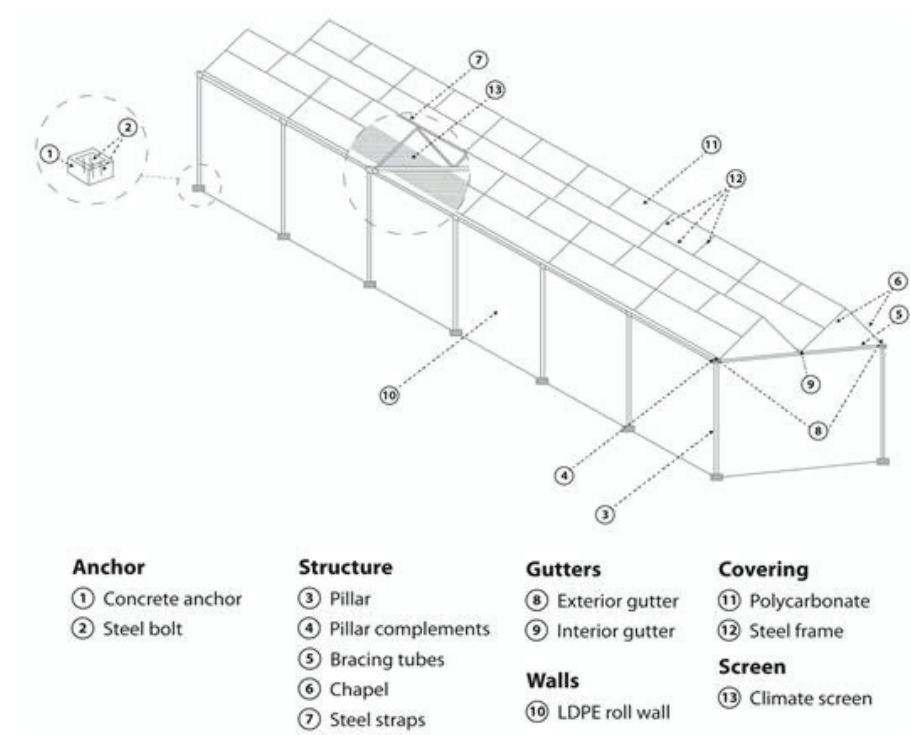


Figura 2-9 Elementi costituenti la serra dell'ICTA-ICP Rooftop Greenhouse Laboratory (RTG-Lab) (Sanyé-Mengual et al., 2015)

Gli acronimi TC e TP nella tabella successiva si riferiscono rispettivamente ai costi e profitti totali.

2. L'agricoltura urbana

Tabella 2.1 Impatti ambientali e costi relativi al ciclo di vita della serra dell'ICTA-ICP RTG-Lab per un'unità funzionale di 1 m² per un intervallo temporale di 1 anno (Sanyé-Mengual et al., 2015)

	Norm-ReCiPe [Pt]	GWP [kg CO ₂ eq.]	CED [MJ]	TC [€]	TP [€]
Rooftop Greenhouse (RTG)	3.30E-02	2.42E+00	4.40E+01	11.9	0
Materials	2.97E-02	1.02E+00	1.98E+01	5.02	-
Steel [%]	96.4	69.5	75.6	62.2	-
Polycarbonate (PC) [%]	2.2	26.8	19.7	5.3	-
Polyethylene (PE) [%]	0.1	1.5	2.8	21.3	-
Climate screen [%]	0.1	1.3	1.2	11.2	-
Concrete [%]	1.0	0.8	0.8	0.1	-
Construction	1.71E-06	1.40E-04	3.94E-03	0.32	-
Maintenance	3.28E-03	1.39E+00	2.41E+01	6.51	-
Polycarbonate (PC) [%]	77.4	75.2	58.9	16.2	-
Polyethylene (PE) [%]	17.4	16.8	33.1	6.0	-
Climate screen [%]	5.1	8.0	8.0	77.7	-
End of life	3.18E-05	7.74E-03	1.29E-01	n.d.	-

I regolamenti edilizi e le norme antincendio possono incidere negativamente sulla quantità e la tipologia dei materiali necessari per la realizzazione delle serre su tetto (Proksch et al., 2019; Sanyé-Mengual et al., 2015).

Le strutture, inoltre, sono dotate di sistemi automatici di controllo del clima e dell'illuminazione in modo da garantire le condizioni ambientali ottimali per la crescita delle piante ed eventualmente l'allevamento dei pesci (Ackerman, 2012; Proksch et al., 2019).

Dunque, con riferimento alla struttura e alle attrezzature necessarie, la produzione in una serra su tetto sarà sempre più dispendiosa in termini di risorse rispetto all'agricoltura all'aperto e su suolo, ma una corretta progettazione strutturale, che eviti il sovradimensionamento degli elementi, e la scelta di materiali più duraturi o la cui sostituzione, seppure frequente, abbia un impatto minore possono renderla più sostenibile nel lungo termine (Proksch et al., 2019).

L'installazione delle serre sulle coperture permette di recuperare passivamente il calore rilasciato dagli edifici sfruttando l'effetto isolante,

2. L'agricoltura urbana

inoltre tramite un sistema attivo di ventilazione è possibile recuperare il calore e la CO₂ dall'aria esausta (Gould & Caplow, 2012; North-West Europe, 2020; Proksch et al., 2019). Ciò permette di:

- migliorare le performance dell'edificio ospitante (North-West Europe, 2020; Proksch et al., 2019);
- ridurre i consumi energetici necessari al riscaldamento della serra nei mesi invernali e le conseguenti emissioni di CO₂, che possono essere elevati, soprattutto nelle zone più settentrionali, se si fa affidamento solo su sistemi HVAC (*"Heating, Ventilation and Air Conditioning"*) indipendenti alimentati con carburanti fossili (Gould & Caplow, 2012; Proksch et al., 2019);
- fornire alle piante una fonte di CO₂, necessaria per il processo di fotosintesi, alternativa al tradizionale impianto di fertilizzazione (North-West Europe, 2020; Proksch et al., 2019).

Il progetto GROOF (2017-2021), *"Greenhouses to reduce CO₂ on Roofs"*, del programma europeo Interreg North-West Europe sta finanziando e supportando nuovi progetti di serre su tetto per sperimentarne e dimostrarne l'efficacia in questo senso per modelli sia commerciali che sociali (North-West Europe, 2020).

Il calore in eccesso immagazzinato nella serra può, poi, alimentare il sistema di climatizzazione dell'edificio (Ackerman, 2012; Thomaier et al., 2015).

Gli edifici che ospitano attività che richiedono e generano molto calore, come alcune attività industriali, cucine professionali, produzione di prodotti da forno, sono, dunque, particolarmente adatti all'integrazione con le serre su tetto (Ackerman, 2012; Thomaier et al., 2015).

Il riutilizzo, dopo adeguati trattamenti di filtrazione e disinfezione, delle acque grigie provenienti da lavabi e docce per la produzione delle piante è un'ulteriore soluzione per rendere l'uso delle risorse più efficiente (Gould & Caplow, 2012; Proksch et al., 2019).

La tipologia di serra su tetto più diffusa è quella idroponica, mentre le serre acquaponiche sono solo alcune a causa dell'elevata capacità strutturale che richiedono alla copertura per sostenere il peso delle vasche dei pesci, che in alcuni progetti vengono installate ai livelli inferiori (Proksch et al., 2019);

2. L'agricoltura urbana

Thomaier et al., 2015). Di seguito si analizzano due casi studio in USA ed Europa.

Le serre di Gotham Greens sono una rete di 8 serre idroponiche che si trovano in 5 Stati USA, di cui 4 sono state realizzate sulle coperture di edifici a diverse destinazioni d'uso e le altre, più recenti, in siti dismessi (Gotham Greens, 2020).



Figura 2-10 La prima serra di Gotham Greens a Greenpoint, New York City (Gotham Greens, 2020)

Tabella 2-1 Serre idroponiche su tetto di Gotham Greens (Goodman & Minner, 2019; Gotham Greens, 2020)

Localizzazione	Anno	Superficie	Descrizione	Produzione annuale
Greenpoint, Brooklyn – New York City (New York)	2011	1.400 m ²	Serra sul tetto del Greenpoint Wood Exchange, edificio che ospita imprese di falegnami (Greenpoint	50 t

2. L'agricoltura urbana

			Manufacturing and Design Center, 2017)	
Gowanus, Brooklyn – New York City (New York)	2014	1.900 m ²	Serra sul tetto dello Whole Foods Market Store	100 t
Pullman Chicago (Illinois)	– 2015	7.000 m ²	Serra sul tetto dello stabilimento di saponi Method Products	-
Jamaica, Queens – New York City (New York)	2015	5.600 m ²	Serra sul tetto della fabbrica di giocattoli Ideal Toy Company	1.130 t

La serra di Greenpoint è stata la prima serra su tetto a scala commerciale in USA e rappresenta ancora oggi uno dei progetti di agricoltura urbana più emblematici nel mondo (Gotham Greens, 2020). Gli altri 4 progetti si trovano in Illinois, Rhode Island, Maryland e Colorado (Gotham Greens, 2020).

La struttura delle serre è caratterizzata da struttura portante in acciaio, altezza di gronda da 3 a 5 m e sistema di apertura regolabile fino a 85° (Nexus Corporation, 2020). Le serre sono dotate di sistemi automatici di controllo delle condizioni ambientali che permettono di regolare, oltre alle falde della copertura, gli aspiratori, le tende ombreggianti e le pompe di irrigazione (Goodman & Minner, 2019).

In queste serre high-tech (Figura 3.3) si producono per tutto l'anno verdure a foglia, come rucola e diverse varietà di lattuga, ed erbe aromatiche, in particolare basilico, utilizzate anche per la preparazione di condimenti e salse e destinate alla vendita al dettaglio online e alla fornitura

2. L'agricoltura urbana

di ristoranti, supermercati e alimentari (Goodman & Minner, 2019; Gotham Greens, 2020).



Figura 2-11 La serra di Gotham Greens sul tetto di Whole Foods, New York City (Gotham Greens, 2020)

Il sistema idroponico utilizzato è quello NFT con il ricircolo dell'acqua (Figura 3.4), che è diviso in 2 sottosistemi (AmHydro, 2018):

- il *"nursery system"*, in cui i semenzali maturano per 2 settimane in canali ravvicinati;
- il *"finishing system"*, in cui le piante crescono fino al raccolto per altre 2 settimane circa in canali che vengono distanziati per consentire uno sviluppo ottimale.

La propagazione delle piante avviene nel *"propagation system"*, in cui i semi germogliano per le prime 2 settimane in bancali appositi (AmHydro, 2018). Le componenti di entrambi i sistemi sono in HDPE 100% vergine (AmHydro, 2018). Per la produzione vengono utilizzati supporti in schiuma a bassa densità o spugna idrofila, fertilizzanti minerali e insetti benefici per la gestione dei parassiti (AmHydro, 2018; Gotham Greens, 2020).

2. L'agricoltura urbana



Figura 2-12 Sistema NFT a ricircolo (AmHydro, 2018)

Oltre a creare posti di lavoro per i residenti, solo le serre di New York City hanno più di 100 dipendenti, Gotham Greens collabora con scuole, orti comunitari, organizzazioni non-profit e imprese e supporta iniziative sociali (Goodman & Minner, 2019; Gotham Greens, 2020).

I progetti sono stati finanziati da investitori privati, il costo totale è di circa 1.000 \$/m², e le serre di Greenpoint e di Jamaica hanno ricevuto fondi dalla New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) nell'ambito del programma CEA per lo sviluppo di tecnologie ad elevata efficienza energetica (Goodman & Minner, 2019; Gotham Greens, 2011; Gould & Caplow, 2012; NYSERDA, 2020). Il fabbisogno di energia elettrica della serra di Greenpoint, ad esempio, è in parte soddisfatto da pannelli solari da 55 kW installati sulla copertura del Greenpoint Wood Exchange (Gotham Greens, 2011).

La Ferme Abattoir (Figura 3.5) è la prima urban farm realizzata tra il 2016 e il 2018 dalla compagnia belga BIGH (Building Integrated GreenHouses),

2. L'agricoltura urbana

che mira a realizzare una rete di fattorie su tetto sostenibili nelle maggiori città europee (BIGH, 2018).



Figura 2-13 Ferme Abattoir, Brussels (BIGH, 2018)

Questo progetto è stato realizzato sulla copertura del Foodmet, un mercato coperto che si trova nel distretto di Anderlecht a Brussels e occupa parte del sito che prima ospitava uno storico mattatoio (BIGH, 2018). Nella progettazione è stato seguito l'approccio qualitativo *"Cradle to Cradle"*, il cui obiettivo è quello di permettere il riciclo infinito dei materiali seguendo i principi dell'economia circolare (Beckers, 2019; BIGH, 2018).

La copertura del Foodmet (Figura 3.6) ha una superficie totale di 4.000 m², di cui una metà è stata destinata alla realizzazione di una serra che ospita un sistema acquaponico e uno idroponico e l'altra metà alla coltivazione di un orto pensile (Beckers, 2019).

2. L'agricoltura urbana



Figura 2-14 Vista della serra e dell'orto pensile, Ferme Abattoir, Brussels (BIGH, 2018)

Per la realizzazione della serra sono stati installati sulla copertura (Derbigum, 2018):

- un sottostrato di separazione bituminoso per fissaggio meccanico;
- una membrana impermeabilizzante bituminosa di spessore 4 mm;
- uno strato di cemento.

La serra tipo “*Venlo*” è in alluminio e vetro, ha un'altezza di gronda di circa 6 m e forma a L e si sviluppa per la metà della sua superficie su 2 livelli (Rabensteiner S.r.l., 2020a).

Il sistema acquaponico installato è del tipo “*decoupled*” ed è dotato di unità automatiche di controllo che permettono il funzionamento efficiente di entrambi i circuiti dell'acquacoltura e dell'idroponica (Beckers, 2019; ECF Farmsystems GmbH, 2020). Il circuito RAS è costituito da (Beckers, 2019; ECF Farmsystems GmbH, 2020):

- 14 vasche con capienza totale di 200 m³ di acqua con corrente continua, in cui si allevano 60.000 pesci della specie persico spigola striato;
- filtro meccanico;
- biofiltro;

2. L'agricoltura urbana

- filtro UV;
- ossigenatore.

Le componenti del sistema sono principalmente in plastica BPA-free e il ricircolo dell'acqua avviene ogni 2 ore (Beckers, 2019; ECF Farmsystems GmbH, 2020). Per l'allevamento dei pesci, nutriti con pellets certificati sostenibili e non OGM, non si utilizzano antibiotici (Beckers, 2019; BIGH, 2018).

Parte dell'acqua del circuito RAS viene utilizzata per la coltivazione idroponica di pomodori rossi e gialli con la tecnica dei media beds per un periodo di 34 settimane all'anno, e recentemente sono stati aggiunti anche melanzane e peperoni (Beckers, 2019; BIGH, 2018). Un vivaio vicino cura la propagazione e la prima parte della crescita delle piante in cubi di perlite, che vengono poi portati in serra e installati in sacche di substrato organico al di sopra di canali sospesi, che occupano un'area di 750 m² (BIGH, 2018). L'apporto della soluzione nutritiva avviene tramite quello che viene definito "*drip system*" tipo "*microtube*", ovvero con più microtubi di alimentazione da cui si dipartono dei gocciolatori, ciascuno dei quali serve una pianta ad intervalli regolari (BIGH, 2018; van Os et al., 2019).

Quotidianamente avviene uno scambio del 3-5% dell'acqua dal circuito RAS a quello idroponico ed è previsto il recupero del calore e della CO₂ prodotti dal primo attraverso un sistema di ventilazione e dell'acqua evaporata durante il processo di fotosintesi delle piante e poi condensata (Beckers, 2019; ECF Farmsystems GmbH, 2020).

2. L'agricoltura urbana

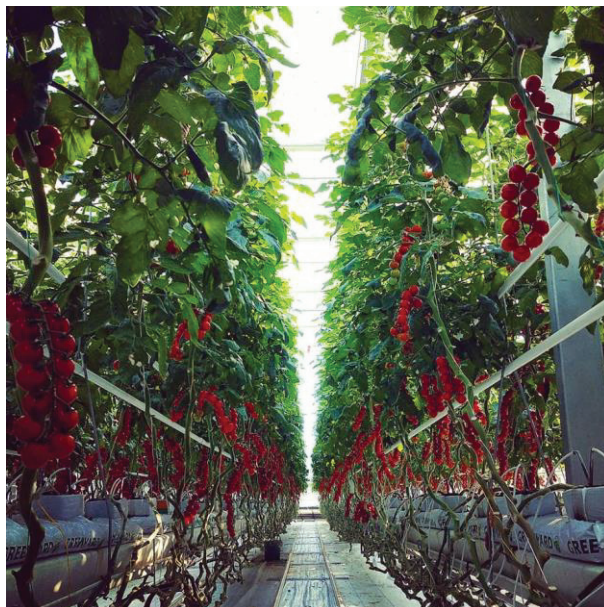


Figura 2-15 Coltivazione di pomodori con il sistema acquaponico, Ferme Abattoir, Brussels (BIGH, 2018)

Il sistema idroponico indipendente è, invece, destinato alla produzione di erbe aromatiche biologiche in vaso, come prezzemolo, coriandolo, basilico e timo, in un'area di 600 m² (Beckers, 2019; BIGH, 2018). La soluzione nutritiva viene fornita attraverso il sistema a ricircolo “*ebb and flow*” o “*flood and drain*”, che consiste nel sommergere per un certo periodo di tempo la base di ciascun vaso posizionato su bancali con vassoi drenanti (BIGH, 2018; van Os et al., 2019). Un sistema di illuminazione a LED permette la produzione per tutto l'anno e tende verticali e orizzontali ne riducono l'inquinamento luminoso (Beckers, 2019; BIGH, 2018).

2. L'agricoltura urbana



Figura 2-16 Coltivazione idroponica di erbe aromatiche biologiche in vaso, Ferme Abattoir, Brussels (Beckers, 2019)

Sia per il sistema acquaponico che per quello idroponico, come per l'orto pensile, si utilizza acqua sotterranea pompata da una falda acquifera sottostante il Foodmet (20 m³/giorno), inoltre è stato installato un sistema di recupero delle acque piovane (Beckers, 2019; BIGH, 2018).

Parte dell'energia elettrica necessaria è fornita dagli 850 m² di pannelli solari installati sulla copertura del Foodmet e una pompa di calore fornisce il 60% del calore necessario alla serra, recuperato insieme alla CO₂ dalle unità di refrigerazione sottostanti (Beckers, 2019).

Per la produzione delle piante non vengono utilizzati prodotti chimici, ma bombi ed altri insetti benefici consentono l'impollinazione e la gestione dei parassiti (Beckers, 2019).

I volumi di produzione dichiarati sono di 35 t/anno di pesce, 15 t/anno di pomodori e 2.700 vasi a settimana di erbe aromatiche biologiche, che vengono venduti a rivenditori al dettaglio, supermercati, ristoranti, compagnie di catering e direttamente ai consumatori in un negozio nel Foodmet (Beckers, 2019; BIGH, 2018). I prodotti dell'orto, invece, coltivato da Giugno a Settembre, sono destinati all'economia sociale e solidale (Beckers, 2019).

2. L'agricoltura urbana

Alla Ferme Abattoir si organizzano progetti di formazione per persone disabili e di ritorno nel mondo del lavoro, oltre che per studenti e giovani professionisti, visite guidate ed eventi che permettono anche l'integrazione del vicinato (Beckers, 2019; BIGH, 2018).

Il costo totale del progetto di 2.700.000 € è stato sostenuto con il supporto di investitori pubblici e privati e un prestito bancario (Beckers, 2018, 2019).

2.3.3 Le Vertical Farms

La tipologia di CEA che più si sta diffondendo negli ultimi anni è quella delle “*vertical farms*”, dette anche “*plant factories*” in Asia o “*indoor farms*” in Europa, che utilizzano sistemi multipiano verticali per la produzione di cibo all'interno di edifici nuovi o già esistenti (Al-Kodmany, 2018b; Despommier, 2019; Goodman & Minner, 2019).

Il concetto di “*vertical farming*”, nato agli inizi del '900, è stato a lungo proposto per lo sviluppo di progetti futuristici di grattacieli o pareti verdi, ma gli studi del Prof. Dickson Despommier della Columbia University dai primi anni 2000 ne hanno messo in luce il potenziale concreto per lo sviluppo sostenibile delle città (Al-Kodmany, 2018b; Goodman & Minner, 2019; Thomaier et al., 2015). I sistemi utilizzati, infatti, permettono di aumentare la produttività al metro quadro di superficie occupata e questo è solo uno dei vantaggi rispetto all'altra tipologia di CEA, le serre su tetto (Despommier, 2019).

Le vertical farms sono orientate alla realizzazione di modelli di impresa su scala commerciale o di centri di ricerca e sviluppo high-tech (Despommier, 2019; Kozai et al., 2020).

La localizzazione all'interno degli edifici comporta la dipendenza dalla luce artificiale e da sistemi attivi di climatizzazione per la produzione e quindi elevati consumi energetici, ma l'utilizzo di lampade a LED e di fonti di energia rinnovabili, come quella solare, possono permettere il miglioramento delle prestazioni (Despommier, 2019; Kalantari et al., 2018; Proksch et al., 2019).

I sistemi multipiano (Figura 4.1) sono installati in ambienti termicamente isolati e quasi ermetici e sono costituiti da ripiani per la coltivazione fuori suolo impilati verticalmente e dotati di lampade elettriche, che consentono

2. L'agricoltura urbana

il processo di fotosintesi delle piante (Despommier, 2019; Kalantari et al., 2018; Kozai & Niu, 2020). Da qui deriva l'acronimo PFAL, "*Plant Factory with Artificial Lighting*", altro termine utilizzato per riferirsi a questa tipologia di CEA (Kozai & Niu, 2020).



Figura 2-17 Sistemi multipiano verticali in una PFAL (Planet Farms, 2019)

La distanza tra i ripiani è di circa 40 cm e per questo le colture più adatte alla produzione nelle vertical farms sono le verdure a foglia, coltivate prevalentemente con la tecnica idroponica (Despommier, 2019; Kozai & Niu, 2020).

La produzione in ambienti interni con involucri opachi permette il controllo ottimale delle condizioni ambientali come intensità di luce, temperatura e umidità, che non dipendono più dalla radiazione solare che può essere molto variabile durante la giornata e insufficiente nella stagione invernale (Kozai & Niu, 2020; Proksch et al., 2019). L'assenza di un contatto diretto con l'esterno, inoltre, consente di regolare in modo efficace le concentrazioni di CO₂ e di evitare l'ingresso di insetti, e quindi di malattie, indesiderati (Kozai & Niu, 2020). Ciò comporta un miglioramento della qualità dei prodotti (Kozai & Niu, 2020).

2. L'agricoltura urbana

Le vertical farms possono essere integrate in edifici adibiti a qualsiasi uso, che, se già esistenti, permettono di abbatterne i costi di avvio (Kozai & Niu, 2020; Proksch et al., 2019).

Dopo le prime esperienze in Giappone, Corea del Sud e USA, risalenti agli inizi dello scorso decennio, il numero di vertical farms è cresciuto in modo significativo, con diverse centinaia di progetti realizzati anche in Europa, Canada e altri Stati asiatici (Despommier, 2019; Kozai & Niu, 2020).

I progetti più innovativi prevedono l'integrazione dei sistemi di vertical farming in edifici residenziali e commerciali, e non solo adibiti al solo scopo produttivo (Despommier, 2019).

In Italia l'ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile), dopo il primo prototipo italiano di vertical farm sviluppato per l'Expo 2015 a Milano, ha lanciato in Veneto il progetto "*Ri-Genera*", che mira a realizzare indoor farms idroponiche per il recupero di edifici dismessi (ENEA, 2020).

Un approccio diverso dalle comuni PFALs è prevedere una parte dell'involucro che ospita i sistemi multipiano trasparente per coniugare i vantaggi di entrambe le tipologie di CEA, come avviene presso Vertical Harvest, una vertical farm idroponica che si trova a Jackson Hole nello Stato del Wyoming (USA), in cui i ripiani contenenti le piante scorrono lungo binari per ricevere la luce naturale dalle vetrate (Vertical Harvest, 2020). Lo stesso approccio è stato utilizzato dallo studio cinese Sasaki Associates nel progetto dei centri di produzione e di ricerca e sviluppo per il Master Plan di un'area del distretto di Pudong a Shanghai, destinata a diventare un modello di urban farming integrato nella comunità (Sasaki Associates, 2020).

2. L'agricoltura urbana



Figura 2-18 Vertical Harvest, Jackson Hole (Vertical Harvest, 2020)

AeroFarms è una rete di 3 vertical farms idroponiche che si trovano a Newark nello Stato del New Jersey (USA), tutte realizzate in edifici dismessi (AeroFarms, 2020). La Tabella 4.1 ne riporta una panoramica.

L'ultima vertical farm realizzata, la Global Headquarters (Figura 4.3), è considerata la più grande al mondo per capacità di produzione annuale (AeroFarms, 2020).

Tabella 2-2 Vertical farms di AeroFarms (AeroFarms, 2020)

Denominazione	Anno	Superficie	Descrizione	Produzione annuale
Research and Development Farm	2013	510 m ²	Vertical farm in un ex nightclub	-
Newark Farm	2015	2.790 m ²	Vertical farm in un ex campo	-

2. L'agricoltura urbana

			paintball e laser tag
Global Headquarters	2016	6.500 m ²	Vertical farm in un'ex acciaiera



Figura 2-19 Global Headquarters di AeroFarms, Newark (AeroFarms, 2020)

Il sistema idroponico utilizzato è quello aeroponico, che permette di produrre per tutto l'anno tonnellate di baby greens, micro greens ed erbe aromatiche, tra cui rucola, diverse varietà di cavolo, crescione d'acqua, lattuga e senape, in un ciclo di crescita che va dai 12 ai 16 giorni controllato tramite sistemi automatici (AeroFarms, 2020; Harwood & Hayashi, 2020). I prodotti sono destinati alla vendita al dettaglio, all'ingrosso e alla fornitura delle aziende del foodservice (AeroFarms, 2020; Harwood & Hayashi, 2020).

AeroFarms ha sviluppato un brevetto sia per i sistemi multipiano con tecnologia aeroponica a ciclo chiuso (Figura 4.4), costituiti da moduli impilabili verticalmente e orizzontalmente, che per il supporto per le

2. L'agricoltura urbana

piante, ricavato da plastica riciclata e senza BPA e riutilizzabile dopo un trattamento di sanificazione (AeroFarms, 2020; Harwood & Hayashi, 2020).

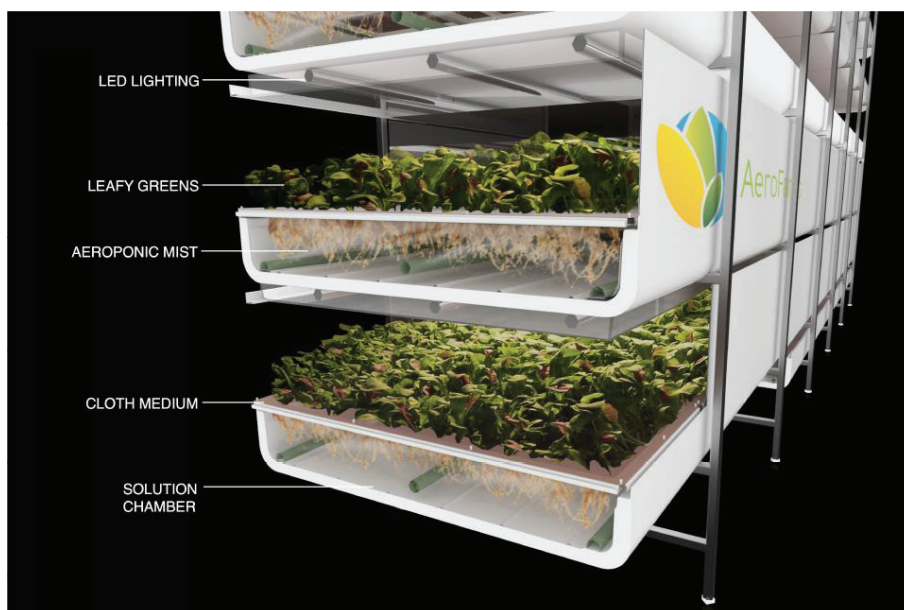


Figura 2-20 Tecnologia aeroponica brevettata di AeroFarms (AeroFarms, 2020)

La compagnia, il cui progetto è sostenuto da investitori privati, collabora anche con scuole e università (AeroFarms, 2020; Harwood & Hayashi, 2020). Già nel 2011 ha installato un'unità di 5 m² nella mensa della Philip's Academy Charter School che viene curata dagli studenti (AeroFarms, 2020).

2.4 LA SOSTENIBILITÀ DELLE PRATICHE DI URBAN FARMING

Praticare l'agricoltura e l'allevamento sulle coperture degli edifici e al loro interno comporta numerosi benefici sia diretti che indiretti, i primi sono quelli direttamente legati all'integrazione delle soluzioni di urban farming

2. L'agricoltura urbana

nelle strutture ospitanti, i benefici indiretti sono, invece, quelli che derivano dall'accorciamento della filiera alimentare e dall'utilizzo di tecniche più efficienti rispetto a quelle dell'agricoltura tradizionale (Ackerman, 2012; Kalantari et al., 2018).

Le sfide maggiori per l'attuazione di queste pratiche sono quelle legate agli aspetti strutturali e normativi e ai progressi tecnologici ancora necessari in campo energetico, ma il riutilizzo delle risorse che altrimenti andrebbero perse nei processi urbani può assicurarne la sostenibilità sotto tutti gli aspetti (Despommier, 2019; Kalantari et al., 2018; Thomaier et al., 2015). Una preziosa opportunità è ad esempio offerta dal recupero delle acque piovane, delle acque reflue e dei rifiuti organici che possono essere utilizzati per fornire acqua, energia e nutrienti, inputs fondamentali per la produzione di cibo, andando allo stesso tempo ad alleggerire il carico sui rispettivi sistemi di drenaggio e di trattamento (Ackerman, 2012; Kalantari et al., 2018).

3 L'ACQUAPONICA

3.1 L'ACQUACOLTURA

Sin dall'antichità i prodotti ittici sono stati di primaria importanza per gli uomini, infatti il pesce è sempre stato uno dei principali alimenti presenti nella dieta dell'uomo per il suo elevato valore nutrizionale e per le sue caratteristiche organolettiche.

Dunque, il pesce rappresenta un alimento primordiale per la specie umana e in questo contesto si colloca l'acquacoltura la cui origine risale probabilmente a 5 mila anni fa', infatti in un bassorilievo sulla tomba di Aktihetep (2500 a.C.) in Egitto è rappresentato un uomo che raccoglie tilapie in uno stagno (Fig. 2.1).



Figura 3-1 Bassorilievo sulla tomba di Aktihetep che mostra una rete da pesca sul Nilo 2500 A.C. (www.waterandfoodsecurity.org)

In Italia, in particolare nell'antica Roma, i pesci sono stati sempre una parte importante dell'alimentazione. Nei laghi costieri, nelle lagune o in apposite peschiere venivano allevati molluschi, soprattutto ostriche, specie pregiate come spigole, orate e murene, la cui carne ai tempi era molto apprezzata. Quindi, si può affermare che l'acquacoltura è un'attività che fa parte della nostra cultura alimentare e delle tradizioni.

3. L'acquaponica

Dopo la seconda guerra mondiale in Italia si hanno dei risultati eccellenti dal punto di vista delle tecniche di allevamento delle trote, tecniche che sono state prese come riferimento anche per l'allevamento di altre specie.

Con lo svilupparsi della Grande Distribuzione Organizzata e con la progressiva diminuzione di risorse naturali, si è avuto un incremento dello sviluppo dell'acquacoltura in Italia.

Oggi, con il termine Acquacoltura ci si riferisce all'insieme di attività svolte dall'uomo, distinte dalla pesca, che hanno come obiettivo la produzione controllata di organismi acquatici. Con riferimento al prodotto che se ne trae, si parla, più specificatamente, di:

- Piscicoltura o itticultura – es. trota coltura, anguillicoltura, carpi coltura etc;
- Molluschicoltura – es. mitilicoltura, ostricoltura etc;
- Crostaceicoltura – es. astaci coltura, gamberi coltura etc;
- Algicoltura – es. macroalghe, fitoplancton.

Secondo le previsioni dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO), il consumo mondiale di prodotti ittici, che è passato da 10 kg procapite/annui nel 1960 a più di 19 kg nel 2012, continuerà ad aumentare e l'incremento della domanda non potrà essere soddisfatto dal prodotto proveniente dalla sola attività di pesca.

Parallelamente alla crescente domanda è aumentato lo sfruttamento degli stocks ittici da parte degli operatori della pesca: l'adozione di tecniche sempre più innovative e i fattori legati all'inquinamento delle acque ha portato alla costante diminuzione ed impoverimento delle risorse naturali. Questa condizione ha permesso lo sviluppo dell'acquacoltura, poiché è in grado di rispondere alla crescente domanda di cibo della popolazione mondiale, introducendo con continuità sul mercato prodotti allevati in maniera sicura e controllata con caratteristiche di qualità, salubrità e freschezza.

Secondo la FAO tale settore alimentare ha registrato una rapida crescita nel panorama delle produzioni agro-alimentari mondiali e stima che nel 2030 oltre il 65% dei pesci da consumo sarà prodotto in acquacoltura.

Secondo la definizione della FAO l'acquacoltura è *"L'allevamento degli organismi acquatici, quali pesci, molluschi, crostacei e piante d'acqua, realizzato"*

3. L'acquaponica

attraverso interventi nel processo produttivo finalizzati ad incrementare la produzione come lo stoccaggio, l'ingrasso, la protezione dai predatori, etc. L'allevamento implica che la proprietà delle risorse sia privata, di un singolo ovvero di una pluralità di soggetti". Questo fattore differenzia il prodotto da acquacoltura da quello della pesca, rappresentato da organismi acquatici che costituiscono una risorsa di comune proprietà.

Oggi l'acquacoltura rappresenta il 41% della produzione ittica mondiale, per un valore di 95 miliardi di euro. Secondo i risultati delle stime della FAO, riportati nella Tabella 2.1, il primo paese produttore è la Cina con il 91,92% del pesce allevato a livello mondiale. L'Europa si trova al terzo posto, dopo le Americhe, con il 2,69%.

Tabella 3-1 Produzione globale di acquacoltura 1950 – 2017: quantità e percentuale (FAO – Sezione Informazioni e statistiche sulla pesca e l'acquacoltura - 19/11/2019)

	1950	2017
Africa	2.393 t	2.214.143 t
	0,37%	1,98%
Americhe	64.623 t	3.591.458 t
	10,12%	3,21%
Asia	344.390 t	102.896.169 t
	53,94%	91,92%
Europa	168.981 t	3.010.268 t
	26,47%	2,69%
Oceania	4.000 t	234.586 t
	0,63%	0,21%
Altre	54.070 t	-
	8,47%	-

3. L'acquaponica

MONDO	638.457 t	111.946.624 t
--------------	-----------	---------------

3.2 IMPIANTI DI ACQUACOLTURA

I sistemi acquatici possono essere distinti in:

- Sistemi naturali (ecosistema);
- Sistemi modificati.

I sistemi naturali operano secondo cicli naturali, nei quali le diverse componenti della catena alimentare sono in equilibrio tra di loro; generalmente, i cicli produttivi sono piuttosto lenti e quindi forniscono produzioni limitate in termini di prodotti destinati al consumo umano.

Con il passare degli anni grazie al progresso tecnologico l'acquacoltura si è evoluta. Infatti, all'interno di tale settore, sono state introdotte tecniche di allevamento innovative e tecnologie il cui scopo è la modifica degli ecosistemi acquatici e l'aumento delle produzioni. A seconda dei sistemi e delle tecnologie utilizzate i sistemi acquatici modificati possono essere classificati in (Demir E. et al., 2014):

- Sistemi aperti: sono sistemi molto antichi ma risultano essere i più utilizzati. All'interno di questi sistemi la produzione avviene in acque naturali ad esempio corsi d'acqua, lagune o mare. Uno dei sistemi aperti più semplici è rappresentato da un sistema naturale delimitato da barriere artificiali (es. argini, barriere). Se l'allevamento non è intensivo può essere gestito naturalmente;
- Sistemi semichiusi: sono sistemi caratterizzati dall'utilizzo di acque provenienti da risorse idriche naturali, immesse e indotte a circolare all'interno degli ambienti d'allevamento per poi essere scaricate normalmente. Questi sistemi vengono realizzati in aree adeguatamente predisposte ed attrezzate, tenendo in considerazione la tipologia d'impianto che si vuole realizzare;

3. L'acquaponica

- Sistemi chiusi: sono sistemi in cui l'acqua utilizzata per l'allevamento non è scambiata con risorse idriche esterne, ma è continuamente riutilizzata attraverso pompe che permettono di reinserire le acque all'interno dell'ambiente di allevamento. Gli scambi con l'esterno avvengono solo per necessità tecniche ad esempio: perdite di acqua per evaporazione, correzione dei parametri chimici, carico o svuotamento dell'impianto.

Le classificazioni dei sistemi di acquacoltura sono diverse a seconda dell'aspetto che viene preso in considerazione. Una classificazione può essere in base al tipo di allevamento, esso può essere realizzato in strutture:

- A terra;
- In mare.

Gli allevamenti a terra sono realizzati con vasche dalle quali l'acqua dopo essere stata trattata per rimuovere residui organici legati all'alimentazione ed al metabolismo degli animali, viene mandata ad un corpo idrico recettore.

La maricoltura riguarda l'allevamento in mare e consiste nell'applicazione di pratiche quali la molluschicoltura e la piscicoltura, per la quale le strutture tipiche sono gabbie galleggianti, sommerse e sommergibili. La maggior parte della produzione di acquacoltura intensiva di pesce di mare nel Mediterraneo si svolge oggi in gabbia.

Inoltre, ci sono differenze nelle strutture utilizzate, nell'intensità di allevamento, nel grado di ricambio d'acqua e nei fattori da considerare nella scelta di specie e siti adatti. La scelta di un sito per un'attività di acquacoltura è influenzata da (Demir E. et al., 2014):

- Intensità di allevamento;
- Ricambio d'acqua necessario;
- Caratteristiche biologiche delle specie allevate.

3.2.1 Intensità di allevamento

L'intensità di allevamento è funzione del numero o biomassa di organismi per unità di area o volume e delle produttività degli impianti. L'intensità

3. L'acquaponica

dell'allevamento può essere classificata come intensiva, semi-intensiva o estensiva.

Tale classificazione di acquacoltura estensiva, semi-intensiva ed intensiva viene realizzata in funzione delle tecniche usate per la gestione degli allevamenti e della capacità di controllo dei parametri ambientali da parte dell'uomo. Il suo intervento consiste nel fornire alimento ai pesci e nel somministrare ossigeno all'acqua di allevamento. Il grado di specializzazione e di intervento cresce progressivamente passando dagli allevamenti estensivi a quelli intensivi (Demir E. et al., 2014).

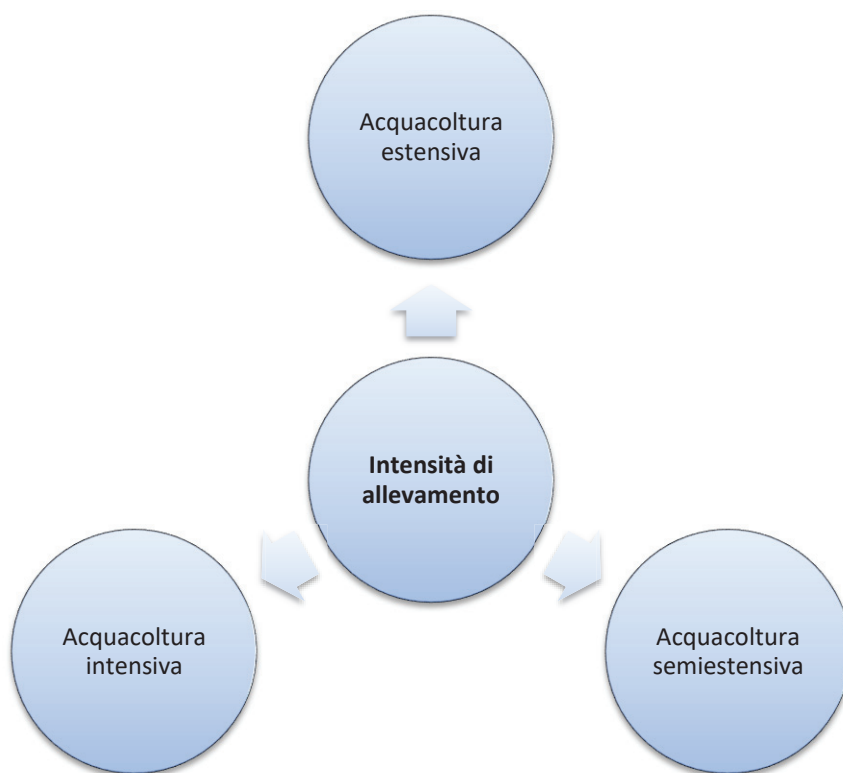


Figura 3-2 Sistemi di acquacoltura in base all'intensità di allevamento

Per acquacoltura estensiva si intende qualsiasi forma d'allevamento in cui l'alimentazione della specie allevata è totalmente a carico dell'ambiente di

3. L'acquaponica

allevamento. Quindi non è necessaria la somministrazione dell'alimento dall'esterno per ottenere l'accrescimento del prodotto.

Nella maggior parte dei casi, tale sistema è realizzato su grandi estensioni ed in ambienti seminaturali o naturali, come lagune o stagni costieri, dove sono presenti dei sistemi fissi che permettono la regolazione dei flussi idrici e la cattura dei pesci.

Le produzioni di tali sistemi sono limitate e sono dell'ordine di 100-150 kg/ha, questo è dovuto dalla natura stessa del sistema. In Europa i sistemi estensivi non sono comuni.

L'acquacoltura semiestensiva è uno sviluppo del sistema estensivo. In tale sistema per poter ottenere produzioni superiori a quelle che si possono ottenere con l'utilizzo delle sole risorse presenti in natura, l'alimentazione della specie allevata non è solo a carico dell'ambiente di allevamento ma viene integrata con alimento artificiale somministrato dall'esterno o aumentando la disponibilità di alimento naturale.

L'aumento di disponibilità di alimento naturale si può ottenere attraverso la concimazione delle acque che favorisce la produzione di fitoplancton, che viene utilizzato come alimento da piccoli organismi animali, che di conseguenza aumentano di quantità o attraverso la semina di avannotti da parte dell'uomo.

Questo sistema rispetto al sistema estensivo richiede superfici minori. Inoltre, non richiede frequenti ricambi di acqua, che avvengono per escursione di marea o con sistemi di pompaggio o di derivazione per gravità. Le produzioni sono comprese tra i 500 e 2400 kg/ha/anno.

L'acquacoltura intensiva viene effettuata in superfici di minori dimensioni rispetto a quelle dei sistemi estensivi e semiestensivi precedentemente descritti. Generalmente l'allevamento avviene in monocoltura e la densità di animali allevati per unità di superficie o volume è maggiore. Dato che le densità di allevamento sono maggiori e potrebbero alterare alcuni parametri è necessaria una costante osservazione dell'ambiente di allevamento per poter tenere sotto controllo le caratteristiche qualitative dell'acqua.

L'alimentazione della specie allevata non è a carico dell'ambiente di allevamento ma viene effettuata con alimento artificiale somministrato dall'esterno. La somministrazione può avvenire in maniera manuale o automatica per mezzo di distributori meccanici, con mangime secco

3. L'acquaponica

commerciale sotto forma di granulato che contiene elevate quantità di proteine.

Durante la fase di accrescimento, per tutte le specie che vengono allevate, è necessario effettuare delle periodiche selezioni che consentono di dividere i pesci per taglia. Questo consente di avere nella stessa struttura di allevamento individui di dimensioni simili e quindi di limitare fenomeni di competizione da parte degli individui più grandi e episodi di cannibalismo per le specie carnivore.

L'allevamento può essere realizzato in strutture a terra o in mare. La densità di allevamento, indicata come kg di prodotto/m³ o m² di acqua varia a seconda della specie e della tecnologia adottata (Demir E. et al., 2014).

Tabella 3-2 Comparazione delle caratteristiche generali dei sistemi di allevamento estensivi ed intensivi (Manuale Europeo di Acquacoltura)

	Acquacoltura estensiva	Acquacoltura intensiva
Sistemi di allevamento	Corpi idrici naturali e semplici strutture di contenimento	Sistemi di allevamento artificiali, serbatoi, gabbie, raceway etc.
Livello tecnologico	Basso	Alto
Grado di controllo, nutrizione, predatori, ambiente, malattie	Molto basso	Alto
Fonte di cibo per gli animali allevati	Organismi alimentari naturali	Mangime pellettizzato, artificiale
Produzione (kg/ha/anno)	Basso	Alto

3.2.2 Ricambio idrico

Il ricambio idrico indica la quantità di acqua ricambiata o il controllo dell'acqua nel sistema. In generale, i livelli di ricambio dell'acqua sono

3. L'acquaponica

statici, aperti, semi-chiusi a ricircolo (chiuso).

Nella maggior parte degli allevamenti ittici il ricambio d'acqua è aperto cioè a flusso continuo (flow-through), ai pesci viene fornita acqua fresca e ricca di ossigeno e si rimuove l'acqua contaminata. In questi sistemi il consumo di energia è relativamente basso, questo è dovuto al trasporto molto economico dell'acqua che, negli allevamenti a terra, avviene per gravità e per il basso livello tecnologico che richiede poca energia.

A causa dell'evaporazione, delle perdite e dell'acqua che si accumula nei pesci durante la crescita tutti i sistemi perdono acqua e questo comporta che tutti i sistemi devono rifornirsi di acqua.

I sistemi a ricircolo totale sono caratterizzati da un consumo giornaliero di acqua inferiore al 10% del volume totale. Questi sistemi sono costosi da creare e comportano costi supplementari dovuti all'elevato consumo di energia.

3.3 STRUTTURE PER L'ACQUACOLTURA

In Europa le principali strutture per l'allevamento di pesci comprendono stagni, vasche, canalizzazioni, recinti e gabbie. Nei sistemi di allevamento, per l'intera durata della vita di una specie ittica, solitamente non viene utilizzato un solo tipo di struttura, tranne in qualche allevamento di tipo intensivo (Demir E. et al., 2014).

3. L'acquaponica

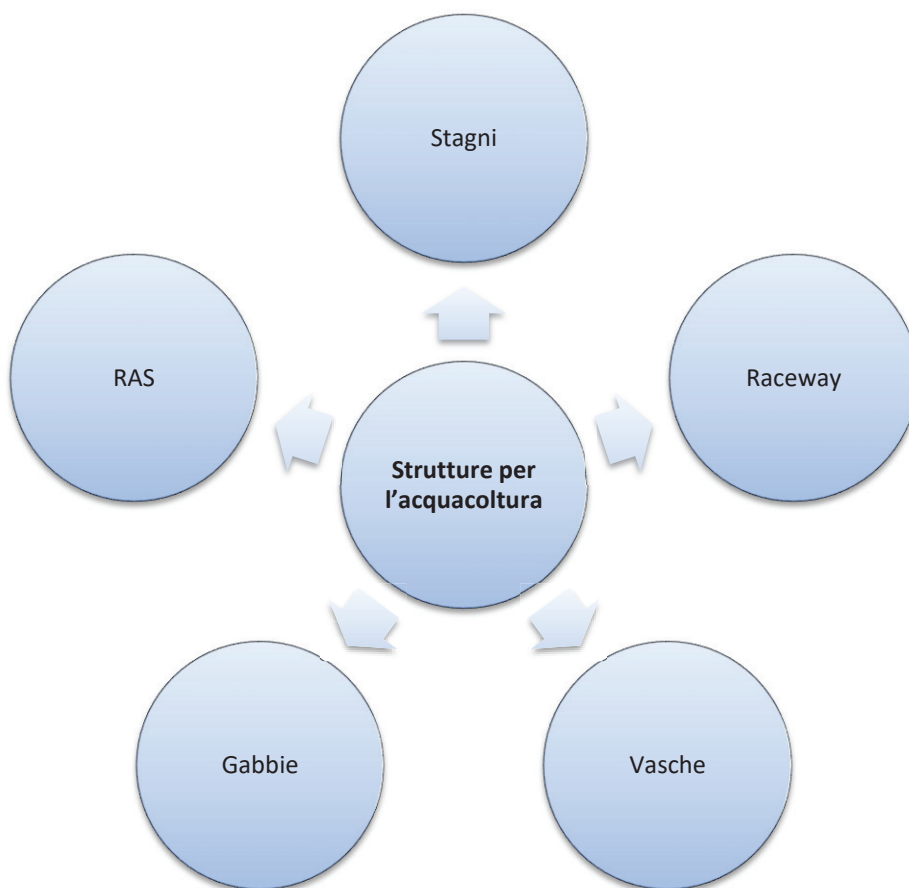


Figura 3-3 Sistemi di acquacoltura in base alla struttura

3.3.1 Lo stagno

Lo stagno è il tipo di allevamento più usato nel mondo. Gli stagni rispetto ad altre strutture, come vasche e gabbie, sono più economici da costruire ed hanno un costo di funzionamento minore. Sono caratterizzati da una densità di allevamento più bassa rispetto alle altre strutture ma la densità varia a seconda che il sistema sia estensivo, semi-intensivo o intensivo.

3. L'acquaponica



Figura 3-4 Piccolo stagno per l'allevamento di trote iridee in Islanda (Manuale Europeo di Acquacoltura)

Si suddividono in stagno:

- Naturale: tipo di stagno si trova in zone basse che si riempiono d'acqua o funzionano come bacini di raccolta per il deflusso;
- Artificiale: tipo un stagno realizzato dall'uomo, ad esempio a seguito della costruzione di una diga.

Gli stagni utilizzati in acquacoltura sono generalmente di origine artificiale. In base al tipo di approvvigionamento idrico possono essere classificati in:

- Stagni alimentati da acque sorgive;
- Stagni alimentati da acque meteoriche;
- Stagni alimentati da acque superficiali.

Dal punto di vista costruttivo possono essere distinti in:

- Stagni ottenuti per sbarramento, realizzati attraverso la costruzione di una diga, di sbarramenti, di argini o di analoghe strutture fuori terra, atte a contenere acqua;
- Stagni ottenuti per escavazione, si ottengono mediante opere di scavo e di sbancamento con rimozione di suolo da un'area destinata a contenere acqua.

3. L'acquaponica

Gli stagni ottenuti per sbarramento hanno maggiori vantaggi rispetto a quelli ottenuti per escavazione, uno dei quali è rappresentato dai minori costi di costruzione. Generalmente gli stagni ottenuti per escavazione sono realizzati in aree relativamente pianeggianti e quindi per effettuare lo scarico è necessario l'utilizzo di una pompa.

Il tipo più semplice e più comune di stagno creato in Europa è quello per escavazione, che è costruito scavando una fossa.

La maggior parte degli stagni non rientrano in una sola delle tipologie descritte; infatti alcuni possono essere realizzati sia con opere di sbarramento, sia con opere di escavazione. Generalmente, in aree pianeggianti, la soluzione costruttiva più economica prevede scavi e sbancamento di modesta entità e il reimpiego del terreno di risulta per la costruzione degli argini e degli sbarramenti (Demir E. et al., 2014).

3.3.2 Raceway

Con il termine anglosassone “raceway” si indicano i canali artificiali utilizzati nei sistemi semichiusi di acquacoltura.

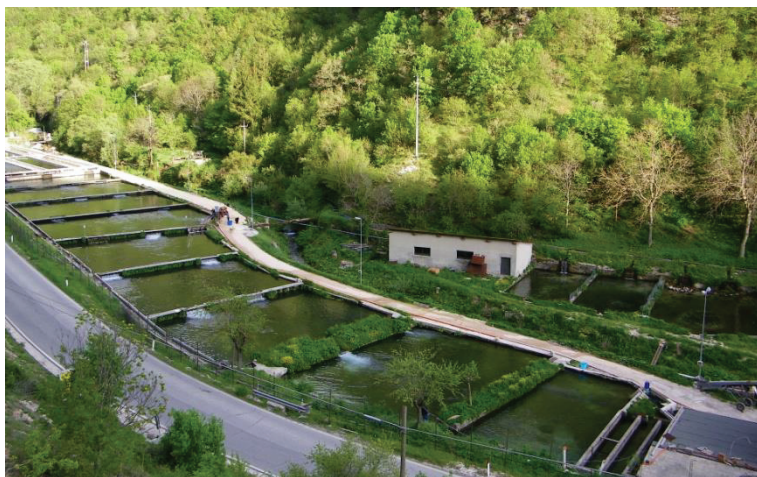


Figura 3-5 Raceways per l'allevamento di trote nel Parco Nazionale dei Monti Sibillini (www.allevamentotrote.com)

I raceway possono essere considerati come serie di stagni rettangolari, che si sviluppano in lunghezza con larghezze inferiori a 6-7 m e profondità di circa 1-2 m. In queste strutture si possono avere densità di allevamento

3. L'acquaponica

maggiori rispetto a quelle che normalmente vengono adottate in uno stagno perché questi funzionano con acqua corrente, ma per soddisfare i fabbisogni delle specie allevate e per eliminare l'ammoniaca richiedo acqua con buone caratteristiche.

Il principale vantaggio di questo sistema, rispetto ad altri meno intensivi, è dato dalla semplificazione di numerose operazioni quali: la distribuzione degli alimenti, i trattamenti sanitari e le operazioni di controllo, di selezione e di raccolta.

La disposizione dei raceway può essere:

- In serie;
- In parallelo.

I raceway in serie sono alimentati da un unico flusso d'acqua che viene caricato da un raceway a quello successivo

I raceway in parallelo sono alimentati da flussi d'acqua indipendenti che originano da un'unica canalizzazione di carico e scaricano in un unico canale collettore.

La maggior parte dei raceway sono fatti di calcestruzzo, ma alcune vasche, soprattutto quelle piccole, sono fatte di altri materiali come plastica, vetroresina e geomembrane (Demir E. et al., 2014).

3.3.3 Le vasche

In acquacoltura sono presenti una moltitudine di varietà di vasche; le diverse tipologie e i diversi modelli di vasche si differenziano tra di loro per la forma, le dimensioni e i materiali con cui sono realizzate.

Le vasche possono essere realizzate con materiali diversi tra cui i più utilizzati sono il cemento armato, la vetroresina e le materie plastiche.

3. L'acquaponica



Figura 3-6 Vasche circolati in Islanda (Manuale Europeo di Acquacoltura)

Per poter essere utilizzate in acquacoltura in modo corretto le vasche devono soddisfare alcuni requisiti, tra cui (Demir E. et al., 2014):

- Superfici interne delle vasche atossiche e sufficientemente lisce per evitare lesioni ai pesci;
- Flusso di acqua quantitativamente e qualitativamente adeguato alle esigenze delle specie allevate;
- Durevoli nel tempo;
- Resistenti alla corrosione e alle possibili sollecitazioni meccaniche;
- Forma e dimensioni devono essere tali da consentire le operazioni di pulizia e disinfezione in maniera agevole e veloce;
- Il più possibile economiche.

3. L'acquaponica

3.3.4 Le gabbie

Le gabbie sono costituite da un sacco di rete da pesca aperto nella parte superiore. Le gabbie possono essere realizzate in varie forme: quadrate, rettangolari o circolari.

Sono generalmente utilizzate in gruppi, singolarmente o collegate tra loro e ancorate al fondo. In questo modo ci si può lavorare, nutrire il pesce e gestirle da una struttura a terra o galleggiante posta in prossimità.

La forma delle gabbie varia in base al loro uso e a dove sono poste. Nei laghi generalmente si usano gabbie piccole invece in mare aperto si usano gabbie molto grandi capaci di resistere alle onde del mare e alle onde alte causate dal vento.

In alcuni casi, vengono utilizzate gabbie sommerse, in particolare nel Mar Mediterraneo e nei laghi dove il ghiaccio, nel periodo invernale, ricopre la superficie. Le gabbie sommerse sono resistenti a particolari condizioni atmosferiche ad esempio formazione di ghiaccio e banchi di ghiaccio alla deriva. Questo sistema di allevamento negli ultimi anni ha avuto un forte sviluppo.

Le gabbie, a seconda della loro localizzazione, si possono classificare in (Demir E. et al., 2014):

- Gabbie galleggianti;
- Gabbie sommergibili;
- Gabbie sommerse

3.3.5 Sistemi di acquacoltura a ricircolo RAS

Riciclare significa pulire l'acqua e usarla nuovamente nella stessa vasca o vasche. Il riciclaggio diventa un passaggio quasi obbligatorio quando il costo dell'acqua è elevato, l'accesso alle risorse idriche è costoso e limitato e c'è la necessità di dover innalzare la temperatura dell'acqua.

Per tale motivo sono stati introdotti dei nuovi sistemi di allevamento in terra detti sistemi di acquacoltura a ricircolo RAS, in cui l'acqua viene nuovamente utilizzata dopo il trattamento meccanico e biologico.

3. L'acquaponica

Gli allevamenti RAS rappresentano, però, ancora una piccola parte degli allevamenti europei di acquacoltura (Demir E. et al., 2014).

Questi sistemi presentano molti vantaggi, quali:

- Risparmio di acqua;
- Controllo della qualità dell'acqua;
- Alti livelli di biosicurezza;
- Facile controllo della produzione dei rifiuti.

Dagli sbocchi delle vasche l'acqua fluisce verso il filtro meccanico per rimuovere i solidi sospesi e dopo verso il biofiltro per diminuire i livelli di ammoniaca e nitriti (Fig. 2.9).

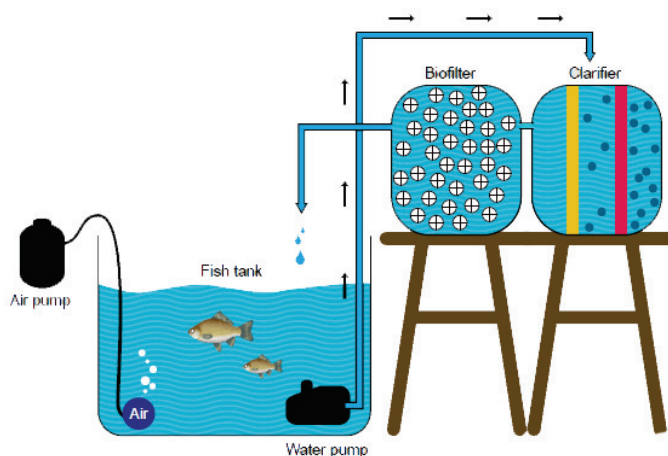


Figura 3-7 Schema del sistema di acquacoltura a ricircolo RAS

In alcuni casi, per migliorare ulteriormente la qualità, l'acqua viene areata e strippata dall'anidride carbonica, viene aggiunto ossigeno puro (Figura 2.9) e viene trattata con raggi UV (o disinfezione a ozono) per mantenere basso il livello dei batteri. Alcuni allevamenti RAS sono anche dotati di regolatori di pH e di scambio d'acqua.

I processi di depurazione delle acque devono seguire una certa sequenza per evitare che possano lavorare l'uno contro l'altro.

Per esempio (Van de Ven R. et al., 2014 – 2018):

3. L'acquaponica

- I biofiltri per rimuovere l'ammoniaca necessitano di acqua pulita, priva di solidi organici pertanto, è ragionevole posizionare i dispositivi di rimozione dei solidi prima dei biofiltri;
- I biofiltri producono anidride carbonica, quindi ha senso posizionare l'estrattore di anidride carbonica dopo questi;
- Gli estrattori di anidride carbonica porteranno l'acqua in equilibrio con i gas atmosferici. Perciò, l'aggiunta di ossigeno puro prima dello stripping causerà la perdita del gas in atmosfera.
- La variazione di temperatura dell'acqua cambierà la quantità di gas che può essere sciolto in esso. Pertanto, è utile aggiungere dispositivi di ossigenazione solo dopo il trattamento di riscaldamento.

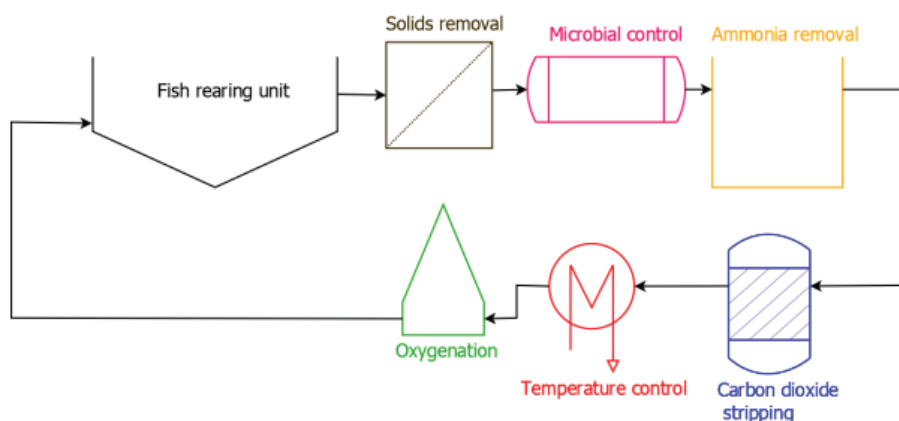


Figura 3-8 Schema sistema RAS con ulteriori trattamenti (Van de Ven R. et al., 2014 – 2018)

La modalità del flusso d'acqua tra le fasi di filtrazione può essere per gravità o mediante pompe. Generalmente, i flussi di gravità vengono utilizzati per il trasporto delle deiezioni alla rimozione dei solidi, mentre i flussi pompati possono essere usati per creare pressione per trasferire gas o per innalzare l'acqua in modo che possa fluire per gravità verso la filtrazione.

I costi di investimento, di energia e di gestione molto alti che caratterizzano il sistema RAS lo rendono un sistema non economico rispetto agli altri. Ma tale sistema è in grado di aumentare notevolmente la produttività e permette di ridurre drasticamente il consumo idrico.

3. L'acquaponica

Inoltre, a partire dall'integrazione di tale sistema con la produzione di piante senza suolo si ottengono sistemi acquaponici. Questo è possibile grazie all'uso delle sostanze di rifiuto dell'allevamento reimpiegabili per la produzione di colture vegetali sotto forma di concentrazione di nutrienti nell'acqua.

Tabella 3-3 Vantaggi e svantaggi dei sistemi RAS (Demir E. et al., 2014)

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione del consumo di acqua e del volume delle acque reflue (90-95%)	Complessità operativa e meccanica maggiore rispetto agli altri sistemi
Il consumo minimo di acqua in entrata consente trattamenti efficaci per migliorare la qualità dell'acqua e prevenire l'ingresso di malattie a costi contenuti	Investimento di capitale iniziale più alto ma costi di produzione più contenuti rispetto agli altri sistemi
I volumi minimi di acque reflue comportano la capacità di trattare sia le acque reflue che i fanghi	
È possibile il pieno controllo della temperatura dell'acqua consentendo una produzione continua indipendentemente dalle fluttuazioni ambientali e dell'acqua	
Un alto livello di controllo sulle condizioni dell'allevamento consente di ottimizzare la crescita del pesce aumentando quantità e qualità del prodotto	
Le strutture possono realizzarsi quasi ovunque in quanto la scelta del luogo non è determinata dalla possibilità di accedere a grandi quantità d'acqua	

3. L'acquaponica

3.4 L'ACQUACOLTURA IN ITALIA

In Italia dai dati FAO a disposizione si evince che l'acquacoltura ha avuto un andamento crescente fino al 2001, in cui si ha avuto il massimo della produzione pari a 218.330 tonnellate. Nel periodo 2002-2016 si evidenziano sensibili flessioni della quota di produzione con un successivo aumento negli ultimi 3 anni (Fig. 2.11).

In questi ultime tre anni la produzione oscilla intorno ai 150.000 tonnellate l'anno di pesce, che rappresentano il 40% della produzione ittica nazionale e il 30% della domanda di prodotti ittici freschi.

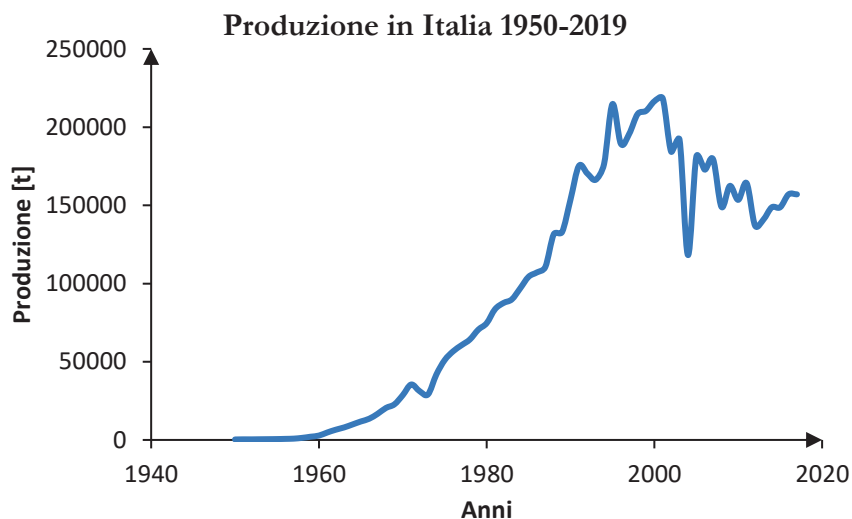


Figura 3-9 Produzione in Italia dal 1950 al 2019

La produzione italiana si occupa complessivamente di 30 tipi di pesce, molluschi e crostacei ma il 97% dei prodotti può essere sintetizzato in 5 specie: trota, spigola, orata, mitili e vongole veraci.

Infatti nel 2018, secondo l'associazione Piscicoltori Italiani (API), il pesce maggiormente allevato è la trota con una produzione annua di 37.500 tonnellate seguito dall'orata con 9.700 tonnellate e la spigola con 7.300 tonnellate. Nonostante questo, l'80% del pesce che mangiamo in Italia viene importato dall'estero.

3. L'acquaponica

L'Italia è la prima nell'Unione europea per quanto riguarda la molluschicoltura: è infatti il principale produttore di vongole veraci e rappresenta il 45% della produzione comunitaria di storioni e il 20% della trota iridea.

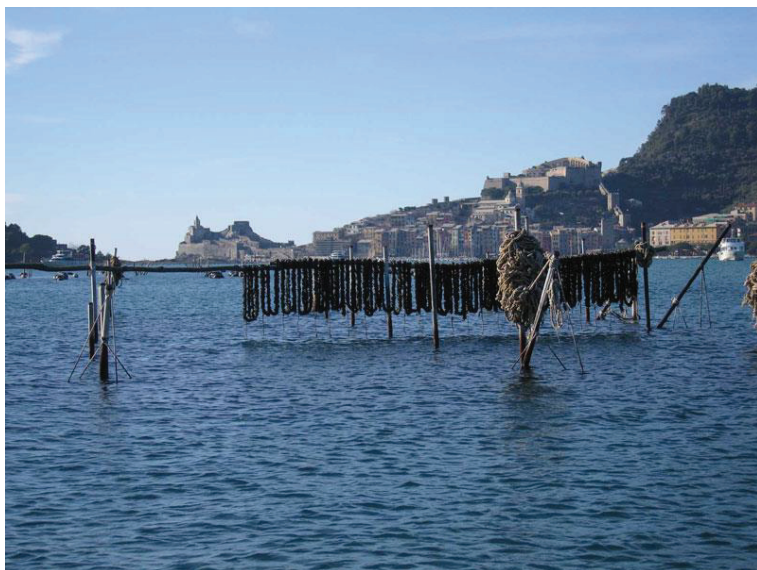


Figura 3-10 Impianti di molluschicoltura in provincia di La Spezia
(www.olpagenova.it)

Secondo i dati statistici dell'Anagrafe Nazionale Zootecnica in Italia sono presenti 3.354 impianti di acquacoltura di cui:

- 2.212 per l'allevamento di pesci;
- 1.101 per l'allevamento di molluschi;
- 41 per l'allevamento di crostacei.

3. L'acquaponica

Tabella 3-4 Impianti nelle regioni italiane per ogni specie allevata

Regione	Crostacei	Molluschi	Pesci
Abruzzo	3	9	39
Basilicata	-	-	6
Calabria	-	1	11
Campania	-	75	51
Emilia Romagna	5	173	310
Friuli Venezia Giulia	2	85	133
Lazio	1	13	81
Liguria	1	7	20
Lombardia	4	-	302
Marche	-	26	33
Molise	2	7	9
Piemonte	-	-	378
Puglia	5	126	24
Sardegna	6	47	28
Sicilia	1	4	17
Toscana	1	2	176
Trentino - Alto Adige (BZ)	5	-	91
Trentino - Alto Adige (TN)	-	-	89
Umbria	-	-	48

3. L'acquaponica

Valle d'Aosta	-	-	11
Veneto	5	526	355
Totale	41	1101	2212

La regione con il maggior numero di impianti di acquacoltura, è il Veneto (886); seguono, notevolmente distanziate, l'Emilia Romagna (488) e il Piemonte (378). Fra le Regioni meridionali, superano i cento impianti solo Puglia (155) e Campania (126).

Le tipologie di allevamento più utilizzate sono le vasche e raceway che risultano essere pari a 895 ovvero circa il 24% (Tab. 2.5).

Tabella 3-5 Tipologie di allevamento in Italia

Tipologia di allevamento	n°	%
Vasche/Raceway	895	23,79%
Molluschicoltura aperta	788	20,95%
Bacini	721	19,17%
Stagni	286	7,60%
Altri	261	6,94%
Molluschicoltura	236	6,27%
Altri metodi	201	5,34%
Sistemi a ricircolo	108	2,87%
Gabbie	95	2,53%
Impianto per ricerca	60	1,59%
Canali	37	0,98%
Impianto per quarantena	20	0,53%
Molluschicoltura chiusa	18	0,48%
Bacini a terra	15	0,40%

3. L'acquaponica

Centro di spedizione	12	0,32%
Laguna	5	0,13%
Sistema chiuso a terra	4	0,11%

I sistemi a ricircolo sono al nono posto con una percentuale pari al 3%.

In Campania sono presenti:

- 75 impianti per l'allevamento dei molluschi;
- 51 impianti per l'allevamento dei pesci.

Allevamenti in Campania 2019

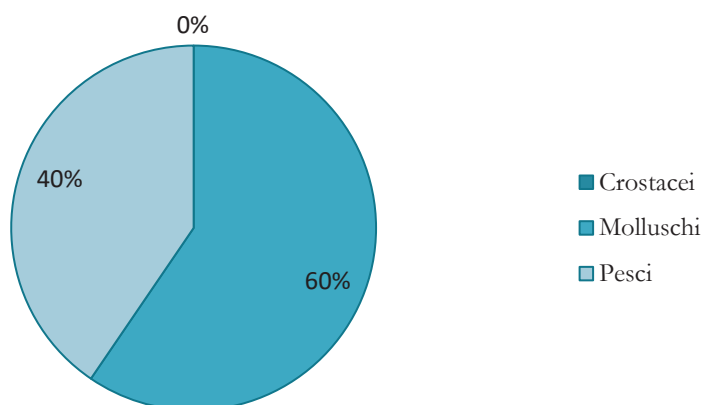


Figura 3-11 Tipologie di allevamenti in Campania 2019

3.5 VANTAGGI E SVANTAGGI DELL'ACQUACOLTURA

Uno dei problemi principali della sostenibilità dell'acquacoltura è il trattamento delle acque reflue ricche di sostanze nutritive. Prima di poter rilasciare nell'ambiente tali sottoprodotti è necessario effettuare trattamenti, altrimenti si porterebbe il corso d'acqua all'eutrofizzazione,

3. L'acquaponica

alla crescita eccessiva delle alghe e all'alterazione della concentrazione dei nutrienti. Una soluzione ottimale prevede lo sviluppo integrato di sistemi di acquacoltura con quelli idroponici.

Il RAS è il metodo più adatto per lo sviluppo di un sistema integrato, poiché permette di reimpiegare le sostanze di rifiuto dell'allevamento come nutrienti per la produzione di colture vegetali. Infatti, è possibile costruire un sistema idroponico, ovvero un sistema acquaponico a ricircolo (RAPS), in cui ci sia la possibilità di coltivare contemporaneamente piante fuori suolo ed allevare specie acquatiche ad alta densità. Il raccolto di ortaggi coltivato nel sistema RAPS assimila direttamente i nutrienti nell'acqua prodotti dalle escrezioni dei pesci, dai residui di mangime e dai prodotti della degradazione organica operata dai batteri. In questo modo, tramite un unico sistema si garantisce il mantenimento della qualità dell'acqua, la riduzione al minimo dello scambio idrico, e la produzione di un raccolto di ortaggi commerciabile (Rakocy, 2012; Danaher et al., 2013).

Un altro problema importante dal punto di vista della sostenibilità dell'acquacoltura è la necessità di pescare grandi quantità di pesce per produrre mangime. La produzione della farina di pesce va ad incidere negativamente sulla catena alimentare, è quindi importante accedere a mangimi alternativi che possano essere più sostenibili. Tale tema sarà sviluppato nei capitoli successivi.

3.5.1 L'utilizzo di antibiotici

In realtà, le unità di acquacoltura sono costantemente minacciate da patogeni ittici e batteri fitoplancton-litici. Le malattie dei pesci devono essere riconosciute e trattate tempestivamente, oltre a quelle di origine abiotica (stress termico, avvelenamento da ammoniaca, avvelenamento da nitrati, acido solfidrico, pH, salinità non adeguata, deficiente alimentazione) è importante valutare e prevenire quelle di origine batterica. I sintomi e le cause di malattie più comuni sono descritte nella successiva tabella.

Tabella 3-6 Malattie batteriche dei pesci (Fonte: manuale FAO, 2014)

	Sintomi	Cause	Rimedi
--	----------------	--------------	---------------

3. L'acquaponica

Malattia colonnare	Arrossamento e comparsa di ulcere	Batterio <i>Columnaris</i> <i>Flexibacter</i>	Trattamento antibiotico
Idropisia	Infezioni e gonfiori	Batteri, parassiti e virus	Trattamento antibiotico
Corrosione delle pinne	Perdita di colore e ulcere	Pseudomonas	Trattamento antibiotico
Infezione streptococco	Emorragie	Streptococco	Trattamento antibiotico
Tubercolosi	Deperimento, letargia	Micobatteri	Trattamento antibiotico

Inoltre, possono presentarsi anche malattie causate da funghi, protozoi e parassiti. Pertanto, è necessario applicare disinfettanti adeguati come profilassi o come trattamento delle infezioni batteriche.

In realtà, l'utilizzo di prodotti farmaceutici e la conseguente immissione dei residui nell'ambiente, è un problema importante sia per la salute dell'uomo che dell'ambiente. Ad esempio, i patogeni multi-antibiotici resistenti possono essere trasmessi dagli animali all'uomo tramite alimenti contaminati o contatto diretto e provocare rischi per la salute. Numerosi studi hanno anche confermato che l'esposizione ambientale ai residui farmaceutici influenza l'equilibrio e la biodiversità del biota acquatico e i suoi processi ecologici. I prodotti farmaceutici comprendono un gran numero di composti organici, che attualmente possono essere rilevate in varie matrici ambientali in tutto il mondo.

D'altro canto, per ottenere produzioni ittiche adeguate alla crescente domanda di cibo, è necessario incrementare le pratiche di acquacoltura e, inevitabilmente, l'utilizzo dei farmaci veterinari per prevenire e curare malattie infettive. I prodotti farmaceutici veterinari più utilizzati sono: tetraciline (ossitetraciclina, doxiciclina e clortetraciclina), sulfamidici (sulfadiazina-trimetoprim e sulfadimetossina-ormetoprim), chinoloni (enrofloxacina, ciprofloxacina, fenicolxacina) e macrolidi (eritromicina) (Zhou et al., 2021).

3. L'acquaponica

In uno studio realizzato in Corea si è effettuato un monitoraggio, della durata di due anni, sugli influenti e sugli effluenti delle acquaculture fluviali costiere per quattro antibiotici selezionati: amoxicillina-AMX, florfenicolo-FLO, acido ossolinico-OXO e ossitetraciclina-OTC. Si è visto che l'utilizzo degli antibiotici nelle vasche dei pesci, si traduce in una concentrazione di antibiotici negli effluenti fino a diverse centinaia di $\mu\text{g/L}$, il che indica la necessità di effettuare trattamenti. Per questo motivo, sono stati previsti trattamenti con l'utilizzo di cloro, di ozono e di UV. Con il cloro e l'ozono si è ottenuto l'abbattimento di AMX e OTC, ma non di FLO, che invece ha richiesto un trattamento diverso, l'UV254. Ma, con l'uso sequenziale di cloro e UV254 si è ottenuta l'eliminazione significativa di tutti e quattro gli antibiotici selezionati (Choi et al., 2020).

Bisogna considerare che le concentrazioni degli antibiotici siano variabili sia nel tempo che nello spazio, in particolare ci si aspetta che non siano soltanto presenti nelle acque, ma che possano essere riscontrati anche nei mangimi, nei pesci e nei sedimenti delle vasche di acquacoltura. In uno studio effettuato in Cina, si è valutato il contenuto di antibiotici in un allevamento di gamberetti (Su et al., 2021). I risultati hanno dimostrato come gli antibiotici tendano a trasferirsi dalla fase acquosa a quella sedimentaria nell'allevamento e come la richiesta chimica di ossigeno sia correlata negativamente alla concentrazione degli antibiotici.

Negli anni 2000 si è registrato un grosso abuso di antibiotici in acquacoltura, per questo motivo negli ultimi anni se ne sta promuovendo un uso più responsabile e sostenibile. Sono stati emessi divieti nazionali per l'uso di antibiotici sia nei paesi dell'Unione Europea nel 2006 (il Regolamento del Parlamento Europeo e del Consiglio CE n. 1831/2003) sia in Cina nel 2020. L'obiettivo che si vuole raggiungere è quello di ottenere un allevamento sano, ma in modo naturale. L'attenta scelta dei prodotti farmaceutici diventa quindi fondamentale per raggiungere scopi di efficacia e sostenibilità.

In particolare, si è effettuato uno studio proprio per il sistema di acquacoltura combinato con la coltivazione di microalghe, e sono stati utilizzati dei disinfettanti che fossero efficaci contro patogeni e batteri e, allo stesso tempo, sicuri per i pesci e le microalghe. A tal fine, l'acido peracetico (PAA) è risultato una valida opzione perché è altamente efficace contro i patogeni dei pesci e batteri a basse concentrazioni e si degrada spontaneamente in residui innocui (D. Liu et al., 2016). Testando

3. L'acquaponica

la crescita e la fotosintesi di una microalga marina, *Tetraselmis chuii*, con diverse miscele e concentrazioni di perossido di idrogeno e acido peracetico, si è visto come i prodotti acido peracetico con basse proporzioni di perossido di idrogeno siano disinfettanti ottimali per i sistemi di coltivazione di microalghe e di pesce.

3.5.2 La produzione di anidride carbonica

Pur fornendo proteine per una popolazione umana in rapida crescita, l'incremento dell'utilizzo dell'acquacoltura per la produzione di specie ittiche comporta inevitabilmente anche l'aumento delle emissioni di anidride carbonica, e quindi di costi ambientali. La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ha riferito che la concentrazione media globale di anidride carbonica (CO₂), un gas a effetto serra (GHG), ha superato i 400 ppm nel 2015. Un aumento della concentrazione di GHG porta al riscaldamento globale e ai cambiamenti climatici, che incrementano la scarsità d'acqua a livello regionale e globale.

In particolare, possono preoccupare le emissioni di gas serra (GHG) segnalate per diversi sistemi di acquacoltura. Per garantire basse emissioni di carbonio per l'acquacoltura globale, bisogna prima valutare sia i flussi diffusivi acqua-atmosfera, sia le emissioni e il possibile contenuto di carbonio tra i sedimenti degli stagni di piscicoltura (Kosten et al., 2020) e poi trovare le strategie adatte.

Le strategie di mitigazione di CO₂ e la carenza acqua hanno ricevuto una crescente attenzione negli ultimi decenni. Poiché le microalghe mostrano efficienze di fissazione di CO₂ più elevate rispetto alle piante terrestri e non richiedono processi aggiuntivi per lo smaltimento della CO₂ intrappolata, la fissazione di CO₂ da parte delle microalghe rappresenta un metodo fattibile di cattura di CO₂. Inoltre, la biomassa microalgale potrebbe essere utilizzata come materia prima per vari biocarburanti, tra cui biodiesel, bioetanolo, bioidrogeno e biogas (Xin et al., 2016).

3. L'acquaponica

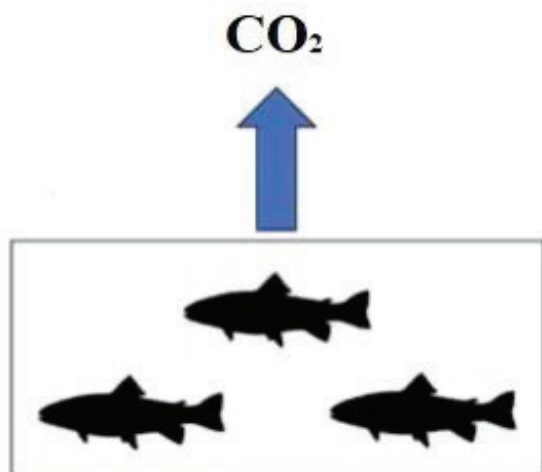


Figura 3-12 Emissioni di CO₂

Nei RAS, l'anidride carbonica (CO₂) è un parametro cruciale da controllare perché l'esposizione a lungo termine a livelli elevati di CO₂ può avere conseguenze dannose per i pesci come la riduzione delle prestazioni di crescita, l'iperventilazione, l'acidosi (Munday et al., 2019). Ad esempio, negli allevamenti di giovani salmoni dell'Atlantico, le concentrazioni di CO₂ variano generalmente da 10 a 25 mgL⁻¹ (pH da 6,0 a 5,5, rispettivamente) e il livello massimo di CO₂ per il salmone nei RAS è di 15-20 mgL⁻¹ di CO₂ (linea guida dalle autorità norvegesi, *Norwegian Food Safety Authority*, 2004). Tuttavia, la CO₂ può accumularsi nei sistemi di acquacoltura a produzione intensiva, superando le concentrazioni raccomandate provocando danni alle specie acquatiche.

In natura l'anidride carbonica si trasferisce dall'acqua all'atmosfera durante il ciclo del carbonio. Alcuni studiosi hanno valutato l'emissione di CO₂ dalle acque di lago ottenendo una misura in termini di petagrammi di carbonio 0.32 +0.52 -0.26 PgC all'anno (Raymond et al., 2013). In India è stato valutato il quantitativo di anidride carbonica e di metano rilasciato da ecosistemi acquatici locali, in media le emissioni di metano risultano di 2.1 Tg CH₄/y e 22.0 Tg CO₂/y (Selvam et al., 2014).

L'anidride carbonica (CO₂) e l'ammoniaca (NH₃) sono i principali prodotti metabolici escreti attraverso le branchie dei pesci. Un'elevata concentrazione di CO₂ nell'acqua può provocare l'acidificazione del sangue, portando ad una ridotta capacità di trasporto dell'ossigeno nel

3. L'acquaponica

sangue arterioso; alti livelli di ammoniaca possono causare danni agli epiteli e compromettere il sistema respiratorio (Sanni & Forsberg, 1996). In letteratura sono stati sviluppati dei modelli analitici per prevedere il pH e le concentrazioni di CO₂ nei sistemi di acquacoltura. Note l'alcalinità del carbonato, il pH nell'acqua in ingresso e il carbonato emesso dai pesci durante la respirazione si può eseguire una stima simultanea di pH e CO₂ (Sanni & Forsberg, 1996).

Il controllo dell'alcalinità, dell'anidride carbonica disciolta (dCO₂) e del pH sono fondamentali nei sistemi di acquacoltura a ricircolo (RAS) per garantire la salute e massimizzare la crescita delle specie ittiche. Al variare delle specie ittiche e delle condizioni ambientali si può ottenere una diversa produzione di CO₂. Si è visto che analizzando diversi allevamenti in stagno di gamberetti, gli stagni con gamberetti di dimensioni maggiori abbiano presentato una produzione maggiore di anidride carbonica (Manan et al., 2019), (Chen et al., 2016) si può stimare che le emissioni di CO₂ nell'atmosfera siano comprese tra 5,76 e 13,95 Tg y⁻¹ (Sidik F. et al., 2013). Questo poiché i pesci, i gamberetti o i granchi allevati negli stagni hanno solitamente un'efficienza di utilizzo del mangime bassa, quindi gli stagni trattengono una quantità sostanziale di materiale organico (residui del mangime per pesci e feci) (Chanda et al., 2019).

In letteratura sono state valutate le emissioni di CO₂ prodotte dall'allevamento di carpe. In particolare, sono stati misurati i flussi mensili e diurni di CO₂ all'interfaccia acqua-aria in tre stagni di policoltura di carpe erbivore *Ctenopharyngodon idella* utilizzando il metodo a camera chiusa (Chen Y. Et al., 2015). I risultati hanno mostrato che il tasso medio di emissione di CO₂ sia di 97,8 mg m⁻² h⁻¹ (con una variazione tra 50,6 e 151,0 mg m⁻² h⁻¹). Sono state inoltre osservate apparenti variazioni stagionali e diurne nei flussi di CO₂. Infine, si è visto che i flussi di CO₂ degli stagni di acquacoltura d'acqua dolce fossero superiori a quelli dei laghi ed inferiori a quelli delle paludi e che il carico di nutrienti fosse correlato alle emissioni di CO₂ dagli stagni di acquacoltura di acqua dolce.

Tabella 3-7 Vantaggi e svantaggi acquacoltura

	Vantaggi	Svantaggi
--	----------	-----------

3. L'acquaponica

Acquacoltura	Alta densità di allevamento	Grosso fabbisogno di mangimi
	Possibilità di reimpiego nutrienti	Trattamento reflui ricchi di nutrienti
	Possibilità di utilizzo mangimi alternativi	Produzione di CO ₂
		Utilizzo di antibiotici

3.6 L'IDROPONICA

L'idroponica è una tecnica di coltivazione che consiste nel far crescere le piante in assenza di suolo, pertanto non viene utilizzato il terreno come supporto per le radici. Il rifornimento idrico e nutritivo della coltura avviene attraverso l'erogazione di una soluzione nutritiva (acqua che contiene nutrienti) con o senza l'uso di un mezzo artificiale (sabbia, ghiaia, vermiculite, perlite, lana di roccia, ecc.). Questi nutrienti, per la maggior parte inorganici, sono gli elementi che la pianta estrae dal terreno come ad esempio composti azotati, fosforo, potassio e microelementi.

In breve, quindi, è la coltivazione delle piante in acqua. L'etimologia della parola idroponica deve ricercarsi nella lingua greca antica: "hydro" ovvero acqua e "ponos", che significa lavoro; in sostanza la parola idroponica identifica proprio il lavoro e l'azione potente dell'acqua impiegata per lo sviluppo e la coltivazione delle piante.

Le colture idroponiche vengono utilizzate dal momento in cui si è scoperto che le piante assorbono i nutrienti necessari per il loro sviluppo sotto forma di ioni inorganici disciolti nell'acqua. Il terreno in sé, infatti, esercita solamente la funzione di riserva di nutrienti minerali e supporto fisico, e non è indispensabile per le piante se queste due funzioni vengono svolte da altri substrati di crescita. Praticamente tutte le piante terrestri

3. L'acquaponica

possono crescere in un sistema idroponico seppur con i dovuti accorgimenti.

La coltivazione idroponica è molto utilizzata in tutto il mondo per la produzione di cibo e per diverse colture ornamentali in quanto presenta numerosi aspetti positivi.

La tecnica di coltivazione idroponica ha radici profonde nella storia dell'umanità e nasce dall'esigenza di eseguire coltivazioni senza la possibilità di disporre di adeguati terreni per la coltivazione di piante agrarie. Gli antichi Egizi e i Babilonesi già utilizzavano questa coltura: esempi di colture idroponiche furono rappresentati dai giardini pensili di Babilonia, oltre che dai giardini galleggianti degli Atzechi e degli antichi Cinesi. Naturalmente, questi primi "sforzi" di coltura fuori suolo, sono molto lontani dalla moderna idroponica che si affianca a moderni sistemi di calibrazione dei minerali nella soluzione nutritiva.

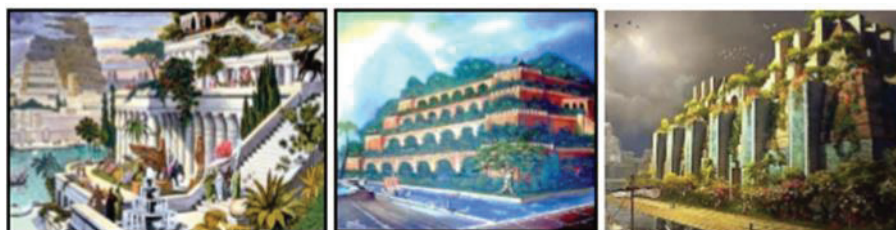


Figura 3-13 Giardini pensili babilonesi disegnati da famosi archeologi (Fonte: wikipedia modificato)

La prima applicazione commerciale delle colture idroponiche risale agli anni '20 del secolo scorso: il lavoro sperimentale fu condotto dal fisiologo della California Agricultural Experimental Station W.F. Gericke nel periodo tra le due guerre mondiali del secolo scorso. Il sistema nacque come mezzo alternativo alla coltivazione a terra in serra, afflitta dai problemi di stanchezza del terreno ((Jensen, 1997), (Tognoni et al, 2005)). Nel sistema di Gericke le piante crescevano su un supporto forato attraverso cui le radici assorbivano la soluzione nutritiva contenuta in un recipiente. Successivamente la tecnologia di Gericke fu utilizzata dalle forze militari statunitensi per rifornire di ortaggi freschi le proprie truppe durante la Seconda Guerra Mondiale, realizzando 22 ha di colture idroponiche in alcune isole giapponesi (isola di Chofu) nel pacifico ((Resh H.M., 2001), (Tognoni et al,2005)).

3. L'acquaponica

Il fondatore dell'idroponica moderna viene, così, considerato il dr. William F. Gericke, soprattutto nel mondo anglosassone. A lui si devono due innovazioni importanti: la coltivazione in acqua cessò di essere solo un esperimento da laboratorio e divenne, per la prima volta, un'operazione commerciale ed inoltre, fu proprio Gericke a coniare la parola "idroponica".

Tuttavia, questa tecnologia presentò alti costi per la sua realizzazione, motivo per cui, negli anni che seguirono, non si sviluppò negli impianti commerciali. Alcune cause furono attribuite alla presenza di alcuni problemi tecnici legati al tipo di materiale impiegato per la costruzione degli impianti stessi, dovuti soprattutto ai problemi di corrosione delle tubature indotti dall'uso di soluzioni acidule, al costo elevato per costruire i bancali e alla facilità con cui insorgevano fenomeni che portavano alla perdita della coltivazione. Intorno agli anni '60 in agricoltura ci fu una grande innovazione: venne introdotta la plastica. L'introduzione della plastica in questo contesto semplificò alcuni aspetti costruttivi (tubazioni, canalette ecc.) e suscitò nuovamente l'interesse degli operatori verso le colture fuori suolo.

I ricercatori continuarono a perfezionare la coltivazione in idroponica e nel 1965 Allen Cooper, ricercatore al Glasshouse Crops Research Institute a Littlehampton in Inghilterra, ideò il sistema NFT (Nutrient Film Technique). In Europa i primi impianti idroponici furono realizzati nel 1963, ma è solo negli anni '70 si ebbe una produzione commerciale significativa. A partire degli anni '80 nella coltura idroponica furono introdotti nuovi substrati di natura organica (a base di torba) e di substrati artificiali o naturali (lana di roccia, perlite, pomice, lapillo vulcanico ecc.) con caratteristiche fisiche-chimiche migliori rispetto alla sabbia o alla ghiaia che aprirono la diffusione su larga scala di queste colture. Attualmente esistono diverse tipologie di colture su substrato, sia per il materiale utilizzato come substrato (materiali singoli o loro miscugli), sia per il metodo di erogazione della soluzione nutritiva. Oggi, in Olanda più del 90% degli ortaggi di serra è prodotto con tecniche di coltivazione fuori suolo e la stessa tendenza si osserva per ciò che concerne la produzione dei fiori recisi ((Van Os e Stanghellini, 2001), (Tognoni et al, 2005). La coltivazione idroponica è diventata sempre più diffusa anche nell'Est dell'Asia e nelle regioni mediterranee, in particolare in Spagna e Israele. L'idroponica è stata inclusa nel programma di ricerca condotto dalla

3. L'acquaponica

NASA per sviluppare un sistema di produzione di cibo per le missioni spaziali ((Jensen, 1997), (Tognoni et al, 2005)).

Altre particolari applicazioni dell'idroponica riguardano l'allevamento di piante medicinali per la produzione di fitofarmaci. Infine, l'idroponica è stata proposta come tecnologia a basso costo per lo sviluppo di orti urbani in paesi tropicali e subtropicali, come mezzo di sostentamento per le popolazioni locali (Pardossi et al., 2005).

Negli ultimi anni, la tecnica idroponica ha suscitato l'interesse dei coltivatori in quanto permette di superare alcune delle problematiche che maggiormente interessano il settore agroindustriale:

- la competizione sempre più forte che deriva dal mercato globalizzato dei prodotti e del marketing;ù
- la necessità di ridurre i costi di produzione e migliorare la qualità del prodotto;
- l'aumento dell'inquinamento ambientale provocato dall'agricoltura intensiva e i vincoli legislativi ad esso legati;
- la carenza di risorse come energia, lavoro e acqua.

Per questo motivo nel prossimo futuro questa tecnologia potrebbe rivestire un ruolo importante nel settore agricolo.

I sistemi idroponici necessitano di elevati investimenti economici per la loro realizzazione, sia per l'acquisto dei beni produttivi a logorio parziale quali strumenti e impianti, sia per quelli a logorio totale ovvero fertilizzanti. Tali investimenti assicurano l'aumento e la stabilità delle rese, riducendo in modo significativo il livello di incertezza tipico dell'attività agricola.

I sistemi idroponici necessitano di un'accurata gestione: una pianta può morire se non riceve le giuste quantità di ossigeno nella zona delle radici anche se riceve la giusta quantità di acqua e nutrienti. Non a caso, una delle cause più frequenti di morte delle piante è l'eccessiva quantità d'acqua irrorata durante le sessioni di irrigazione. Per questo, è importante assicurarsi che le piante coltivate in idroponica ricevano la giusta quantità di ossigeno e quindi di aria. L'acqua, nella coltivazione idroponica, deve essere "vivente": le piante assorbono il loro cibo nella forma di ioni

3. L'acquaponica

disciolti in acqua, qualunque sia l'ambiente in cui vivono, sia il suolo, l'aria o l'acqua.

Nella coltivazione idroponica è fondamentale controllare la quantità di acqua, sali minerali e, più importante di tutto, l'ossigeno erogato, in quanto in questa coltivazione l'acqua sostituisce il terriccio. Quando le radici sono sospese nell'acqua in movimento, assorbono rapidamente sia le sostanze nutritive che l'ossigeno. Se la quantità di ossigeno risulta insufficiente per il bisogno della pianta, la sua crescita sarà lenta. Se al contrario la pianta sarà correttamente ossigenata, la pianta crescerà più velocemente e in salute. È necessario quindi, bilanciare la combinazione di acqua, nutrienti ed ossigeno, secondo le necessità delle piante al fine di massimizzare produzione e qualità.

I parametri essenziali da monitorare per ottenere ottimi risultati con la coltivazione idroponica sono:

- la temperatura e l'umidità;
- il livello di CO₂;
- le ore di luce e l'intensità dell'illuminazione;
- la ventilazione;
- la salute delle piante;
- l'assenza di malattie (sebbene nelle coltivazioni idroponiche la diffusione di malattie legate ai parassiti è sensibilmente inferiore rispetto a quanto avvenga generalmente con la coltivazione tradizionale).

3.6.1 Sistemi di coltivazione idroponica

Gli impianti per le colture idroponiche possono essere classificati seguendo diversi criteri:

- funzionamento del ciclo del sistema;
- metodo di erogazione della soluzione nutritiva;
- utilizzo del substrato.

3. L'acquaponica

Un sistema idroponico in base al ciclo del sistema può essere definito a ciclo chiuso o a ciclo aperto.

Nei sistemi di coltivazione aperti (“run to waste”) viene apportato continuamente nutrimento fresco nel substrato ed eliminato attraverso il drenaggio, pertanto la soluzione drenata viene dispersa.

Nei sistemi chiusi o a ricircolo il nutrimento non viene drenato ma raccolto, la soluzione nutritiva infatti, viene riciclata per essere riutilizzata nell'impianto attraverso pompe atte a rimetterla in circolo. Questo sistema è pratico soprattutto quando si coltiva in assenza di substrato o con un substrato a bassa ritenzione idrica (argilla espansa, perlite).

Nelle colture idroponiche è molto importante che il nutrimento contenga tutti gli elementi indispensabili alla pianta nella giusta proporzione che dipende dal tipo di sistema di coltivazione.

Le tecnologie idroponiche vengono, inoltre, classificate in funzione del sistema con cui vengono distribuiti i nutrienti e cioè:

- sistema passivo, in cui la soluzione viene fornita utilizzando forze capillari;
- sistema attivo, se vengono utilizzate le pompe per iniettare la soluzione di lavoro;
- sistema combinato, in cui entrambi i principi sono combinati e che sono considerati ottimali per la crescita delle piante idroponiche.

Il sistema passivo è il tipo più antico di coltura idroponica; la sua denominazione deriva dal fatto che non contiene parti mobili; infatti, la soluzione nutritiva viene distribuita alla pianta con l'aiuto di forze capillari mediante cordicelle di stoffa dette stoppini, i quali assorbono la soluzione nutriente e la rilasciano poi gradualmente.

Il sistema passivo con lo stoppino è il sistema più semplice, ma presenta lo svantaggio di non poter essere applicato a grandi piante igrofile, che avvertono la necessità di grandi volumi di soluzione.

Un sistema altrettanto semplice di tipo passivo è quello della piattaforma galleggiante.

3. L'acquaponica

É possibile fare un'ulteriore distinzione di tecniche per quanto riguarda la modalità di somministrazione della soluzione nutritiva che può essere distribuita alle piante in forma liquida o nebulizzata. Il primo caso fa riferimento alla tecnologia idroponica, mentre il secondo a quella aeroponica.

Infine, le coltivazioni idroponiche possono essere suddivise due grandi tipologie di coltivazione idroponica: quella che impiega il substrato, ovvero miscele di perlite, sabbia, argilla espansa, ecc., che viene inumidito e irrigato con acqua e sostanze nutritive, e la coltivazione idroponica senza substrato, dove le radici delle piante sono immerse nel flusso della soluzione nutritiva (composta da acqua e sostanze disciolte).

Negli ultimi 20 anni, da quando la coltivazione idroponica si è diffusa per la produzione commerciale di ortaggi e fiori, numerosi impianti sono stati progettati ma non tutti hanno avuto la stessa riuscita dal punto di vista commerciale. Si riportano di seguito gli impianti più diffusi.

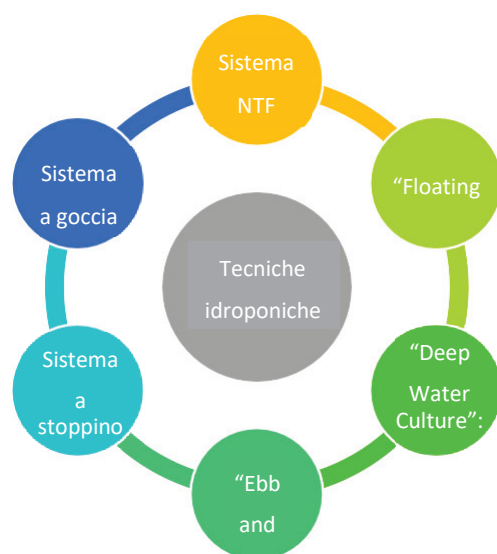


Figura 3-14 Principali tecniche idroponiche

3. L'acquaponica

3.6.2 La Nutrient Film Technique (NFT)

Il sistema a film nutritivo è stato ideato e sviluppato da Cooper in Inghilterra nel 1970, per poi diffondersi in tutto il Centro-Nord Europa.

Tale tecnica non comporta particolari difficoltà: consiste nel far passare una corrente d'acqua poco profonda ricca di sostanze nutritive in costante ricircolo sul sistema radicale delle piante.



Figura 3-15 Dettaglio di uno schema di coltivazione NFT. (Fonte: Tecniche di coltivazione idroponiche– Aspetti progettuali e consumi idrici, 2015)

Nei sistemi NFT la soluzione nutritiva circola direttamente sulle radici, all'interno di canalette leggermente inclinate e confluenti in un deposito centralizzato in cui viene raccolta e poi re-distribuita con una pompa. È importante che le canalette, mediamente lunghe 20 o più metri, siano disposte con una pendenza adeguata (1- 1,5%), la pendenza permette di sfruttare la gravità per far scorrere la soluzione al di sotto del piano di coltivazione in modo che le radici siano bagnate e dunque nutrite a seconda della programmazione del sistema culturale.

Le piantine verranno in un primo momento coltivate su di un substrato inerte: generalmente vengono inserite in cubi di lana di roccia di dimensioni più grande rispetto al normale. In questo modo le piantine si possono radicare intorno ai cubi, mantenendo una buona stabilità anche in mancanza di argilla espansa o del substrato. Quando le piantine avranno

3. L'acquaponica

radicato, vengono poste nelle canalette, con le radici adagiate sul fondo in cui scorre la soluzione nutritiva e protette dalla luce con l'apposizione di un film plastico. La soluzione viene così ossigenata per caduta al momento del ritorno nel serbatoio di raccolta.

La distribuzione della soluzione può poi avvenire in maniera continua o ad intermittenza. Nel secondo caso si avrebbe come vantaggio un risparmio di energia elettrica ed una migliore ossigenazione della soluzione ma, per contro, si otterrebbe anche un innalzamento della temperatura e una concentrazione della soluzione nutritiva a livello dell'apparato radicale.

Il sistema NFT è caratterizzato da una conduzione a ciclo chiuso, caratteristica che richiede controlli frequenti della soluzione al fine di evitare che si creino scompensi. Si possono effettuare analisi periodiche con reintegrazione dei sali assorbiti dalla coltura oppure ricambi della totalità della soluzione. Devono essere anche effettuati controlli riguardo le condizioni fitosanitarie degli impianti, in quanto il riciclo della soluzione può favorire la diffusione di malattie.

Le strategie adottate per il mantenimento di una composizione equilibrata della soluzione nutritiva sono:

- Analisi periodica, generalmente ogni 15 giorni, della soluzione e reintegrazione dei sali assorbiti della coltura;
- Ricambio completo della soluzione nutritiva, ogni 30-60 giorni, a seconda della qualità dell'acqua disponibile. In questo caso si provvede quotidianamente alla correzione del pH ed al reintegro mediante aggiunta di soluzione, in modo da mantenere costanti il pH e la E.C. previsti per la coltura. Queste operazioni negli impianti moderni sono effettuate con l'utilizzo di sistemi automatici. La soluzione standard recentemente è stata sostituita con delle soluzioni diverse per ogni fase di crescita delle colture per cercare di rispondere in miglior modo alle esigenze della pianta.

Il ricircolo della soluzione può favorire anche la diffusione di malattie e quindi debbono essere previste strategie per il controllo dei parassiti (filtrazione, sterilizzazione della soluzione o immissione di fitofarmaci nella soluzione).

3. L'acquaponica

La mancanza di substrato rende più suscettibili le piante alle variazioni di regime idrico e nutritivo, derivanti ad esempio dalla interruzione di energia elettrica e pertanto, si devono prevedere sistemi di emergenza (generatori di corrente). I materiali adottati per realizzare le canalette e la distanza di queste da terra possono creare dei problemi di escursione termica sia in estate che in inverno all'apparato radicale che, se troppo sviluppato, può a sua volta ostacolare l'ossigenazione delle radici con invecchiamento e successivo collasso della pianta.

In Italia l'NFT è ancora poco sviluppato perché richiede notevoli investimenti per l'impianto (sistemazione e livellamento serra, canalette, pompe, sistema di distribuzione e controllo della soluzione nutritiva).

Tale tecnica si adatta bene alla coltivazione di lattuga, pomodoro e cetriolo ed ha trovato larga diffusione nell'Europa centro-settentrionale. Generalmente è preferibile applicarla nel caso di colture a ciclo breve, in quanto la formazione di un apparato radicale troppo fitto sul fondo della canaletta ostacolerebbe l'ossigenazione delle radici stesse.

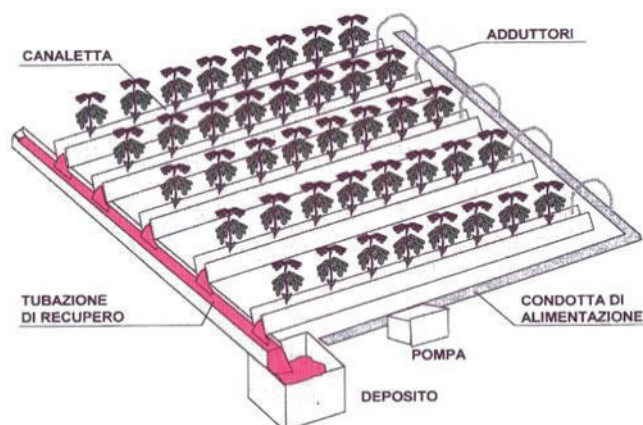


Figura 3-16 schema di un sistema NFT. (Fonte: Idroponica: le tecniche)

3.6.3 La Floating system

3. L'acquaponica

Questa tecnica viene definita “floating”, ovvero galleggiante, in quanto si tratta di un vero e proprio galleggiamento delle piante dentro le vasche contenenti la soluzione nutritiva.

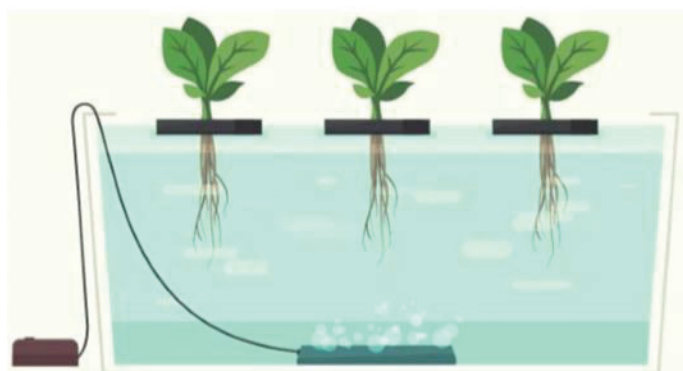


Figura 3-17 Dettaglio schema di coltivazione in “floating system”. (Fonte: *Tecniche di coltivazione idroponiche– Aspetti progettuali e consumi idrici, 2015*)

Le vasche possono essere fisse o smontabili, profonde 20-30 cm e posizionate sul terreno oppure direttamente scavate all'interno della serra, impermeabilizzate con film di polietilene.

Successivamente nelle vasche si collocano i pannelli di polistirolo ad alta densità che galleggiano sulla soluzione nutritiva e servono da supporto per le piante in coltura. Essi sono caratterizzati da numerosi fori o solchi in cui vengono seminate le colture.

Le vasche possono essere costituite da bancali impermeabilizzati con una pendenza di circa 0,5% che consente il recupero della soluzione in una vasca di deposito sotto il pavimento. Le vasche possono avere anche ampie dimensioni, da 200-400 m² appoggiate direttamente sul terreno.

Nei moderni sistemi per la gestione della soluzione nutritiva è possibile ricorrere all'utilizzo di appositi sensori posti nelle vasche, che inviano i dati direttamente a delle centraline. Queste gestiranno poi l'invio di nuova soluzione nutritiva attraverso pompe volumetriche. Con grandi volumi di acqua, le modificazioni della soluzione sono lente e la soluzione può essere utilizzata per più cicli produttivi. È fondamentale reintegrare la soluzione ogni mese e, dal punto di vista fitopatologico, prevenire la diffusione di patogeni tramite appositi filtri o disinfettanti. Tale tecnica, introdotta inizialmente in Giappone per la coltivazione di piante acquatiche, viene oggi utilizzata anche in Italia per la coltura di ortaggi da foglia quali il

3. L'acquaponica

basilico, la rucola, la valerianella, lo spinacio e le cicorie da taglio, anche se in percentuale non ancora rilevante sul totale della produzione orticola.

Il sistema risulta, particolarmente, interessante per i costi contenuti di realizzo e gestione, legati alla limitata presenza di dispositivi automatici, di controllo e correzione della soluzione. La brevità dei cicli produttivi e il volume elevato di soluzione consentono, infatti, di rimandare alla fine di ciascun ciclo, le operazioni di reintegrazione della soluzione nutritiva. L'unico controllo importante da fare, durante la coltivazione, è il contenuto di ossigeno disciolto nella soluzione che, deve essere mantenuto su valori prossimi a 5-6 mg /l.



Figura 3-18 Esempio di una coltivazione in “floating system”. (Fonte: <http://pandeglang.work/>)

3.6.4 La Deep Water Culture (DWC)

Letteralmente coltura in acque profonde, è stata una tecnica ideata da Gericke (1929), è stata la prima tecnica a diffusione commerciale. Il sistema è costituito da vasche contenenti la soluzione nutritiva, sulle quali era appoggiata della rete a maglia fine ricoperta con tela che serviva a sostenere un sottile strato di sabbia (circa 1 cm) dove venivano trapiantate le giovani piantine.

3. L'acquaponica

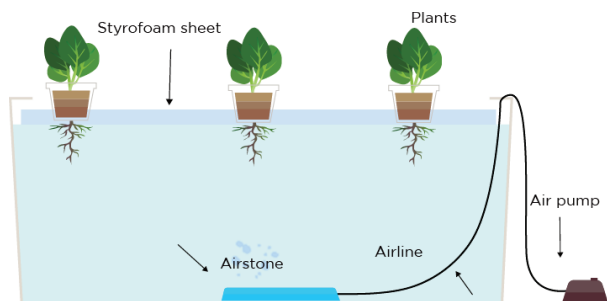


Figura 3-19 Dettaglio di uno schema di coltivazione "Deep Water Culture".
(Fonte: <https://www.greenandvibrant.com/deep-water-culture>)

Il principale difetto di questo sistema è la facilità con cui si verificavano condizioni di ipossia radicale a causa alla limitata superficie di scambio aria-acqua rispetto al volume della soluzione e al basso coefficiente di diffusione dell'ossigeno nell'acqua. Il problema dell'ipossia radicale, tipico di questa tecnica è stato risolto attraverso l'introduzione di un'aerazione forzata (con compressori) o con speciali sistemi di ricircolo della soluzione nutritiva che ne favoriscono l'aerazione (Deep Recirculating Culture). Queste modifiche al sistema originario hanno consentito una larga diffusione di questa tecnica in Giappone, dove nel 1996 esistevano circa 300 Ha, pari ad un terzo della superficie totale delle colture fuori suolo presenti nel paese (Prof. Y. Shinohara, Chiba University).

Il funzionamento del sistema DWC si basa su una pompa ad aria e una pietra porosa che ossigena la soluzione nutritiva. L'acqua deve essere sufficientemente alta da saturare il supporto di argilla per mantenerlo bagnato o umido. Una volta che la pianta ha sviluppato un buon apparato radicale conviene abbassare il livello di soluzione nel secchio in modo che alcune delle radici saranno immerse in soluzione 24 ore al giorno.

È fondamentale che la pompa ad aria rimanga sempre accesa, perché se si spegnesse le radici soffrirebbero di mancanza di ossigeno.

La crescita della pianta su questo sistema è molto veloce e può arrivare a consumare anche 5 litri di soluzione al giorno.

3. L'acquaponica



Figura 3-20 Esempio di coltivazione di un sistema “Deep Water Culture”(Fonte: <https://www.epicgardening.com/deep-water-culture-get-started/>)

3.6.5 Ebb and flow

Si tratta di un sistema idroponico in cui i vasetti, riempiti di substrato (argilla espansa), vengono messi direttamente in un serbatoio. Il sistema è strutturato in modo da non avere contatto diretto tra le radici e l'acqua, inondando temporaneamente il vassoio contenente il substrato con una soluzione nutritiva per poi farla defluire nuovamente nel serbatoio. La soluzione concimante viene quindi pompata dentro al vassoio e viene messa in circolazione tra le radici. Qualsiasi altra soluzione supplementare può essere facilmente aggiunta dentro al serbatoio per le successive concimazioni. Questa azione avviene normalmente con una pompa sommersa collegata ad un timer. Grazie alla pompa l'acqua viene spinta in una vasca finché viene riempita, ed alla fine la pompa si spegne. Il sistema riparte quando il liquido è defluito nel serbatoio ed il livello della vasca si abbassa. Questo permette una elevata ossigenazione delle radici tra un ciclo e l'altro di irrigazione.

Durante il processo in cui il vassoio viene sommerso dalla soluzione nutriente tutti i residui della precedente marea vengono ridisciolti nella soluzione nutriente in modo che la soluzione residua nel substrato non precipiti o crei over-fertilizzazione.

La sua altezza molto ridotta rende questi sistemi adatti alla coltivazione in ambienti con altezze limitate lasciando così uno spazio maggiore alle piante per crescere e maturare.

3. L'acquaponica

Il sistema di irrigazione semplice e efficace è facilmente raggiungibile dalla grande apertura di accesso posta sul fronte della cisterna.

Questo accesso frontale nella vasca della soluzione nutritiva permette comode operazioni di pulizia della vasca.

Il flusso e riflusso è un sistema versatile che può essere utilizzato con una varietà di substrati. L'intero del vassoio di crescita può essere riempito con rocce da coltivazione e ghiaia.

Lo svantaggio principale di questo tipo di sistema è che alcuni tipi di medium di coltura possono creare molteplici inconvenienti come interruzioni di corrente e guasti della pompa o al timer. In quel caso le radici possono seccare rapidamente se si interrompono i cicli di irrigazione. Questo problema può essere alleviato un po' utilizzando substrati di coltivazione che trattengono di più l'acqua come la vermiculite, la fibra di cocco o un buon mix.

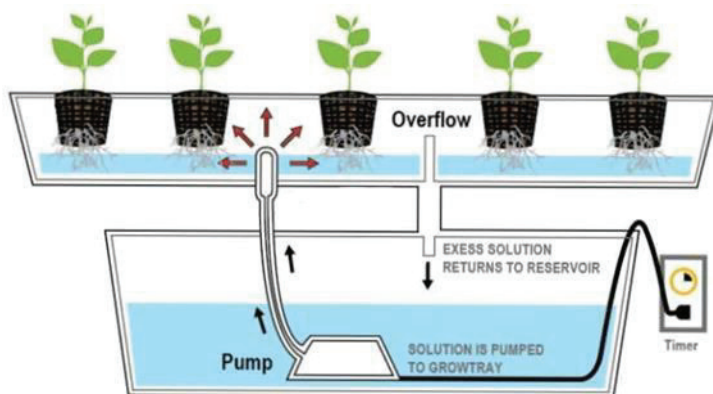


Figura 3-21 Dettaglio di uno schema di coltivazione "Ebb and flow". (Fonte: <https://www.botanicaurbana.com/sistemi-idroponici-a-marea/>)

3.6.6 Sistema a stoppino

Il tipo più semplice di sistema idroponico è il sistema dello stoppino. In questo sistema idroponico passivo un'estremità di uno stoppino (sistema wick) è inserita nel vaso e l'altra estremità è immersa nell'acqua. Lo stoppino trasporta l'acqua che viene assorbita dal terreno da cui la pianta a sua volta prende la quantità necessaria. Il terreno assorbe solo l'acqua

3. L'acquaponica

necessaria e non c'è pericolo di un'eccessiva irrigazione. In genere il serbatoio dell'acqua viene posizionato più in basso rispetto al contenitore con le piante, o al massimo allo stesso livello, e la distanza tra serbatoio e substrato non è molta. Se il serbatoio fosse più in alto, lo stoppino trasporterebbe più acqua del necessario. Quindi il solo prerequisito per un sistema correttamente funzionante sembra essere la scelta giusta dei materiali.

Tali sistemi hanno semplici componenti, sono a bassa manutenzione e poco costosi da costruire. Sebbene facciano ancora parte della coltivazione idroponica, non hanno alcuna pompa o pietra ad aria. L'eliminazione di questi componenti rende i sistemi a stoppino la forma più semplice di coltivazione idroponica.

L'intero concetto di sistema a stoppino si basa sull'azione capillare: un processo in cui i liquidi viaggiano contro la gravità attraverso un pezzo di stoffa o una corda. La pianta regola la forza che serve per sollevare la soluzione dalle sue radici, piuttosto che il contrario.



Figura 3-22 Dettaglio di uno schema di coltivazione a stoppino. (Fonte: <https://www.royalqueenseeds.it/blog-tutto-quello-che-devi-sapere-sui-sistemi-idroponici-a-stoppino-n1068>)

3.6.7 Sistema a gocciolamento

Sono i sistemi idroponici più utilizzati. Questi sistemi sono simili ai sistemi di stoppino in quanto le piante sono sospese in un substrato o substrato in crescita e vengono lentamente alimentate con una soluzione nutritiva.

Tuttavia, a differenza dei sistemi a stoppini, i sistemi di gocciolamento richiedono un timer e una pompa immersi nella soluzione nutritiva. Il

3. L'acquaponica

timer accende la pompa e la soluzione nutritiva viene gocciolata sulla zona della radice di ogni pianta attraverso una piccola linea di gocciolamento.

Inoltre, i sistemi di gocciolamento offrono la possibilità di riciclare una soluzione nutriente in eccesso che non viene assorbita dalla pianta che si ottiene consentendo a qualsiasi soluzione nutritiva non utilizzata di ritornare nel serbatoio della soluzione originale. I sistemi a goccia sono probabilmente i sistemi idroponici più diffusi nel mondo. Il funzionamento è semplice, un timer controlla una pompa sommersa. Quando la pompa, la soluzione nutritiva viene distribuita alla base di ogni pianta attraverso un gocciolatoio legato ad un impianto d'irrigazione. In un sistema a goccia la soluzione nutritiva in eccesso viene raccolta in un serbatoio per poter, poi, essere riutilizzata.

Un sistema con recupero della soluzione necessita di una soluzione nutritiva un po' più efficiente; visto il riutilizzo della soluzione in eccesso. Questo permette anche l'utilizzo di un timer più economico perché un sistema di recupero non richiede un controllo preciso dei cicli di irrigazione. Il sistema di recupero a goccia deve essere regolato per assicurare che le piante ottengano abbastanza soluzione nutritiva.

Il sistema senza recupero richiede meno manutenzione a causa del fatto che la soluzione nutritiva in eccesso non viene riciclata nel serbatoio, in modo che la forza di nutrienti e pH del serbatoio non varierà. Un sistema di recupero può avere grandi cambiamenti nei livelli di pH e forza nutriente che richiedono periodico controllo e regolazione.

3. L'acquaponica

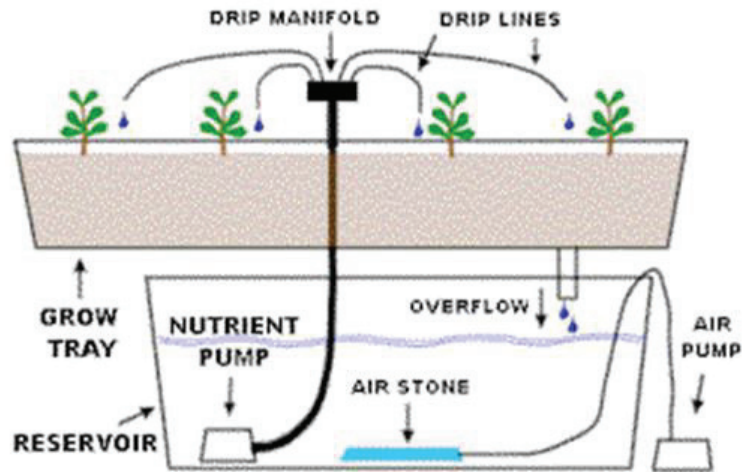


Figura 3-23 Dettaglio di uno schema di coltivazione a gocciolamento. (Fonte: <https://www.casahitech.it/serra-idroponica-guida-acquisto/>)

3.6.8 Aeroponica

L'aeroponica è una delle più recenti e promettenti frontiere della ricerca nel settore colture orticole e floricole in ambiente protetto. Si tratta di una tecnica di coltivazione molto avanzata per allevare vegetali senza suolo.

L'aeroponica è un tipo di coltivazione idroponica che avviene in assenza di substrato, cioè senza l'utilizzo di terra o di qualsiasi altro aggregato di sostegno. Tecnicamente le radici delle piante non sono immerse in alcun terreno ma sono sospese in aria, da cui proviene il principale nutriente, oltre che una maggiore ossigenazione.

3. L'acquaponica

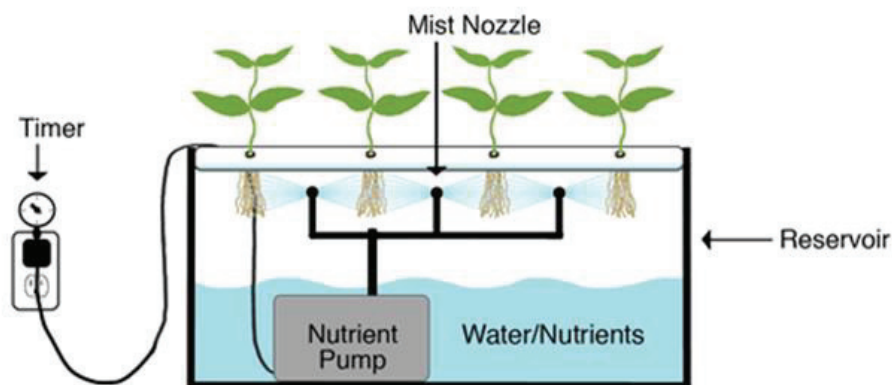


Figura 3-24 Sistema aeroponico (Fonte: <https://www.botanicaurbana.com/sistemi-aeroponici/>)

Questo sistema si differenzia da quello idroponico per la modalità di somministrazione della soluzione nutritiva. In questo caso, infatti, la parte ipogea (sotto terra) della pianta non è immersa nella soluzione nutritiva ma sospesa in aria e la soluzione viene nebulizzata sulle radici mediante degli ugelli, in questo modo si ha il minimo impiego della soluzione nutritiva che viene spruzzata sulle radici delle piante.

Gli interventi di nebulizzazione hanno una durata di 30-60 secondi e una frequenza variabile di circa 40-80 spruzzi al giorno, in funzione delle condizioni climatiche di coltivazione, della specie e dello stato di crescita della pianta. Questa tipologia di impianto prevede che le piante vengano ancorate ad un pannello, in modo da dividere la parte epigea (parte aerea) da quella ipogea (parte sotto terra). Ogni pannello si appoggia a quello situato lateralmente ad esso per formare una struttura a tetto spiovente, creando tra i due pannelli un'intercapedine finalizzata ad ospitare gli ugelli e gli apparati radicali, che sono mantenuti sospesi e protetti dalla luce. La soluzione nutritiva viene spruzzata direttamente sulle radici e la quantità in eccesso viene poi raccolta per essere riciclata.

Questo metodo permette di risparmiare l'utilizzo di acqua e di incrementare la produzione sfruttando al massimo le superfici che sono poste su strutture ad inclinazioni sempre minori. Chiaramente, l'inclinazione dei pannelli può portare anche ad una crescita differenziata a seconda della posizione della pianta rispetto alla luce e alla soluzione nutritiva.

3. L'acquaponica

L' aeroponica è una tecnologia nata in Italia a partire dagli anni '70, tuttavia tale tecnica in Italia come nel resto d'Europa è ancora in via di sviluppo in quanto ha trovato scarse applicazioni al di fuori degli ambienti di ricerca. Le difficoltà di realizzazione del sistema su scala commerciale dipendono dagli elevati costi di impianto. Infatti è necessario predisporre il sistema con dispositivi di sicurezza nella gestione della soluzione in caso di interruzione di corrente, perché non esiste alcun volano idrico a livello radicale. Oggi è utilizzata a scopi commerciali principalmente in Canada, Australia e alcuni paesi degli Stati Uniti.

La coltivazione aeroponica è utilizzata per la coltivazione di piante che non hanno un grande sviluppo radicale quali ad esempio fragole e lattughe o, ovviamente, nella floricoltura. Attualmente in Italia la coltivazione aeroponica viene praticata su specie vegetali sia orticole (pomodoro, peperone, melanzana, zuccina, cetriolo, lattuga, radicchio, cavolfiore, broccolo, basilico, salvia, melone, fragola) che floricole (garofano, rosa, crisantemo, iris, tulipano, narciso, gladiolo, fnesia, gerbera).

Il primo vantaggio dell'aeroponica è il massimizzare l'esposizione di ossigeno delle radici, inoltre elimina il grosso problema dello smaltimento dei substrati.

Il grande vantaggio di questi impianti è la possibilità di utilizzare su qualsiasi tipo di suolo, motivo per cui viene promossa nei paesi in via di sviluppo come risposta alla crisi alimentare, ma la forte automatizzazione richiesta è chiaramente basata su grossi investimenti internazionali e non locali.

L'aeroponica consente inoltre la coltivazione naturale biologica e senza malattie. Tuttavia per questi sistemi vi è un maggiore rischio di essiccamento delle radici a causa di un calo di potenza, oppure di una interruzione, anche breve, della nebulizzazione di nutrienti.

Sicuramente sul piano pratico, ci sono però ancora diversi svantaggi che ne rallentano lo sviluppo; il primo riguarda l'elevato costo degli impianti, mentre non meno importante è l'elevato consumo di energia e la scarsa adattabilità dei sistemi di coltura alle varietà vegetali. Inoltre è un metodo di coltivazione che richiede molta precisione, e l'installazione con la messa a punto corretta può essere molto complicata e costosa.

3. L'acquaponica



Figura 3-25 Esempio di un sistema aeroponico.

3.7 VANTAGGI E SVANTAGGI DELL'IDROPONICA

La coltivazione idroponica presenta moltissimi vantaggi: le piante risultano più salutari e di migliore qualità poiché crescono in un ambiente controllato, ricevendo prontamente la corretta quantità di nutrienti (Keith, 2000; Lakhari et al., 2018; Rodríguez-Delfín, 2012; Sardare, 2013; Sharma et al., 2018; Sheikh, 2006; Shrestha & Dunn, 2013); grazie all'assenza del terreno, vengono evitati i problemi legati ai parassiti, malattie terricole o infestazioni di erbe (Keith, 2000; Sardare, 2013; Sharma et al., 2018); risulta fortemente sostenibile, da un punto di vista ambientale ed economico, in quanto richiede un basso consumo di acqua e fertilizzanti, ma soprattutto di suolo grazie al fatto che le piante sono più vicine tra di loro e per tale motivo risulta particolarmente adatta per le aree con difficile accesso ad acqua e suolo fertile (Keith, 2000; Lakhari et al., 2018; Nalwade, 2017; Rodríguez-Delfín, 2012; Sardare, 2013; Sharma et al., 2018; Sheikh, 2006; Shrestha & Dunn, 2013); determina un basso impatto ambientale e minori costi di gestione, in

3. L'acquaponica

quanto non prevede l'utilizzo di pesticidi o erbicidi (Keith, 2000; Rodríguez-Delfín, 2012; Sharma et al., 2018; Sheikh, 2006); non è dipendente dai cambiamenti climatici o da avverse condizioni meteorologiche che possono provocare danni alle colture (Keith, 2000; Lakhiar et al., 2018); garantisce una quantità di produzione elevata per l'intero anno, senza interruzioni (Lakhiar et al., 2018; Rodríguez-Delfín, 2012; Sardare, 2013; Sharma et al., 2018; Sheikh, 2006); le piante crescono più velocemente, grazie alla costante ossigenazione (Sardare, 2013; Sharma et al., 2018; Shrestha & Dunn, 2013); non prevede la rotazione delle colture, effettuata solitamente a causa della stanchezza del terreno (Nalwade, 2017; Rodríguez-Delfín, 2012; Sheikh, 2006; Shrestha & Dunn, 2013); richiede poca manodopera o forza lavoro, determinando minori costi di gestione (Nalwade, 2017; Sardare, 2013; Sharma et al., 2018; Shrestha & Dunn, 2013); non causa alle piante degli shock dovuti al processo di trapianto (Shrestha & Dunn, 2013); produce benefici sociali ed economici, incrementando il reddito familiare e migliorando la sua dieta alimentare (Rodríguez-Delfín, 2012).

Esistono, però, alcuni svantaggi significativi da considerare (Sharma et al., 2018): è richiesta un'elevata conoscenza delle pratiche agricole tradizionali, nonché di quelle più innovative legate all'idroponica, insieme ad elevati costi iniziali per l'avvio dell'attività (Rodríguez-Delfín, 2012; Sardare, 2013; Sharma et al., 2018; Shrestha & Dunn, 2013); la condivisione della stessa soluzione di nutrienti può comportare lo sviluppo di malattie fungine (es. *Fusarium* e *Verticillium*) che si diffondono nell'intero sistema (Sharma et al., 2018; Shrestha & Dunn, 2013); si richiedono frequenti monitoraggi di parametri quali ossigeno, pH, conducibilità elettrica e nutrienti (Rodríguez-Delfín, 2012; Sardare, 2013; Sharma et al., 2018); prevede un elevato consumo energetico, dovuto all'utilizzo di pompe e alla richiesta di fonti di luce (Sardare, 2013; Sharma et al., 2018); infine è richiesto l'utilizzo di fertilizzanti chimici per la realizzazione della soluzione nutriente (Quaik et al., 2012).

Tabella 3-8 Vantaggi e svantaggi idroponica

	Vantaggi	Svantaggi
Idroponica	Controllo della qualità	Elevato costo dell'impianto

3. L'acquaponica

Maggiore velocità di crescita	Necessità di attenzione
Maggiore produzione	Scarsa adattabilità dei sistemi di coltura alle varietà vegetali
Minore richiesta di spazio	
Minore consumo di acqua	
Assenza di erbicidi	

3.8 SISTEMI ACQUAPONICI

Come visto nei paragrafi precedenti, l'acquacoltura e la coltivazione tradizionale presentano diversi limiti. Il problema maggiore è quello legato alla necessità di grossi volumi di acqua ed estese aree per le colture. L'acquaponica combina l'idroponica e l'acquacoltura al fine di creare un sistema unico in grado di riciclare l'acqua e i nutrienti garantendo l'approvvigionamento di cibo in maniera produttiva ed efficiente. In questo sistema le piante non necessiteranno di fertilizzanti, e la vasca d'acqua dei pesci non dovrà essere cambiata con un'alta frequenza. In questo modo si crea una perfetta simbiosi tra la coltivazione, l'allevamento e i processi biologici che porta ad una relazione ecologica bilanciata. Con tale metodologia è possibile quindi ottenere una produzione di cibo che sia sostenibile, moderna e a basso consumo (Wei et al., 2019).

Come esempio innovativo appartenente alla tecnologia del Vertical Farming (VF), l'acquaponica è un metodo di produzione alimentare generato dalla combinazione dei sistemi di acquacoltura a ricircolo (RAS) e dei sistemi idroponici (coltivazione di piante "senza suolo"), i quali lavorano in maniera integrata (Abbasi et al., 2021; Z. Hu et al., 2015; Love et al., 2015). Tale combinazione consente di convertire gli svantaggi

3. L'acquaponica

dell'acquacoltura e dell'idroponica in punti di forza (Goddek et al., 2015). Infatti, il processo si innesca dall'unità di acquacoltura, la quale produce acque di scarico contenenti sostanze azotate e scarti metabolici dei pesci, che, a seguito di processi di filtrazione meccanica e biologica, giungono nell'unità idroponica, nella quale diventano fertilizzante per la crescita delle piante (Diver, 2006; Goddek et al., 2015; Konig et al., 2016; Lennard & Ward, 2019; J E Rakocy et al., 2006).

In un sistema acquaponico, dunque, si instaura un profilo ciclico (Figura 3.25) in cui gli animali acquatici producono rifiuti, tali rifiuti vengono convertiti dai batteri in nutrienti assimilabili dalle piante, che a loro volta realizzano un processo di fitodepurazione, consentendo il ritorno dell'acqua depurata nella vasca dei pesci (Love et al., 2014; Thorarinsdottir, 2015). Nello specifico i pesci rilasciano, attraverso le branchie, azoto ammoniacale che può raggiungere livelli molto alti nei sistemi a ricircolo (J E Rakocy et al., 2006); per tale motivo il ruolo dei batteri nitrificanti è fondamentale per il corretto funzionamento del sistema (Diver, 2006). Grazie ad essi, infatti, l'azoto ammoniacale viene convertito dapprima in nitriti e successivamente in nitrati, che risultano più facilmente assorbibili dalle piante (Goddek et al., 2015; Z. Hu et al., 2015; J E Rakocy et al., 2006).

3. L'acquaponica

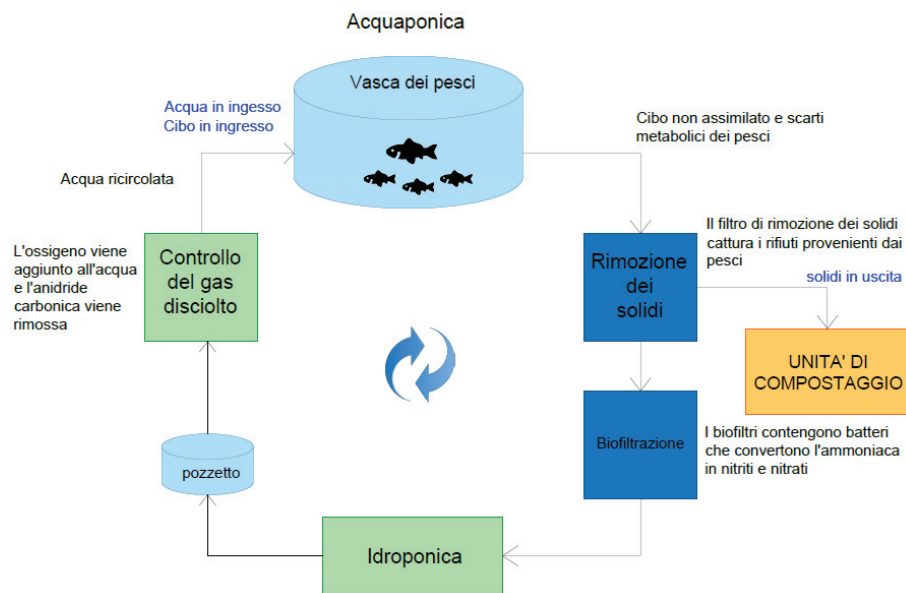


Figura 3-26 Ciclo nei sistemi acquaponici (adattata da Thorarinsdottir, 2015)

Uno dei problemi chiave dei sistemi acquaponici convenzionali è che la tipologia e la quantità di nutrienti prodotta dai pesci non è sempre allineata con quella richiesta dalle piante (Goddek et al., 2019). È opportuno, quindi, trovare un giusto compromesso tra i fabbisogni delle piante e le preferenze dei pesci (Thorarinsdottir, 2015). Una soluzione a questa problematica può essere quella di adottare dei sistemi “disaccoppiati” (Figura 3.26), in cui le unità dedicate alle piante e ai pesci sono separate in due unità indipendenti, in maniera tale che se si verifica un problema in una delle due unità, ogni sezione è isolata e continua a funzionare come un normale sistema idroponico o di acquacoltura (Thorarinsdottir, 2015).

3. L'acquaponica

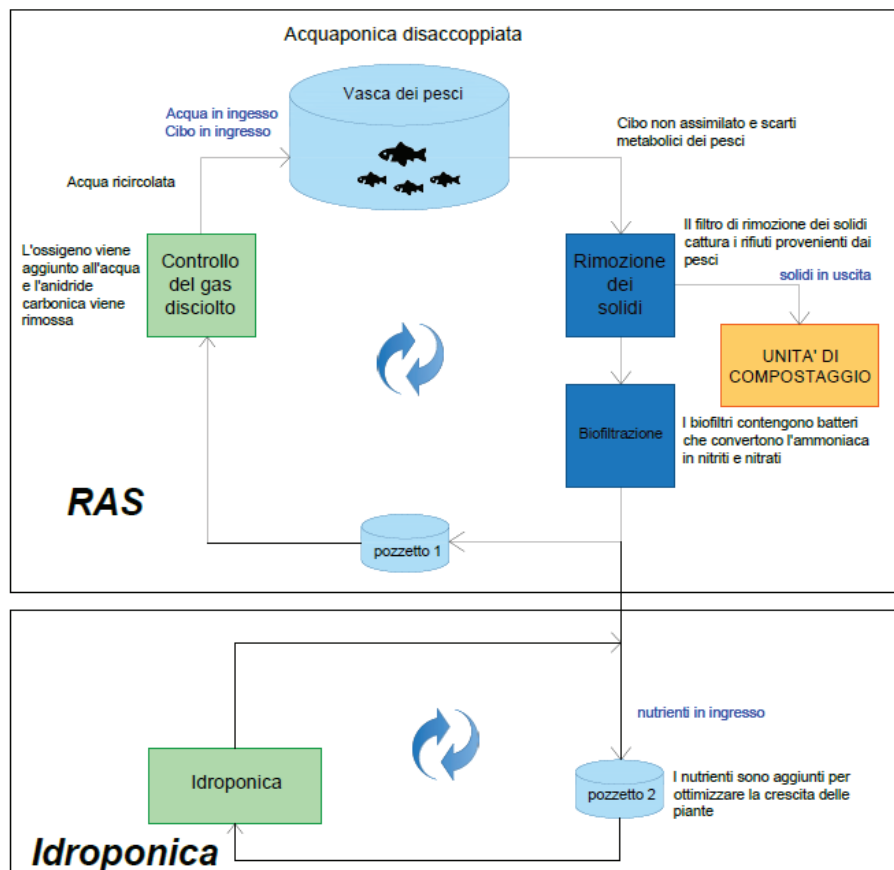


Figura 3-27 Sistema acquaponico disaccoppiato (adattata da Thorarinsdottir, 2015)

Oltre al suo valore come sistema di produzione alimentare, le unità acquaponiche di piccole dimensioni possono essere adoperate come validi strumenti di insegnamento scientifico per un ampio range di materie, mettendo in evidenza i loro cicli ecologici e possono servire anche come elementi decorativi di ambienti casalinghi interni e spazi pubblici, o ancora come semplici passatempo (Konig et al., 2016; Love et al., 2014). L'acquaponica si delinea anche come strumento di partecipazione per il raggiungimento di alcuni obiettivi di sviluppo sostenibile, quali "fame zero", "piena accessibilità al cibo" e quindi "sicurezza alimentare" (Abusin & Mandikiana, 2020).

In sintesi, l'acquaponica si fonda sui seguenti principi (Diver, 2006):

3. L'acquaponica

- i prodotti di scarto di un sistema biologico (acquario) servono come nutrienti per un secondo sistema biologico (idroponica), evitando così l'uso di fertilizzanti chimici;
- l'integrazione di pesci e piante crea un sistema di policoltura che incrementa la produzione multipla;
- l'acqua viene riutilizzata mediante meccanismi di filtrazione e ricircolo;
- la produzione alimentare locale fornisce l'accesso a cibi salutari e freschi e supporta l'economia locale e lo sviluppo sociale.

Nel 2011, l'Aquaponic Community Gardening ha fornito la seguente definizione di acquaponica, sintetizzando un po' tutto quello che è stato detto: "L'acquaponica è la coltivazione di pesci e piante insieme in un sistema costruito a ricircolo utilizzando cicli batterici naturali per convertire gli scarti dei pesci in nutrienti per le piante. Si tratta di un metodo ecologico e naturale per la coltivazione di alimenti che sfrutta le migliori caratteristiche dell'acquacoltura e dell'idroponica senza la necessità di gettare acqua o di filtrarla o di aggiungere fertilizzanti" (Bernstein, 2009).

La moderna acquaponica iniziò negli Stati Uniti d'America (USA) negli anni '70 del secolo scorso e coinvolse molti istituti di ricerca che avevano come comune interesse quello relativo a molte pratiche di agricoltura sostenibile (Lennard & Goddek, 2019). Gli scienziati dell'Università delle Isole Vergini (UVI), una delle regioni del mondo particolarmente arida, guidati dal Dr. Jim Rakocy, avviarono le prime ricerche alla fine degli anni '70 e sono considerati i pionieri della moderna acquaponica: essi svilupparono un sistema acquaponico a scala commerciale che andò avanti in continuo per più di cinque anni ed era composto da un'unità idroponica di tipo flottante che coltivava lattuga, basilico, gombo e altre piante ed un'unità di acquacoltura incentrata sull'allevamento della tilapia (Diver, 2006; Lennard & Goddek, 2019; Thorarinsdottir, 2015). Negli anni '80 Mark McMurty (ex studente laureato) e più tardi il professor Doug Sanders, nell'Università Statale del Nord Carolina, svilupparono un sistema in cui si allevavano tilapie per la crescita di pomodori e cetrioli in un'unità idroponica a flusso e deflusso (E&F) (Diver, 2006; Love et al., 2014). Negli anni '90 Tom e Paula Speraneo, proprietari di S&S Aqua Farm, in Missouri, modificarono il metodo dell'Università del Nord

3. L'acquaponica

Carolina, collegando le acque di scarto di una vasca da 500 l contenenti tilapie ad una coltivazione idroponica realizzata su un supporto di ghiaia all'interno di una serra, promuovendo un nuovo modello di coltivazione acquaponica, adottato sia a livello commerciale che nei programmi scolastici di biologia (Diver, 2006).

Esiste un'interazione storica tra la rivoluzione industriale e l'evoluzione nell'acquaponica. La tecnologia dell'acquaponica fu implementata, inizialmente, verso la fine del XIX secolo quando venivano usati strumenti locali per sviluppare il sistema (acquaponica 1.0); successivamente, vennero realizzate ricerche più approfondite per determinare l'efficienza di filtrazione e di consumo dei nutrienti da parte delle piante nelle acque reflue degli impianti di acquacoltura e furono installati molti dispositivi elettrici come pompe ad acqua, aeratori e mangiatoie per pesci (acquaponica 2.0); intorno agli anni '70, grazie alla robotica e all'information technology, sistemi integrati e software ingegneristici furono inseriti nei sistemi acquaponici, avviando così l'agricoltura di precisione (acquaponica 3.0); gli studi riguardanti l'implementazione dei concetti sull'industria 4.0 hanno avuto inizio alla fine del 2016, mettendo in atto tecnologie quali, monitoraggio in remoto, controllo dei parametri ecosistemici, alto livello di automazione e strumenti di decisione intelligente (Abbasi et al., 2021). L'acquaponica 4.0 è un sistema agricolo digitale, in cui vengono combinate tutta una serie di tecnologie emergenti, come l'Internet of Things (IoT), sistemi cyber-fisici (CPS), intelligenza artificiale (AI), reti di sensori wireless (WSN), big data and analytics (BDA), sistemi robotici autonomi (ARS) e ubiquitous cloud computing (UCC) (Abbasi et al., 2021; Friuli et al., 2021). La realizzazione di tale livello di digitalizzazione richiede l'integrazione efficiente di dati e flussi di informazione insieme ad una gestione della conoscenza, in maniera tale che il sistema può modificarsi e adattare i propri comportamenti ai diversi scenari, basandosi sulle esperienze precedenti e sulle capacità di apprendimento (Abbasi et al., 2021).

3.8.1 Funzionamento dei sistemi acquaponici

3. L'acquaponica

Le piante necessitano di grosse quantità d'acqua per la traspirazione, e la rilasciano poi sotto forma gassosa nell'ambiente circostante; i pesci generalmente consumano meno acqua, ma allo stesso tempo producono grandi volumi di refluo a causa dei rifiuti metabolici accumulati. Con l'acquaponica si è in grado di trasformare i rifiuti in nutrienti. L'effluente dell'acquacoltura subisce trasformazioni microbiche da utilizzare come fonti di nutrienti per la crescita delle piante, mentre l'assorbimento di nutrienti delle piante migliora la qualità dell'acqua per i pesci. Infatti, i residui di mangime dei pesci, insieme ai loro scarti sono utilizzati per decomporre l'azoto ammoniacale in nitrito tramite i microorganismi. I batteri nitrificanti trasformano i composti in nitrati, in questo modo potranno essere assorbiti come nutrienti dalle piante per la crescita. Una volta che l'acqua sarà purificata dall'azoto ammoniacale, potrà essere utilizzata nuovamente per l'acquacoltura grazie al sistema di ricircolo.

L'acquaponica, presenta numerosi vantaggi rispetto ad altri sistemi di acquacoltura a ricircolo e sistemi idroponici che utilizzano soluzioni nutritive inorganiche. Il componente idroponico serve come biofiltro e quindi non è necessario un biofiltro separato come in altri sistemi di ricircolo. Il biofiltro utilizzato nei sistemi acquaponici è l'unico che genera reddito, esso si ottiene dalla vendita di prodotti idroponici come ortaggi, erbe e fiori. I nutrienti forniti dal pesce, nei sistemi tradizionali, verrebbero normalmente scaricati, contribuendo all'inquinamento delle risorse idriche, nei sistemi acquaponici vengono invece riciccolati. La rimozione di sostanze nutritive da parte delle piante prolunga il consumo di acqua e riduce al minimo lo scarico. I sistemi acquaponici richiedono un monitoraggio della qualità dell'acqua inferiore rispetto ai singoli sistemi di ricircolo per i pesci o produzione di piante idroponiche.

3. L'acquaponica

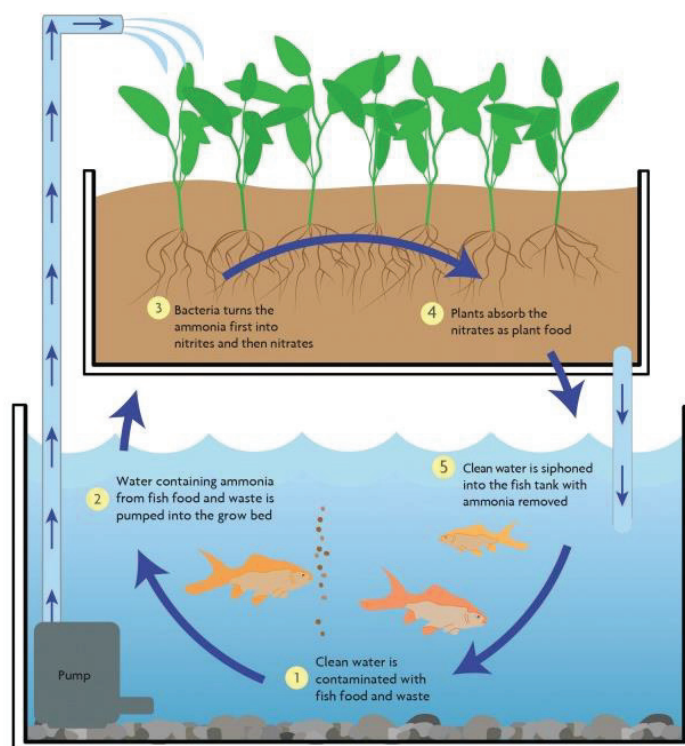


Figura 3-28 Rappresentazione schematica del funzionamento di un sistema acquaponico (Fonte: www.produzionidalbasso.com)

Componente fondamentale in questo sistema è il ricircolo dell'acqua. Per questo motivo si utilizzerà il RAS, *Recirculating Aquaculture Systems*, che permetterà di ricircolare l'acqua del sistema di acquacoltura arrivando a risparmi del 90-99% di acqua (Wei et al., 2019).

Il ricircolo dell'acqua permette la purificazione dell'acqua, l'arricchimento di ossigeno, la riduzione dei batteri e crea le condizioni giuste per la crescita delle specie acquatiche. Per realizzare questi trattamenti è necessario avere una componente per il trattamento della sostanza solida e una per le sostanze solubili. È solitamente previsto un trattamento per la filtrazione fisica e uno per quella biologica, oltre che un sistema per l'ossigenazione e la sterilizzazione dell'acqua.

Per il corretto funzionamento del sistema acquaponico è necessario considerare l'equilibrio di tre componenti organiche principali: l'azoto, il carbonio e il fosforo. Essi compiono delle trasformazioni cicliche andando

3. L'acquaponica

a costituire il ciclo dell'azoto, il ciclo del carbonio e il ciclo del fosforo che saranno trattati con maggiore dettaglio nel capitolo relativo al recupero dei nutrienti.

3.8.2 Il feed rate ratio

Per il corretto sistema di un impianto acquaponico è fondamentale garantire un giusto equilibrio tra la biomassa dei pesci e il numero di piante, ovvero tra il mangime per pesci e il fabbisogno di nutrienti per le piante. Il sistema nel tempo tenderà ad autoregolarsi, ma nelle fasi iniziali è bene dimensionarlo attentamente e riconoscere i segnali di pericolo che potrebbero spostare il sistema dall'equilibrio. Il tasso di alimentazione o *feed rate ratio* è un metodo semplificato per garantire il bilanciamento dell'impianto, questo collega gli elementi principali del sistema: quantità giornaliera di mangime per pesci (g/d) il tipo di impianto (vegetali a foglia o a frutta) e lo spazio per la crescita delle piante (m²) (Capitolo 2, Manuale acquaponica FAO). Con il *feed rate ratio* è possibile individuare la quantità di mangime per pesci da immettere al giorno e al metro quadro di *grownbed*. In funzione della quantità di mangime si può poi calcolare il numero di pesci da allevare. In condizioni di buona biofiltrazione, questo metodo garantisce il giusto equilibrio tra batteri, pesci e piante. Il tasso di alimentazione per ortaggi a foglia è di 40-50 g/m²/giorno, per ortaggi a frutta è di 50-80 g/m²/giorno. Questo parametro è utile per garantire l'equilibrio, ma è bene considerare anche la salute delle specie e controllare l'azoto.

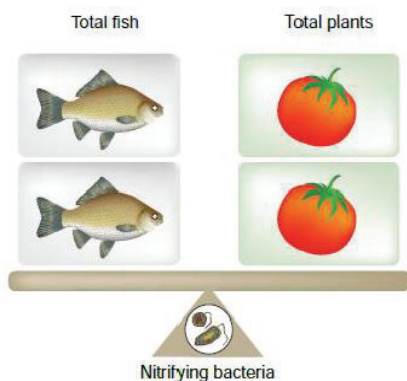


Figura 3-29 Equilibrio nel sistema acquaponico (Fonte: Manuale acquaponica, FAO)

3. L'acquaponica

Le piante, infatti, possono presentare carenze nutrizionali e mostrarlo tramite una scarsa crescita, scarso sviluppo delle radici, foglie gialle. In questo caso bisognerà aumentare il numero di pesci allevati per ristabilire l'equilibrio. D'altro canto, anche i pesci possono mostrare segni di squilibrio del sistema, ad esempio lo sfregamento contro le pareti, i boccheggi in superficie e macchie rosse possono essere sintomi di un accumulo di ammoniaca nell'acqua; quindi, il biofiltro non è abbastanza efficace.

L'ammoniaca e il nitrito devono avere concentrazioni minori di 1 mg/l altrimenti vorrebbe dire che l'azione del biofiltro sia insufficiente. L'aumento dei nitrati è invece positivo per le piante, ma in quantità superiori a 150 mg/l bisogna sostituire una parte dell'acqua. Per questo motivo c'è bisogno di un monitoraggio settimanale dell'azoto.

3.8.3 Componenti principali

La progettazione di un impianto acquaponico è un tema estremamente attuale, diversi infatti sono gli autori (G. Li et al., 2018), (Mohapatra et al., 2020) che, con metodologie differenti, hanno ottenuto ottimi risultati. È possibile realizzare una buona produzione di riso a partire da reflui di acquacoltura da stagno e ed idroponica (G. Li et al., 2018). In alternativa, si può optare per la tecnica NFT, *Nutrien Film Technique*, per l'allevamento del pangasio e la coltivazione della calendula costruendo l'intero sistema in FRP, *Fiberglass Reinforced Plastic* (Mohapatra et al., 2020). In ogni caso, le componenti essenziali di un impianto idroponico sono:

- Acquario
- Biofiltro
- Unità idroponica
- Filtro meccanico

Dal momento che la densità della coltura dei pesci è relativamente alta, sarà prodotta un'ingente quantità di solidi da parte degli stessi. Si assume che il consumo di 1 kg di mangime per pesci generi 0.25 Kg di solidi (Wei et al., 2019). L'accumulo degli escrementi dei pesci produce, in breve tempo, un ambiente tossico per la crescita dei pesci. A questo scopo si

3. L'acquaponica

utilizza una filtrazione fisica per la rimozione dei solidi sospesi. Tale operazione è fondamentale per ottenere un sistema stabile e con una buona qualità dell'acqua. Per valutare il sistema di rimozione più appropriato, è necessario valutare il tasso di carico organico. La filtrazione più essere implementata con diverse tecniche, le più utilizzate sono quelle di sedimentazione e quelle meccaniche.

Le tecniche di sedimentazione sfruttano la gravità per rimuovere le particelle solide in apposite vasche di sedimentazione. I più utilizzati sono i bacini di sedimentazione e le vasche coniche (Nelson et al., 2007). Utilizzando sedimentatori conici si riesce a ridurre circa il 50% delle particelle solidi totali (Rakocy et al., 2006). Con i separatori a ciclone, l'efficienza di rimozione della sostanza particolata in un RAS con tilapia (specie acquatica) sale al 90%, per le particelle di diametro superiore a 250 μm (Pfeiffer et al., 2008).

Le tecniche di sedimentazione meccanica sono basate sul principio di separare le particelle solide dall'acqua utilizzando dei materiali che fungano da schermo, ad esempio i filtri con sabbia. I filtri più utilizzati sono quelli a tamburo, che necessitano di poca energia e spazio. Ad esempio, si può impiegare un sedimentatore cilindrico con sabbia e sfere plastiche per rimuovere le particelle solide e garantire una qualità dell'acqua adeguata (Al-Hafedh et al., 2003).

La filtrazione biologica, tramite il processo di nitrificazione, è necessaria per la rimozione dell'azoto ammoniacale. Esso viene prodotto prevalentemente dagli scarti dei pesci, ovvero dagli escrementi, dalla sostanza organica e quella metabolica. Idealmente, il 100% di questo mangime dovrebbe essere consumato dal pesce. Tuttavia, è stato osservato che i pesci utilizzano solo circa il 30% dell'azoto contenuto nel mangime dato ((Rafee e Saad 2005, Eck et al, 2019). L' eccessivo accumulo di ammoniaca è tossico per i pesci (0.05 mg/l), ma tramite il processo di nitrificazione si può convertire tra il 93% ed il 96% dell'azoto ammoniacale in nitrati (Edaroyati et al., 2017). Per ottenere un'adeguata capacità di rimozione dell'ammoniaca, bisogna favorire lo sviluppo dei batteri nitrificanti. È inoltre necessario evitare, per quanto possibile, la presenza di materia organica nei biofiltri al fine di prevenire la crescita di batteri eterotrofi altamente competitivi. In alternativa, è possibile aggiungere al sistema miscele commerciali di batteri nitrificanti, prima dello stoccaggio, per accelerare il processo di colonizzazione.

3. L'acquaponica

L'azoto che viene escreto è principalmente sotto forma di ammoniaca NH_3 e azoto organico. Grazie alla presenza dei batteri nitrificanti, l'ammoniaca viene trasformata in ione ammonio NH_4^+ che è una forma tollerata dalle piante. Esse ne traggono nutrimento e la parte in eccesso è trasformata dai batteri *Nitrosomonas* in nitrito, NO_2 e successivamente in nitrati NO_3 dai batteri *Nitrospira*. I nitrati vengono poi utilizzati dalle piante, che li trasformano nuovamente nello ione ammonio NH_4 .

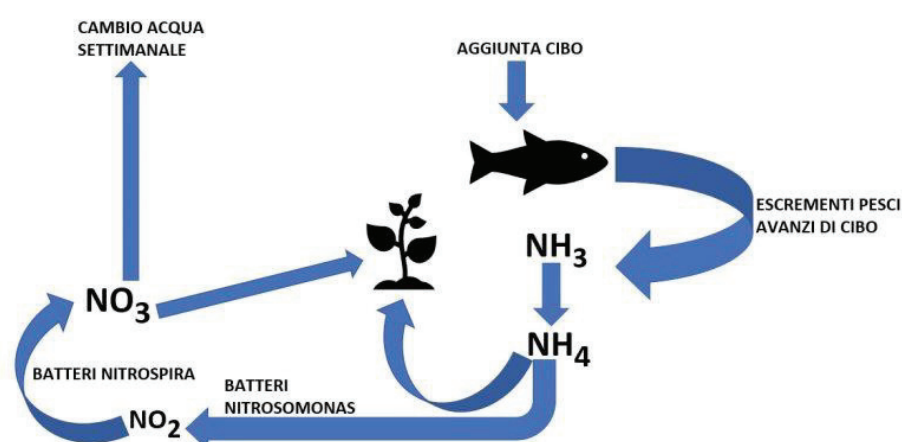


Figura 3-30 Ciclo dell'azoto nei sistema acquaponici (miglioracquario.com)

Solitamente si scelgono biofiltri percolatori. Questo metodo consente di avere un contenuto di ossigeno costantemente elevato, un'efficace rimozione di CO_2 , bassi costi di esercizio e semplicità di funzionamento e gestione. Il tasso di rimozione dell'ammoniaca è di circa $0.43 \text{ g/m}^2/\text{d}$ (Graber et al., 2009).

La vasca dei pesci è un elemento fondamentale nell'impianto acquaponico. Al fine di garantire la sopravvivenza e il prosperare dei pesci, bisognerà creare le giuste condizioni e considerare aspetti legati alla forma, al materiale e al colore della vasca.

La forma raccomandata è quella circolare con fondo piatto. In questo modo l'acqua circolerà in modo uniforme e trasporterà i rifiuti solidi verso il centro a causa del suo stesso movimento. Vasche con spigoli possono invece creare punti in cui si favorisca la sedimentazione di rifiuti e l'assenza di ossigeno. Il materiale dovrà essere inerte, resistente e duraturo. Plastica

3. L'acquaponica

e fibra di vetro sono i materiali più comuni poiché leggeri e maneggevoli. La vasca dovrà essere di un colore chiaro in modo tale da consentire facilmente la visualizzazione del pesce e dei sedimenti depositati sul fondo della vasca, inoltre rifletteranno la luce del sole mantenendo la vasca più fresca. È poi consigliato coprire le vasche dei pesci per prevenire la crescita delle alghe ed impedire l'ingresso di foglie detriti e dai predatori esterni.

3.8.4 Le specie animali utilizzati in acquaponica

Per quanto riguarda le specie ittiche allevabili in acquaponica, sono solitamente di acqua dolce, l'allevamento dei pesci di mare è ancora in fase di sperimentazione. Le specie di acqua dolce possono essere allevate a scopo alimentare o ornamentale. Le specie alimentari più comunemente utilizzate sono:

- Carpa (*Cyprinus carpio*): resiste a bassi livelli di ossigeno disciolto e alla cattiva qualità dell'acqua, e ha una tolleranza elevata alla temperatura dell'acqua;
- Trota iridea (*Oncorhynchus mykiss*): è un pesce di acqua fredda e richiede acqua più fredda rispetto alle specie precedenti. È ideale in sistemi acquaponici situati in regioni a clima nordico o temperato;
- Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*): è una delle specie più allevate nei sistemi acquaponici per la sua facilità di allevamento. È il pesce principalmente allevato a livello mondiale, ma è presente anche in Italia nel settore dei prodotti etnici;
- Gambero di fiume (*Austropotamobius pallipes*): predilige le acque fredde con un ottimo vicino ai 15°C sopportando al massimo la temperatura di 23°C;
- Pesce gatto (*Ameiurus melas*, *Ictalurus punctatus*): è un pesce facile da allevare, resiste ad ampie oscillazioni di ossigeno disciolto, temperatura e pH e tollera alte densità di allevamento.

3. L'acquaponica

Le specie ornamentali più utilizzate sono:

- Pesce rosso: è un pesce molto tollerante alle variazioni ambientali, riesce a vivere in acque con bassi livelli di ossigeno disciolto, elevata torbidità e elevate temperature;
- Carpa koi (*Cyprinus carpio*): è la varietà ornamentale della carpa più comune. È un pesce molto resistente e tollera un ampio range di condizioni ambientali.

3.8.5 Le specie vegetali utilizzate in acquaponica

L'unità idroponica è quella in cui si ha la coltivazione delle piante. Solitamente si utilizzano impianti a letto di crescita, dove le piante crescono in un substrato, impianti con pellicola nutriente (NFT), dove le piante crescono con le radici in tubi di grandi dimensioni con un filo di acqua di coltura, e la coltura in acque profonde (DWC), un sistema in cui le piante sono sospese su un serbatoio di acqua tramite una zattera galleggiante. Il flusso d'acqua scorre dalle vasche dei pesci, attraverso il separatore meccanico e il biofiltro e infine arriva alle piante nei loro letti di crescita, tubi o canali, dove vengono trasformate e assorbite le sostanze nutritive disciolte.

Le specie vegetali coltivate in acquaponica sono molte, ortaggi, erbe aromatiche, piante ornamentali e anche qualche albero da frutto (Consorzio Nazionale Meuccio Ruini, 2016).

Tra le piante da foglia ci sono:

- Lattuga (*Lactuca sativa*): in base alla stagione si sceglie la specie da coltivare;
- Spinacio (*Spinacia oleracea*): è un ortaggio invernale che tollera anche modesta salinità;

3. L'acquaponica

- Bietola (*Beta vulgaris*): è un ortaggio che tollera anche acque salmastre;

Tra le piante da frutto ci sono:

- Pomodoro (*Solanum lycopersicum*): necessita di molta luce, potassio e azoto. Preferisce temperature calde;
- Peperoncino (*Capsicum spp*): predilige temperature calde e buona esposizione alla luce del sole;
- Broccolo (*Brassica oleracea*): ortaggio invernale che preferisce un'ottima esposizione alla luce;

Tra le specie aromatiche ci sono:

- Menta piperita (*Mentha piperita*): è una pianta erbacea che può crescere sia in pieno sole che in zone ombreggiate;
- Basilico: preferisce temperature calde e una buona illuminazione;
- Zafferano: è una spezia che si ottiene dagli stigmi del fiore che una volta raccolti vengono essiccati e poi venduto.

3.8.6 Parametri di controllo

L'acquaponica è un sistema fruttuoso ma molto complesso. Infatti, a differenza delle tecniche agricole tradizionali, i sistemi acquaponici richiedono un livello elevato di monitoraggio, soprattutto sui parametri di qualità delle acque. Del resto, integrando due diverse tecniche di produzione, l'idroponica e l'acquacoltura RAS, aumenta considerevolmente la quantità di processi chimici, fisici e microbiologici che si verificano.

In un ecosistema acquaponico si realizzano i seguenti fenomeni:

- crescita del pesce;
- nitrificazione: conversione di ammoniaca in nitrato;

3. L'acquaponica

- assorbimento dei nutrienti dalle piante (fitodepurazione);
- assorbimento dei nutrienti dai microrganismi;
- mineralizzazione di microparticelle solide;
- denitrificazione: conversione di nitrati in azoto gassoso;
- crescita delle piante

I parametri di qualità delle acque consentono di studiare l'andamento dell'ecosistema acquaponico in quanto l'acqua regola il rifornimento di ossigeno ai pesci e di nutrienti alle piante.

I cinque parametri chiave della qualità delle acque sono:

- l'ossigeno disciolto (DO);
- la temperatura;
- il pH;
- la durezza;
- l'azoto totale

La complessità del sistema acquaponico consiste nell'individuare il range di tolleranza per ciascun organismo, ossia bilanciare le condizioni ottimali di crescita per tre diverse specie: pesci, piante e batteri.

Il primo parametro fondamentale in acquaponica è l'ossigeno disciolto, ovvero la quantità di ossigeno molecolare all'interno dell'acqua, misurato in milligrammi per litro. Dalla presenza di ossigeno dipendono i processi biologici come la respirazione dei pesci e l'attività batterica, pertanto si tratta del parametro che ha un effetto più immediato sulla salute generale dell'ecosistema. Per assicurare un livello adeguato di ossigeno disciolto occorre intervenire con delle strategie di gestione, in quanto la naturale ossigenazione dell'acqua a contatto con l'atmosfera può risultare insufficiente in un sistema di allevamento intensivo. Si possono utilizzare gli aeratori che producono bolle d'aria o le pompe per creare la movimentazione del flusso idrico. Inoltre, non bisogna eccedere il tasso di rigenerazione dell'habitat acquatico evitando di superare 20 kg di biomassa per ogni 1000 litri di acqua totale. Il tasso di ossigenazione dovrebbe essere di 5-8 litri di aria al minuto per metro cubo di acqua (Somerville et al., 2014).

3. L'acquaponica

Il livello di DO è inoltre influenzato fortemente dalle condizioni ambientali. In primo luogo, la capacità dell'acqua di trattenere ossigeno è inversamente proporzionale alla temperatura, pertanto l'acqua calda trattiene meno ossigeno di quella fredda. Per questo motivo le specie di acqua calda, ad esempio la tilapia, possono adattarsi meglio a livelli occasionalmente bassi di DO rispetto alle specie di acqua fredda. Nei periodi caldi come in estate, è ancora più importante integrare dispositivi di aerazione artificiale all'interno delle vasche.

In secondo luogo, l'ossigenazione dipende anche dalla pressione esterna - sia atmosferica che idrostatica - e dalla salinità dell'acqua, ma questi due parametri sono trascurabili nel caso di vasche di allevamento artificiali.

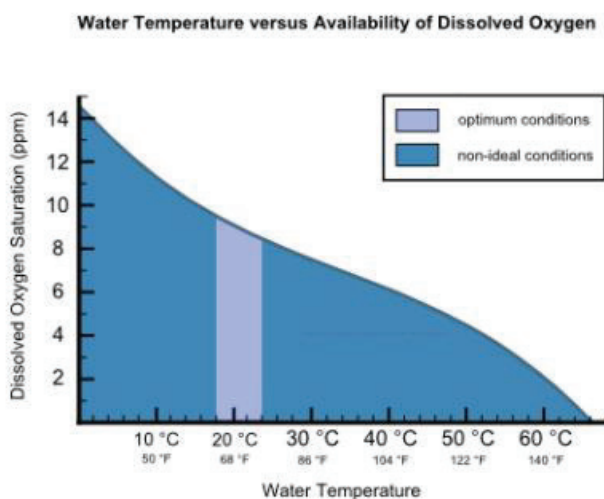


Figura 3-31 Solubilità dell'ossigeno in acqua al variare della temperatura (fonte: graphspro.wordpress.com)

Il livello ottimale di DO per i pesci è di 5-8 mg/l ma alcune specie ittiche come la carpa o la tilapia possono tollerare valori inferiori, fino a 2-3 mg/l. Ad ogni modo tutte le specie possono resistere a bassi valori di ossigeno disciolto per tempi molto brevi, ma è buona norma non scendere al di sotto di 4 mg/L.

La corretta misurazione dell'ossigeno disciolto non è facile da realizzare in quanto richiede l'utilizzo di strumenti digitali costosi e non sempre di facile reperimento. Pertanto, negli impianti acquaponici domestici e amatoriali è sufficiente monitorare lo stato di salute delle specie acquatiche e vegetali.

3. L'acquaponica

Un chiaro segnale di malessere della fauna acquatica si verifica quando i pesci nuotano in superficie boccheggiando in cerca di ossigeno. Per quanto riguarda invece la crescita vegetativa, solitamente le piante richiedono livelli di DO > 3mg/l. Infatti, l'ossigeno viene assorbito non solo attraverso il fusto e le foglie, ma anche dalle radici che possono soffrire di marciume radicale in caso di ipossia. Talvolta i livelli di DO sono riportati in parti per milioni (ppm).

La temperatura dell'acqua influisce su tutto il ciclo acquaponico poiché ha effetto sia sull'ossigeno disciolto che sui livelli di azoto ammoniacale.

Infatti, una temperatura elevata ostacola la ionizzazione dell'ammoniaca aumentando il livello di tossicità delle acque.

L'intervallo termico accettabile per ogni organismo è di 18-30°C, ma la temperatura dell'acqua deve essere regolata soprattutto in base alle specie ittiche e vegetali, che sono più termosensibili rispetto ai batteri. In primo luogo, i pesci sono animali a sangue freddo e hanno una limitata capacità di adattamento termico. I pesci tropicali prosperano a 22-32°C, mentre i pesci di acqua fredda a 10-18°C. Altri pesci d'acqua temperata possono tollerare dei range termici molto ampi di 5-30°C. In ogni caso bisogna assicurare sempre le condizioni termiche più ottimali per ciascuna specie ittica in modo da ridurre l'esposizione a stress e malattie e favorire la crescita con un elevato FCR (*food conversion rate*: efficienza di trasformazione di cibo in biomassa).

In generale è sconveniente e dispendioso modificare la temperatura dell'acqua; pertanto, bisognerebbe scegliere le specie acquatiche e vegetali secondo le condizioni ambientali del sito in cui si colloca l'impianto. Convienne, ad esempio, allevare pesci d'acqua calda in estate e pesci d'acqua fredda in inverno.

Per quanto riguarda le coltivazioni, la temperatura dell'acqua conta più della temperatura esterna. Le verdure invernali richiedono temperature di 8-20°C mentre quelle estive di 17-30°C.

Alla luce di tali considerazioni, alcune tecniche di gestione possono prevenire brusche escursioni termiche delle acque. Ad esempio, le unità impiantistiche possono essere riparate attraverso strutture ombreggianti se si desidera tenera bassa la temperatura. Viceversa, si può ricorrere alle serre o all'energia solare se occorre mantenere una temperatura più alta.

3. L'acquaponica

L'acidità dell'acqua (pH) è definita come la quantità di ioni idrogeno H^+ (idrogenioni) in soluzione ed è la variabile principale in acquaponica perché influenza molti parametri di qualità dell'acqua. L'intervallo accettabile per la maggior parte dei pesci in acquaponica è generalmente tra 6,5 e 9,0. Le linee guida relative al pH dell'acquacoltura per i pesci d'acqua calda suggeriscono che: pH <4,0 è il punto di morte acido; pH 4,0 - 5,0 non c'è produzione, pH 6,5 - 9,0 è un intervallo desiderabile per la produzione ittica, pH 9,0 - 11,0 fornisce una crescita lenta e pH > 11,0 è il punto di morte alcalino (Lawson, 1995; Tarazona e Munoz, 1995). Tuttavia, le maggiori ripercussioni al variare dell'acidità dell'acqua si hanno sulle specie batteriche e vegetali. I batteri, infatti, diventano meno operativi in condizioni acide e ciò può causare problemi di biofiltrazione nelle vasche. Al contrario, le colture possono assimilare i nutrienti necessari alla crescita in condizioni di leggera acidità: un pH al di sopra di 7 può causare carenze nutrizionali dovute all'impossibilità di alcuni nutrienti di solubilizzarsi (ferro, fosforo, manganese). Inoltre, il pH influenza il ciclo dell'azoto: al crescere del pH l'ammoniaca diventa più tossica. +. In questo modo si consente a tutte le coltivazioni di accedere ai nutrienti e non si inibisce l'attività batterica.

Il livello di pH deve essere misurato almeno una volta alla settimana o più frequentemente. È consigliato il monitoraggio giornaliero poiché il pH generalmente diminuisce su una scala temporale di un giorno a seguito di nitrificazione e respirazione.

Anche in questo caso i dispositivi digitali per la misura dell'acidità possono risultare costosi e sconvenienti. Pertanto, negli impianti di piccole dimensioni si possono utilizzare gli indicatori al tornasole che forniscono un valore di pH approssimativo, ma sono molto pratici ed economici.

La durezza dell'acqua si divide in durezza generale (GH) e durezza carbonatica (KH). La prima è un indice dei cationi (ioni positivi) presenti in soluzione, la seconda indica l'alcalinità dell'acqua.

In acquaponica la durezza generale fa riferimento a ioni di calcio (Ca^{2+}), di magnesio (Mg^{2+}) e di ferro (Fe^{+}), e viene misurata in ppm. In generale un'acqua dura è benefica per la crescita vegetativa poiché queste sostanze rappresentano micronutrienti essenziali per le colture.

La durezza carbonatica è la quantità totale di carbonati (CO_3^{2-}) e bicarbonati (HCO_3^-) disciolti in acqua ed è misurata in milligrammi di $CaCO_3$ per litro.

3. L'acquaponica

Queste sostanze esercitano un'azione tamponante (*buffer*) nei confronti dell'acidificazione del sistema. Infatti, il processo di nitrificazione operato dai batteri rilascia acido nitrico (HNO_3), che in acqua si dissocia in ioni idrogeno (H^+) e nitrati (NO_3). Carbonati e bicarbonati, si legano agli ioni idrogeno (H^+) rilasciati dall'acido nitrico e mantengono un pH costante bilanciando il surplus di H^+ con la produzione di acido carbonico, che è un acido molto debole. Gli ioni H^+ rimangono vincolati al composto e il pH rimane stabile (Somerville et al., 2014). Dunque, in assenza di questo "effetto tampone", il sistema subirebbe brusche variazioni di pH, con conseguenze negative sulla salute delle specie ittiche.

Nel caso di acque "poco dure" può essere necessario aumentare in maniera artificiale la durezza carbonatica delle acque, specialmente quando il pH scende al di sotto di 6. A questo scopo si possono aggiungere delle basi forti nelle vasche come, ad esempio, l'idrossido di potassio e l'idrossido di calcio. Esistono altresì delle soluzioni naturali che prevedono l'aggiunta di gusci di conchiglia, graniglia calcarea o gesso triturato negli acquari o direttamente nei letti di crescita.

Viceversa, nel caso in cui ci sia una durezza eccessiva delle acque e un pH elevato, si possono aggiungere delle sostanze acide come l'acido solforico o l'acido fosforico. Si tratta comunque di sostanze concentrate che devono essere maneggiate con la massima accortezza e un loro uso scorretto potrebbe arrecare danni o scompensi al sistema acquaponico.

L'azoto è l'elemento più abbondante dell'atmosfera terrestre (composta di azoto gassoso al 78%) e uno tra i più importanti nutrienti inorganici per tutte le forme di vita. L'importanza dell'azoto risiede nella sua capacità di formare composti organici quali proteine e acidi nucleici, prendendo parte a molti processi biologici.

In acquaponica l'azoto deriva dall'attività fisiologica degli organismi e dalla decomposizione del materiale proteico: l'azoto entra in circolo attraverso il mangime per pesci sotto forma di proteina grezza. In seguito, la nitrificazione trasforma le scorie azotate rilasciate dai pesci in ammoniaca (NH_3), nitriti (NO_2) e nitrati (NO_3).

In un impianto acquaponico i livelli di NH_3 e NO_2 dovrebbero essere inferiori a 0,25-1 mg/l in quanto l'ammoniaca e i nitriti sono circa cento volte più velenosi dei nitrati (Somerville et al., 2014). Negli acquari è presente anche la forma ionizzata dell'azoto ammoniacale, detto ammonio

3. L'acquaponica

(NH_4^+), che viene prodotto dalla reazione tra l'ammoniaca e gli ioni idrogeno, per cui la sua presenza dipende soprattutto dal pH dell'acqua.

Tutte e quattro le forme di azoto (NH_3 , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) possono essere utilizzate dalle piante per stimolare la crescita (Seawright et al., 1998), tuttavia la forma rapidamente assorbita dalle piante è il nitrato. La somma di azoto NH_3 e NH_4^+ è chiamata azoto ammonico totale (TAN) ed è bene mantenere il TAN il più basso possibile (<3 mg/L). Il monitoraggio del TAN deve essere effettuato su base settimanale, a seconda delle condizioni ambientali, del regime di alimentazione e della densità di allevamento del pesce. In questo modo si può verificare l'efficienza dei batteri nitrificanti: l'ammoniaca e i nitriti dovrebbero essere convertiti in nitrati prima che se ne verifichi l'accumulo. In caso contrario, la presenza eccessiva di questi composti può provocare danni irreversibili alle specie acquatiche.

4 I FOTOBIOREATTORI MICROALGALI E L'ALGAPONICA

Negli ultimi anni il fenomeno del riscaldamento globale sta diventando sempre più importante portando ad una serie di conseguenze negative come l'aumento dell'intensità e della frequenza delle precipitazioni estreme (X. Li et al., 2021). La causa più accreditata del riscaldamento globale è l'elevata emissione di gas climalteranti *Green House Gas* (GHG), da parte delle attività antropiche (Huang et al., 2012). I gas climalteranti comprendono l'anidride carbonica (CO₂), il metano (CH₄), i gas fluorurati, gli ossidi di azoto NO_x ed il vapore acqueo. I gas serra sono gas presenti in atmosfera, essi sono trasparenti alla radiazione solare in entrata sulla Terra, ma riescono a trattenere in maniera consistente la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nuvole. La causa maggiore dell'emissione di anidride carbonica in atmosfera è legata alla combustione dei combustibili fossili quali il carbone, il petrolio, il gas naturale, che sono quotidianamente emessi a causa delle attività antropiche. L'attività umana agisce sul clima in quanto capace di modificare l'ambiente naturale e gli equilibri degli ecosistemi. In particolare, l'inquinamento atmosferico, l'urbanizzazione, la modifica dell'uso del suolo, l'agricoltura intensiva, l'industrializzazione, sono tutti fattori in grado di modificare le caratteristiche climatiche di aree territoriali. A questo proposito sono stati sviluppati diversi accordi per la riduzione delle emissioni di gas serra tramite i protocolli internazionali. Si ricorda il Protocollo di Kyoto del 2005 ed il protocollo del 28 novembre 2019 in cui il Parlamento europeo ha approvato due distinte risoluzioni: l'obiettivo di limitare il riscaldamento globale al di sotto di 1,5°C e la riduzione del 55% delle emissioni di gas serra entro il 2030. Per raggiungere tali obiettivi sono stati effettuati diversi studi in tutto il mondo (Misila et al., 2020), (Hou et al., 2020), (Tang et al., 2021a).

Per mitigare il riscaldamento globale si sta lavorando a diversi metodi per catturare e stoccare l'anidride carbonica. Gli esperti di molti paesi stanno lavorando ad una tecnologia di cattura e utilizzo del carbonio basata sulle microalghe. Le alghe, piante antiche e semplici che crescono nell'oceano e nel sistema idrico, sono famose per il loro alto tasso di crescita e la capacità

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

di cattura del carbonio rispetto ad altre piante. Infatti, tramite le alghe è possibile sviluppare il processo chimico della fotosintesi che è in grado di convertire ed utilizzare la CO₂. A questo proposito si introdurrà il fotobioreattore a membrana combinato con una colonna di assorbimento per la cattura di GHG e l'upgrading del biogas.

4.1 TIPOLOGIE DI FOTOBIOREATTORI

I fotobioreattori, *photobioreactor* (PBR), sono sistemi colturali ottimali per la crescita di microrganismi fotosintetici (microalghe, cianobatteri e batteri fotosintetici), che sfruttano l'energia luminosa solare o artificiale per realizzare il processo di fotosintesi e quindi di cattura della CO₂.

Il primo fotobioreattore fu utilizzato negli anni '40 per lo studio della crescita di una microalga *Chlorella* e della sua attività fotosintetica. Prima di ciò, si utilizzavano principalmente vasche in cui si aveva però un controllo limitato delle colture e minore isolamento della coltura dall'ambiente. Infatti, i fotobioreattori possono essere realizzati in diverse modalità:

- Fotobioreattori aperti
- Fotobioreattori chiusi

I fotobioreattori aperti sono sistemi in cui le alghe sono coltivate sfruttando la luce solare; pertanto, l'altezza massima realizzabile è legata alla profondità di radiazione solare, in particolare non si realizzano *raceway* di altezza superiore ai 50 cm. Dal momento che la coltura *raceway* avviene all'aria aperta, si possono avere una serie di svantaggi legati essenzialmente alla contaminazione delle alghe da parte di batteri, protozoi o altre microalghe infestanti che possono accedere tramite l'esposizione con l'esterno. Inoltre, possono esserci problemi di evaporazione dell'acqua, soprattutto nel caso di ambienti caldi e temperature elevate e in questo modo si causeranno anche alterazioni delle concentrazioni dei nutrienti. I fotobioreattori da esterno sono condizionati dal ciclo giorno-notte, mentre quelli da interno sono illuminati artificialmente e continuamente, in assenza di luce o di un substrato organico, le cellule metabolizzano componenti cellulari per ottenere energia determinando una diminuzione della biomassa prodotta (González-Camejo et al., 2020). Per questo motivo è necessario integrare la luce naturale con una artificiale notturna.

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

I fotobioreattori chiusi sono sistemi ottimali per la crescita dei microrganismi fotosintetici poiché permettono di avere un processo controllato nel quale produrre biomasse microbiche e/o metaboliti. Tali sistemi necessitano di un adeguato rifornimento di energia radiante e la coltura non entra in contatto con l'atmosfera, in questo modo non si avranno problemi di evaporazione dell'acqua e fenomeni di foto inibizione. Solitamente i fotobioreattori chiusi sono realizzati in vetro o in plastica trasparente. Le forme più utilizzate sono i PBR tubolari verticali, orizzontali, a pannello o elicoidali. La scelta del reattore dipende dalle specie da coltivare e dall'applicazione (Mata et al., 2010). Spesso però, per evitare gli eccessivi costi di manutenzione e operativi, si opta per sistemi aperti *raceway* nonostante la resa di tali sistemi sia inferiore.

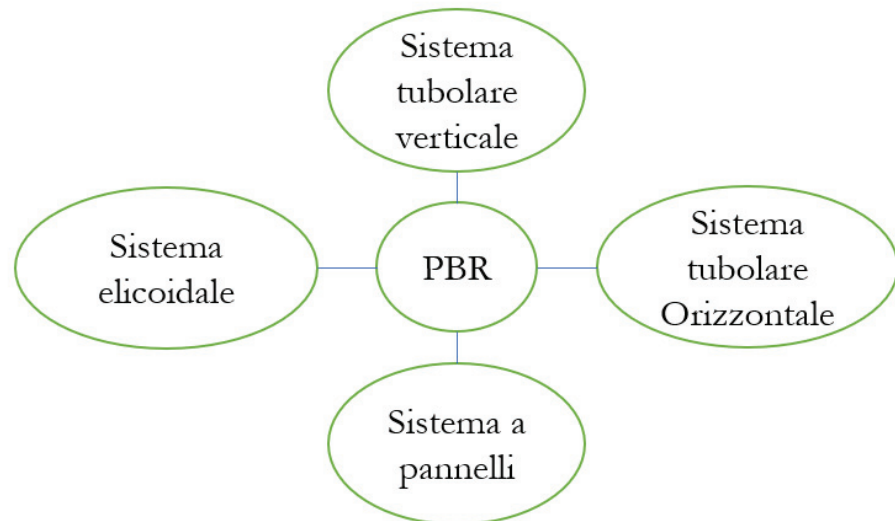


Figura 4-1 Tipologie di PBR chiusi

4.1.1 Sistema tubolare verticale

Il sistema tubolare è una configurazione molto popolare costituita da una serie di tubi trasparenti disposti in varie configurazioni e orientati in modo orizzontale, verticale o inclinati. Sul fondo della struttura è presente uno sparger per disperdere la CO₂ all'interno della miscela sotto forma di bolle, garantire la miscelazione e la rimozione dell'ossigeno. Esempi di reattori

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

tubolari verticali sono gli air lift e le colonne a bolle, generalmente in polietilene o in vetro per permettere la penetrazione dei raggi luminosi. Per assicurare un sufficiente volume e scambio gas-liquido i reattori tubolari presentano un diametro maggiore rispetto ai fotobioreattori orizzontali, solitamente l'altezza massima è di 4 m e il raggio fino a 0,2 m, la semplicità di questo tipo di struttura facilita la manutenzione e la pulizia. Uno svantaggio è legato alla penetrazione della luce che deve avere una diffusione ottimale affinché il processo avvenga correttamente e con buona efficienza.

L'anidride carbonica viene immessa nella zona centrale sotto forma di bolle, in questo modo si solleva anche parte della miscela, successivamente la miscela discende portando con sé il gas rimasto intrappolato garantendo la miscelazione.

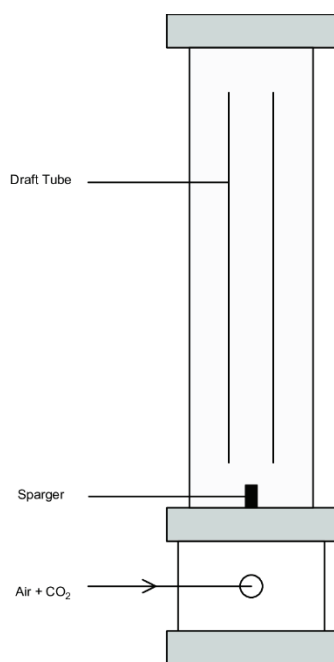


Figura 4-2 Schematizzazione di un reattore tubolare verticale Air lift. Immissione della CO₂ tramite sparger all'interno del tubolare (Fonte: www.researchgate.net).

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

4.1.2 Sistema tubolare orizzontale

I reattori a tubi orizzontali sono spesso utilizzati per trattare alti volumi di acque. Sono solitamente costituiti da più tubolari in serie e parallelo di diametro di circa 15 cm. La configurazione orizzontale o inclinata è in grado di favorire un angolo migliore rispetto alla luce incidente in confronto alle disposizioni verticali, aumentando così l'efficienza della quantità di luce naturale raccolta e poi trasmessa. Tuttavia, ci sono problematiche legate alla difficoltosa rimozione dell'ossigeno che può inibire in maniera significativa la fotosintesi. Inoltre, possono esserci problemi legati alla temperatura che viene modificata tramite spray d'acqua. Per mantenere la giusta turbolenza poi, si hanno alti consumi energetici.



Figura 4-3 Sistema a tubolari orizzontali in serie e parallelo con diametro di 15 cm (Fonte: terraevita.edagricole.it)

4.1.3 Sistema a pannelli

I fotobioreattori a pannelli o *flat plate* garantiscono un'elevata efficienza di utilizzo della luce solare e un ottimo rapporto superficie volume. Essi sono costituiti da lastre tipicamente trasparenti disposte in configurazioni verticali e inclinate. Questi possono essere infatti orientati in modo da garantire un'esposizione ottimale nel rispetto della luce solare incidente e garantire una distribuzione uniforme della luce in tutto il sistema. I PBR sottili sono costosi e difficili da pulire e sono spesso soggetti a fluttuazione

4. I fotobiorattori microalgali e l'algaponica

della temperatura. Il maggior vantaggio è dovuto alla possibilità di uno scambio gas-liquido, aperto verso l'esterno, limitando l'accumulo dell'ossigeno nel sistema. La temperatura può essere regolata mediante spruzzi di acqua dall'esterno.



Figura 4-4 Sistema a pannelli costituito da lastre trasparenti in configurazione verticale (Fonte: webapi.ingenio-web.it)

4.1.4 Sistema elicoidale

Questa tipologia è costituita da un tubo trasparente flessibile di piccolo diametro attorcigliato a spirale. La configurazione più utilizzata è il cosiddetto *biocoil* composto da tubi in polietilene da 3 cm accoppiati ad un'unità per lo scambio gas-liquido ed un sistema di scambio di calore. In questa configurazione il raggio della spirale è costante, altrimenti possono realizzarsi anche sistemi a raggio variabile decrescente con il crescere dell'altezza ottenendo una configurazione elicoidale conica. In entrambe le configurazioni il gas è iniettato o dall'alto o dal basso ed è presente una pompa per mantenere in moto la miscela, inoltre si ha un sistema di luci interno per assicurare il controllo dell'intensità luminosa. Attualmente questo sistema fornisce ottimi risultati per il rapporto superficie volume e presenta un ingombro limitato. I reattori elicoidali forniscono un buon trasferimento dell'anidride carbonica dalla fase gassosa a quella liquida in

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

quanto la zona in cui avviene l'assorbimento è particolarmente lunga, se paragonata agli altri fotobioreattori.



Figura 4-5 Sistema elicoidale con tubi in polietilene a raggio costante e sistema di illuminazione interno (Fonte: biorefining.cfans.umn.edu)

4.2 FOTOBIOPROCESSI: LE MICROALGHE

Esistono diversi metodi per eliminare l'anidride carbonica: metodi fisici, che sfruttano la pressione parziale del gas, metodi chimici, che utilizzano solventi per favorire il passaggio in soluzione del gas, metodi chimico-fisici, che integrano i due metodi precedenti, e quelli biologici che coinvolgono microrganismi in grado di fissare l'anidride carbonica e convertirla in altri composti organici.

Per utilizzare i metodi biologici è necessario impiegare microrganismi, quali le microalghe, inclusi i cianobatteri, per realizzare la fotosintesi. Recenti studi hanno messo in luce il ruolo inaspettato, e importante, di micro e macroalghe nei processi di immagazzinamento del carbonio (dalla

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

CO₂) sotto forma di biomassa. Il possibile contributo delle macroalghe al sequestro del carbonio sotto forma di biomassa è stato a lungo ignorato, ma osservazioni e calcoli recenti stanno tuttavia rivelando che le macroalghe possano inglobare notevoli quantità di carbonio che viene remineralizzato, depositato vicino alle coste o sequestrato nelle profondità oceaniche. Le alghe inoltre presentano notevoli vantaggi poiché presentano elevate velocità di crescita, capacità di prosperare in ambienti ricchi di nutrienti, abilità di fissazione della CO₂ e possibilità di coltivazione in condizioni difficili. (Barbato et al., 2012).

Le microalghe sono microrganismi unicellulari, eucarioti, fotoautotrofi che partecipano al processo di fotosintesi, nel quale le molecole organiche vengono sintetizzate a partire da sostanze inorganiche disciolte, usando la radiazione solare come fonte di energia. Negli ambienti acquatici, esse rappresentano i produttori primari e realizzano un importante bilanciamento di materia ed energia per gli organismi eterotrofi. I cianobatteri sono organismi procarioti, fotoautotrofi che vengono spesso chiamate alghe azzurre a causa della presenza di un pigmento verde-blu. Esse sono in grado di svilupparsi in presenza di nutrienti, luce ed anidride carbonica, presentando un tasso elevato di crescita, maggiore rispetto alle piante terrestri. La crescita delle microalghe dipende da diversi fattori:

- Fattori biotici: agenti patogeni, protozoi, competizione con altre microalghe;
- Fattori abiotici: luce, nutrienti, anidride carbonica, ossigeno, temperatura, pH e salinità;
- Fattori operativi: rapporto tra portata volumetrica e volume del reattore, miscelazione ecc.

Per determinare la concentrazione di microalghe all'interno del fotobioreattore è necessario valutare la dinamica delle microalghe. Sono stati sviluppati diversi modelli in letteratura per avere delle informazioni biologiche rilevanti, che potranno servire per migliorare il processo e la produzione. Ci sono diverse procedure di laboratorio e modelli matematici per studiare e valutare il tempo per avere un completo ciclo di vita delle alghe (Pahija & Hui, 2021). Infatti, le alghe presentano una curva di crescita composta di tre fasi principali: una prima fase esponenziale, una stazionaria e un successivo declino (He et al., 2018). Nella prima fase si registra una velocità di crescita dei microrganismi massima, la

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

concentrazione di biomassa aumenta in modo esponenziale condizioni di substrato non limitante. Nella seconda fase, il tasso di crescita si annulla e il numero di microrganismi resta costante. Nell'ultima fase il numero di cellule vitali diminuisce, la velocità di divisione delle cellule è minore delle cellule morte. Questo si verifica a causa dell'esaurimento dei nutrienti o in condizioni di crescita non ideali.

Le microalghe più utilizzate sono *Arthrospira*, *Scenedesmus*, *Desmodesmus*, *Chlorella*, *Pediastrum* e *Chlamydomonas*;

- *Arthrospira*: in questa categoria ricade la spirulina, una microalga molto diffusa in ambito alimentare. Appartiene alla classe dei cianobatteri e presenta un colore blu-verde ed una forma allungata.;
- *Scenedesmus*: sono alghe il cui movimento dipende dalla corrente dell'acqua, possono essere di forma diversa e sono solitamente di origine lacustre. Vivono in ambienti alcalini;
- *Desmodesmus*: sono molto simili alle alghe *Scenedesmus* ma possono avere un diverso numero di cellule nella colonia, diversa forma e sono solitamente più arrotondate;
- *Chlorella*: è un'alga verde unicellulare di acqua dolce, dalla forma sferica e di diametro compreso tra 2 e 10 μm . Si moltiplica rapidamente richiedendo piccole quantità di minerali per riprodursi, favorisce l'eliminazione di inquinanti ambientali e metalli pesanti;
- *Pediastrum*: è un'alga verde facente parte del fitoplancton d'acqua dolce, è priva di movimento autonomo e si sviluppa prevalentemente in acqua corrente e stagnante;
- *Chlamydomonas*: è un'alga di tipo sferoidale con due flagelli nell'estremità anteriore. È dotata di movimento autonomo e può adattarsi a diversi range di pH e tipi di acque sia dolci che salmastre e marine;

Grazie alla presenza della clorofilla, le microalghe, così come i vegetali terrestri, svolgono la fotosintesi clorofilliana. La clorofilla cattura la luce del sole e permette delle reazioni chimiche in grado di trasformare l'acqua e l'anidride carbonica in sostanze organiche complesse che possono essere

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

poi utilizzate dalla pianta come nutrimento. Inoltre, si ha la liberazione di ossigeno che favorisce la creazione di un ambiente favorevole per le altre specie viventi. Nelle alghe azzurre invece, la fotosintesi è svolta ad opera della fucocianina piuttosto che dalla clorofilla.

Il processo fotosintetico avviene in due fasi, la prima è quella luminosa, la seconda è la fase oscura. Nella prima fase, in presenza di luce, si converte l'energia solare in energia chimica, ottenendo principalmente ATP (adenosina trifosfato) e NADPH (composti riducenti) e produzione di ossigeno. Nella seconda fase, in assenza o presenza di luce, l'anidride carbonica viene trasformata in zuccheri.

Le microalghe sono dei microorganismi che possono essere utilizzati per diversi scopi, sia alimentari, sia energetici, sia chimici, per questo motivo ci si sta concentrando su questo elemento negli ultimi anni.

4.2.1 Parametri di progetto

Per progettare un fotobioreattore è necessario considerare una serie di fattori che potrebbero influenzare la crescita delle alghe. La prima cosa da considerare è la necessità che avvenga il processo di fotosintesi in modo efficiente. Affinché ciò sia possibile, si dovranno garantire dosaggi efficaci di carbonio ed energia, ovvero anidride carbonica e luce. Inoltre, si dovranno avere concentrazioni ottimali e buona miscelazione di nutrienti, carboidrati, lipidi, proteine e acidi nucleici.

In primo luogo, bisogna decidere il materiale per la costruzione del fotobioreattore. I materiali più frequenti sono quelli in vetro, polietilene, policarbonato, fibra di vetro, plexiglas, polivinilcloruro (PVC); la scelta si ha in funzione della resistenza e, della stabilità chimica, della semplicità di pulizia e soprattutto in funzione della trasparenza per permettere alla radiazione luminosa di entrare nel reattore.

In secondo luogo, si stabilirà il metodo di agitazione per garantire una buona miscelazione che sia né troppo elevata da danneggiare le cellule, né troppo bassa da non favorire la crescita delle alghe. Solitamente si usano mixers meccanici a larga scala e magnetici a piccola scala.

I parametri da controllare sono i seguenti:

- Portata liquida: è necessario garantire un buon ricircolo dall'MPBR (*MembranePhotoBioReactor*) alla colonna di assorbimento in modo da

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

evitare la sedimentazione della biomassa e facilitare la cattura della CO₂. La portata di ricircolo può essere fissata pari a quella liquida;

- Portata gassosa: bisogna regolare la portata di CO₂ in funzione dello sforzo di taglio agente sulla biomassa algale. L'effetto dello sforzo di taglio è collegato, infatti, alla produzione della biomassa;
- *Empty Bed Residence Time* (EBRT): è il rapporto tra il volume del letto e la portata di gas nel sistema. Rappresenta un parametro critico ed è collegato alla grandezza del sistema di trattamento e alla portata da trattare;
- *Liquid to gas ratio* (L/G): è un altro parametro da controllare e deve essere contenuto in determinati range;
- Intensità della luce: Il range di assorbimento della luce per le microalghe varia tra i 400 e i 700 nm a seconda del tipo di alga;
- Anidride carbonica: per avere una crescita ottimale è necessario avere un rapporto tra la quantità di CO₂ e di aria. Un'elevata concentrazione di CO₂ comporterebbe un abbassamento del pH a livelli non sopportabili dai microrganismi, una piccola concentrazione causerebbe invece l'aumento del pH e l'auto flocculazione o la stessa morte delle cellule;
- Pressione: il range di pressione è contenuto e deve essere monitorato usando un manometro.

Dal punto di vista fisico/chimico, sarà necessario analizzare altri parametri di qualità.

- pH: il pH è un parametro fondamentale, che deve restare stabile all'interno della coltura, poiché suoi repentini cambiamenti porterebbero problemi di produzione. Come visto in precedenza, può causare danni alle cellule e cambiamenti in composizione oltre che la contaminazione da parte di altre specie. La ragione principale del cambiamento del pH, come visto in letteratura, è dovuto alla formazione del H₂CO₃ dalla reazione tra l'acqua e l'anidride carbonica. Il pH ottimale è contenuto nel range di 7-9;

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

- Temperatura: la variazione della temperatura influisce sulla crescita delle alghe. Il range possibile è tra i 15°C e 30°C, quello ottimale tra 25 e 28°C;
- Ossigeno disciolto: un livello troppo elevato può inibire la crescita delle alghe;
- Solidi sospesi totali: la misura dei solidi è una misura diretta della biomassa algale. Una buona concentrazione è circa 0.1 g/l;
- Torbidità: è un parametro fortemente correlato con i solidi sospesi totali che può servire anche come misura indiretta dei solidi stessi;
- Conduttività: misurando la conduttività si valuta la concentrazione di sali nel reattore, una salinità elevata avrebbe risultati negativi sulla crescita delle alghe.

4.3 POTENZIALITÀ DELLE MICROALGHE

La crescente industrializzazione e l'esaurimento dei combustibili fossili non rinnovabili hanno portato alla necessità di ricercare risorse rinnovabili alternative valide per soddisfare la crescente domanda di energia e la necessità di diminuire le emissioni di anidride carbonica. Le moderne strategie energetiche mondiali si basano sull'utilizzo di alternative ecologiche ed economiche; la coltivazione di microalghe ha il potenziale per soddisfare questi criteri.

Le microalghe sono state identificate come un'alternativa promettente e sostenibile per diversi motivi:

- ciclo di vita breve;
- alto tasso di crescita;
- elevata efficienza di utilizzo di CO₂;
- buona efficienza nella rimozione di ammoniaca, fosforo e metalli pesanti per il trattamento delle acque reflue;

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

- buona risorsa rinnovabile per la produzione di biomassa, biocarburanti e fertilizzanti biologici.

Allo stato attuale, la tecnologia e il costo sono i principali fattori che limitano l'applicazione delle microalghe su scala industriale, perchè si necessita di minimizzare il costo di produzione, ma l'uso simultaneo di microalghe per il trattamento delle acque reflue e la produzione di biocarburanti ha reso queste sfide praticabili ed economicamente sostenibili (Hussain et al., 2021).

In particolare, le microalghe rappresentano anche una potenziale soluzione per la sicurezza alimentare globale e per la mitigazione dei problemi ambientali causati dall'espansione della produzione alimentare terrestre. Le microalghe, come si è visto nel capitolo precedente, sono responsabili della cattura dell'anidride carbonica, ed essendo anche ricche di nutrienti possono essere riutilizzate come fonte di cibo sostenibile sia per gli esseri umani che per gli animali. Oltre che come fonte alternativa di proteine, le microalghe contengono nutrienti, acidi grassi polinsaturi a catena lunga omega-3 e 6 (il cui contenuto può competere con quello dei pesci marini). Inoltre, i pigmenti colorati delle microalghe possono agire come antiossidanti insieme a molte altre proprietà benefiche per la salute oltre che come coloranti naturali.

L'integrazione delle alghe nei mangimi per gli animali fornisce numerosi benefici, come l'aumento della crescita e del peso corporeo, la riduzione della necessità di assunzione del mangime, una maggiore risposta immunitaria e resistenza alle malattie, un'azione antibatterica e antivirale e un arricchimento dei prodotti di allevamento con composti bioattivi. Per questi motivi, si è riscontrata una rapida crescita della bioeconomia algale nell'industria alimentare e dei mangimi (Kusmayadi et al., 2021).

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

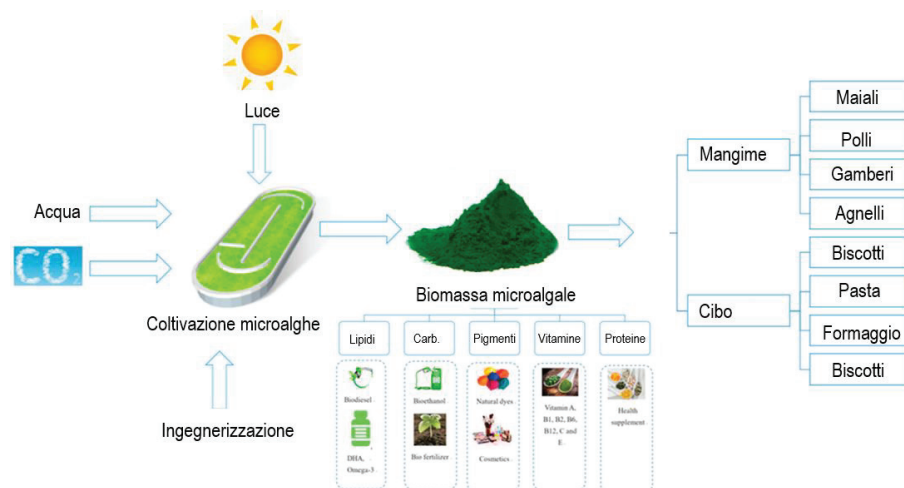


Figura 4-6 Potenzialità della biomassa algale (Fonte: ars.els-cdn.com)

Un recente studio, eseguito sottoponendo una serie di questionari in Spagna, ha dimostrato come i consumatori abbiano interesse nell'utilizzare prodotti alimentari arricchiti con microalghe e vogliono conoscere il loro potenziale (Lafarga et al., 2021).

Oltre che per la produzione di alimenti e mangimi, il contributo delle microalghe può essere relazionato anche ad altre importanti attività economiche come la produzione di cosmetici e composti per la salute. Inoltre, si potrebbero avere potenziali contributi anche nei settori emergenti, come nella produzione di biomateriali, prodotti legati all'agricoltura, biocarburanti e fornitura di servizi come il trattamento delle acque reflue e la depurazione dei gas industriali (Fernández et al., 2021).

Le microalghe offrono, quindi, possibilità quasi illimitate per lo sviluppo di una moderna bioeconomia data la loro flessibilità metabolica e gli elevati tassi di produzione di biomassa, oltre che la loro capacità di adattamento anche in condizioni ambientali svantaggiose. La bioeconomia è, infatti, un paradigma nuovo ed essenziale per ridurre la nostra dipendenza dalle risorse naturali e rispondere alle minacce ambientali.

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

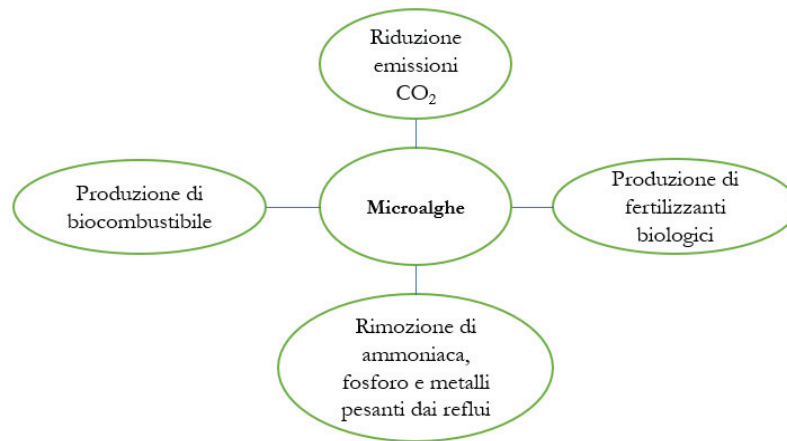


Figura 4-7 Potenzialità delle microalghe

4.3.1 Derivati delle microalghe

Gli attuali sistemi energetici non solo presentano pressioni sulle risorse non rinnovabili, ma comportano anche un incremento delle emissioni di gas climalteranti. Con l'introduzione dei biocarburanti si sta andando in una nuova direzione che potrà presentare diversi vantaggi economici e ambientali. Negli ultimi anni sono state sviluppate diverse tecnologie per la produzione di biodiesel, tra queste si ritrovano quelle che utilizzano le microalghe. In realtà, si tratta per lo più di tecnologie sviluppate in impianti pilota, ad esempio in vasche e in fotobioreattori, ma si prevede che nel medio-lungo termine la produzione di biodiesel da microalghe sarà possibile.

È stato stimato che il superamento del limite di 450 ppm (parti per milione) di concentrazione di CO₂ nell'atmosfera condurrebbe ad oltrepassare il punto di non ritorno dell'inquinamento globale i cambiamenti ambientali sarebbero irreversibili (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, Enea).

Uno strumento per garantire la crescente richiesta energetica, mitigare i cambiamenti climatici e immagazzinare l'anidride carbonica, è l'utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili. Il biodiesel racchiude una serie di combustibili prodotti da oli e grassi rinnovabili. Questo si presenta come un biocombustibile liquido, ambrato, facilmente infiammabile, non esplosivo, non tossico e con una viscosità simile a quella del gasolio. Il

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

biodiesel presenta una serie di vantaggi ambientali rispetto al gasolio (Anfelli, 2016):

- Minori emissioni nette di monossido di carbonio (CO) del 50%;
- Minori emissioni nette di biossido di carbonio del 78,5%;
- Non contiene idrocarburi aromatici;
- Non produce emissioni di diossido di zolfo (SO₂);
- Minori emissioni di polveri sottili fino al 65%;
- È biodegradabile
- È prodotto con microalghe che nel processo di crescita consumano CO₂

Una delle scelte più importanti per determinare l'efficienza del processo produttivo è data dalla selezione del ceppo microalgale. In generale, un buon ceppo deve essere in grado di produrre una buona quantità di lipidi e un'adeguata velocità di crescita. Solitamente una specie molto utilizzata è la *Chlorella*.

Tabella 4-1 Contenuto lipidico microalghe (www.iat.unina.it)

Specie di microalghe	Contenuto lipidico [% s.s]
Botryococcus braunii	25-75
Chlorella	18-57
Dunaliella sp.	17-67
Nannochloropsis sp.	12-68
Scenedesmus obliquus	11-55
Schizochytrium	50-77

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

Stichococcus	33
--------------	----

Una volta eliminata l'acqua ed estratti gli oli, la biomassa esausta può essere utilizzata come mangime per l'acquacoltura, integratori alimentari umani e prodotti farmaceutici, come visto anche nei capitoli precedenti.

Per la produzione delle microalghe, è necessario scegliere dei sistemi chiusi, come i fotobioreattori, che in condizioni controllate di illuminazione e insufflazione di aria arricchita con CO₂ permettono l'accrescimento cellulare. Raggiunta una concentrazione cellulare adeguata, la biomassa algale viene centrifugata ed inserita in fermentatori chiusi, senza luce ma con una fonte di carbonio organico all'interno, cosicché le alghe inizino un processo eterotrofo che consenta la produzione e l'immagazzinamento dei lipidi.

La fonte di carbonio organica può essere scelta dal produttore, si possono utilizzare reflui caseari, enologici ecc. Dal momento che le microalghe nella coltura sono altamente diluite, per estrarre i lipidi e gli altri prodotti, contenuti in esse, è necessario ridurre il contenuto d'acqua. Si possono usare diverse tecniche: centrifugazione, sedimentazione, flottazione, flocculazione. Eseguito questo trattamento, per eliminare i residui di acqua intracellulare si procede solitamente con l'essiccazione in stufa. Infine, si procede con l'estrazione dei triacilgliceroli (TAG) tramite l'utilizzo di solventi organici scelti in funzione della specie microalgale scelta. Altrimenti, si possono eseguire estrazioni tramite spremitura a freddo, come quella utilizzata nell'industria alimentare per gli oli extravergine di oliva. Per effettuare la scelta migliore si possono eseguire delle analisi tecnico economiche (Tejada Carbajal et al., 2020) (Branco-Vieira et al., 2020).

4. I fotobiorreattori microalgali e l'algaponica

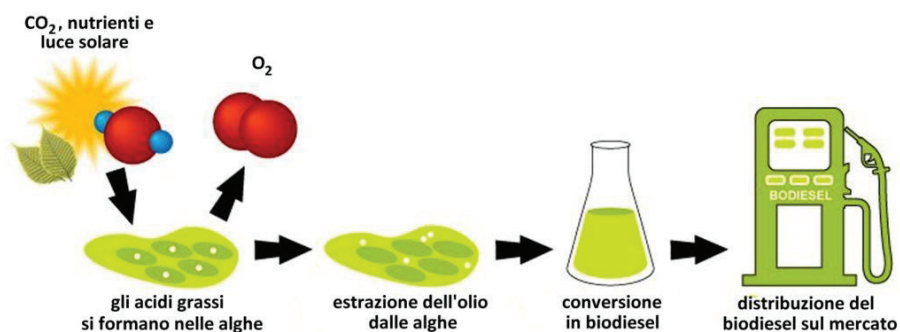


Figura 4-8 Potenzialità delle microalghe

In uno studio è stato valutato il ciclo di vita (LCA) per la produzione di biocarburanti. Il ciclo di vita consiste nell'analisi dei potenziali carichi ambientali e delle risorse naturali utilizzate durante la fabbricazione di un prodotto, al fine di ottenere una maggiore consapevolezza sulla produzione ed orientarla verso una direzione sostenibile e ad una gestione prudente delle risorse naturali. In particolare, è stata valutata la produzione di biodiesel da microalghe e la valorizzazione di altri prodotti a valore aggiunto. La valutazione è stata effettuata considerando diversi scenari di input di nutrienti: nessun input di nutrienti (scenario 1), acque reflue di acquacoltura come input di nutrienti (scenario 2) e input di fertilizzanti (scenario 3). Utilizzando le acque reflue per la coltivazione di alghe e la transesterificazione tramite biocatalizzatore sono state osservate riduzioni significative degli impatti ambientali e dell'impronta di GHG. Si è valutata poi, per i diversi scenari, l'emissione di gas a effetto serra (come emissioni di CO_2 equivalente in kg) risultata pari a $0,85\text{-}1,46 \text{ kgCO}_2\text{eq.kg}^{-1}$ di biodiesel (Saranya & Ramachandra, 2020).

Le microalghe contengono un ampio range di composti di alta qualità come carboidrati, lipidi, proteine, vitamine, antiossidanti e minerali, tali da poter essere introdotti all'interno della *dieta sia di pesci che di animali domestici o da fattoria* (Siddiki et al., 2022; Spolaore et al., 2006): infatti alcune specie in commercio come *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Dunaliella* e *Spirulina* hanno un contenuto proteico che si aggira tra 50-65% (F. Chen et al., 2021). Si stima, infatti, che circa il 30% della produzione microalgale viene venduta come cibo per animali (Safi et al., 2014; Spolaore et al., 2006). L'introduzione delle microalghe nel cibo degli animali acquatici può essere effettuato

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

miscelando a quello tradizionale (F. Chen et al., 2021). Nello studio di Camacho-Rodriguez et al., 2018 le microalghe vengono inserite nella dieta dei pesci con un rapporto di 150 g/kg. Tuttavia il contenuto di microalghe nella dieta dei pesci dipende dalla specie ittica, dalla specie microalgale e altri fattori (F. Chen et al., 2021). Oltre a costituire un alimento alternativo per gli animali, le microalghe possono entrare a far parte della dieta dell'essere umano. Spirulina, Chlorella e Dunaliella sono alcune delle microalghe più comuni usate come additivi in cibi popolari come pasta, biscotti, gelato, pane etc. al fine di incrementarne il valore nutritivo e la qualità (Siddiki et al., 2022). Spesso vengono vendute in forma di tavolette, capsule e liquidi (Spolaore et al., 2006). Gli utilizzi delle microalghe sono davvero tanti e investono numerosi campi: l'*agricoltura*, in quanto possono essere utilizzate come un'opzione eco-compatibile rispetto ai fertilizzanti; la *medicina*, in quanto risultano incorporate in diversi prodotti medici come anticancerogeni, antivirali, antibatterici, antifungini, prodotti cardiovascolari, antiinfiammatori etc.; la *cosmesi*, in quanto adoperate per la produzione di prodotti per la cura personale; infine, usate anche come fonte di *pigmenti* per produrre coloranti alimentari sostenibili. (Siddiki et al., 2022)

4.4 UTILIZZO DELLE MICROALGHE NELL'ACQUACOLTURA

Le microalghe fotosintetiche sono piante unicellulari, molte delle quali sono ricche di proteine, lipidi e bioattivi e costituiscono una parte importante della base della catena alimentare acquatica naturale. Si prevede che la crescita della popolazione, la domanda di proteine di alta qualità e l'esaurimento delle scorte di pesce selvatico aumenteranno la domanda di pesce di acquacoltura del 37% tra il 2016 e il 2030. Per questo motivo è importante valutare fonti proteiche alternative. In questo contesto, le microalghe potranno essere utilizzate negli integratori alimentari e per la produzione di terapeutici ricombinanti; si è infatti visto che queste siano in grado di offrire opportunità significative per migliorare la salute degli animali, la resistenza alle malattie e la produttività dei raccolti (Yarnold et al., 2019).

Le microalghe possono essere utilizzate per l'alimentazione animale, (ruminanti, suini, pollame e conigli) e per le specie di acquacoltura, ci

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

soffermeremo in particolare su queste ultime. Le microalghe sono classificate in quattro gruppi principali: diatomee (*Bacillariophyceae*), alghe verdi (*Chlorophyceae*), dorate (*Chrysophyceae*) e blu-verdi (*Cyanophyceae*). Le microalghe sono composte principalmente da proteine, carboidrati, lipidi, vitamine, minerali e composti bioattivi, come i carotenoidi. Esse hanno una composizione nutritiva variabile, a seconda di diversi fattori: la specie, le condizioni di produzione (ad es. la disponibilità di nutrienti), l'utilizzo degli enzimi e lo stato della biomassa (farina di alghe intere o sgrassate).

Finora esperimenti di ricerca hanno dimostrato che le microalghe potrebbero sostituire con successo la farina di pesce e l'olio di pesce nelle diete per pesci migliorandone la crescita, la qualità, l'attività di difesa, la pigmentazione, lo stato di salute e conferendo protezione ai tessuti ed effetti antiossidanti (Valente et al., 2021).



Figura 4-9 Microalghe essiccate (Fonte: www.ruminantia.it)

È necessario progettare nuovi mangimi con maggior apporto di nutrienti da risorse alimentari sostenibili, possibilmente più marginali o meno contese rispetto alla catena alimentare umana. Inoltre, per evitare di avere spese aggiuntive legate all'acquisto di mangime per pesci, ovvero di farina di pesce, sempre più studiosi stanno valutando l'opportunità di utilizzare fonti di mangime alternative:

- Sottoprodotti avicoli;
- Biomassa algale;
- Farine da insetti
- Farine da crostacei

Le farine ottenute da sottoprodotti avicoli risultano delle eccellenti fonti di nutrienti a costo contenuto, inoltre possono coprire il 60% delle

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

proteine dei mangimi per acquacoltura, anche se è necessario valutarne la qualità nutrizionale e la sicurezza alimentare.

Le farine ottenute da insetti presentano un grosso potenziali e buona fonte di nutrienti, inoltre sono sostenibili e poco utilizzate nell'industria alimentare umana. In questo caso però può risultare scarsa o incerta la produzione e la disponibilità di mercato e le informazioni sulla qualità.

La farina da crostacei è un nuovo ingrediente ricco di minerali e carotenoidi, ma anche in questo caso potrebbero esserci problemi legati alla contaminazione e alla sicurezza alimentare.

Per quanto riguarda poi le biomasse microalgali, che saranno trattate nello specifico, si vedrà come abbiano notevoli potenzialità dal punto di vista nutritivo, in termini di fonti proteiche e lipidi ed ecosostenibilità.

In particolare, in molti studi sono state valutate le prestazioni della alga *Chlorella*. La *Chlorella* è stata essiccata ed utilizzata per alimentare la carpa comune giovanile di acqua dolce (*Cyprinus carpio* var. Koi) in una prova di alimentazione di 60 giorni in cui sono stati valutati il tasso di sopravvivenza e il tasso di crescita (Yadav et al., 2020). Le microalghe sono state coltivate in fotobioreattori a colonne a bolle d'aria e gas di combustione e hanno comportato una buona riduzione dell'anidride carbonica. La biomassa microalgale è stata poi immessa con un dosaggio del 15% (w/w) per formulare due diete iso-azotate (358 g di proteine kg⁻¹) e isocaloriche (19.23 MJkg⁻¹) in sostituzione della farina di pesce. Questo studio ha dimostrato come i mangimi derivati dalle alghe contengono macronutrienti essenziali per la nutrizione e la sopravvivenza dei pesci carpa. La valutazione delle prestazioni delle diete formulate rispetto al mangime di controllo (CF) ha mostrato un miglioramento significativo nell'aumento di peso (fino al 55%), un rapporto di conversione del mangime basso (2.17) e un buon rapporto di efficienza proteica (3.3). Le stime dei costi hanno mostrato una marcata riduzione (26.10%) del costo dei mangimi formulati rispetto ai mangimi commerciali convenzionali che possono influire in modo significativo sul margine di profitto degli allevatori di pesce. Inoltre, i cambiamenti isto-architettonici nelle sezioni intestinali dei pesci hanno confermato l'idoneità delle diete a base di alghe. Con questi risultati c'è quindi la possibilità di valutare anche le nuove possibilità della coltivazione di microalghe per l'industria dell'acquacoltura.

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

In un altro studio nel Qatar è stato coltivato il *Nannochloropsis*, un ceppo microalgale, per l'alimentazione di pesci rossi. In particolare, questo tipo di microalga locale può crescere anche in condizioni di salinità elevata e non richiede silice e vitamine. In questo modo è stato possibile produrre una grossa quantità di alghe nonostante le elevate perdite di acqua per evaporazione, che sono state bilanciate aggiungendo sola acqua di mare. Si è ottenuta così una produttività media di biomassa di 20,37 g/m²/d e la coltura non è stata contaminata da microalghe tossiche. L'utilizzo di tali microalghe come mangime per i pesci rossi non ha comportato la morte delle specie durante le tre settimane di esperimento e tutti i pesci hanno mantenuto il loro tipico colore rosso. Inoltre, si sono avuti tassi di variazione della lunghezza e tassi di aumento del peso dei pesci rossi simili sia per i mangimi formulati che per i mangimi commerciali (Das et al., 2015).

In un altro studio molto recente si è valutata l'influenza dell'inclusione delle microalghe nel mangime per pesci sulla qualità fisica del pellet (Alcaraz et al., 2021). Si è prodotto quindi un pellet arricchito con microalghe che è stato utilizzato per un allevamento di orate (*Sparus aurata* L.). Al fine di studiare l'effetto dell'aggiunta di microalghe sulle proprietà fisiche dei pellet, sono state studiate 15 miscele includenti tre diverse specie di microalghe (*Nannochloropsis gaditana*, *Tetraselmis chuii* e *Chlorella vulgaris*) a cinque diversi livelli di inclusione (0, 2.5, 5, 10 e 15%). Si è dimostrato che le proprietà fisiche dei pellet siano influenzate dal tipo e dalla quantità di microalghe utilizzate portando ad una modificazione positiva della qualità fisica del mangime in termini di aumento della durezza, aumento della durata e riduzione della fuoriuscita di grasso.

Anche altri studi hanno dimostrato come le microalghe ad alto contenuto di lipidi (HL) abbiano il potenziale per essere utilizzate come fonte alternativa e sostenibile di acidi grassi polinsaturi (n-3 LC-PUFA) nei mangimi per acquacoltura senza compromettere le caratteristiche fisiche del pellet (Samuelsen et al., 2018). Anche in questo caso sono state eseguite miscele con diverso contenuto di microalghe HL essiccate (si è utilizzata la microalga *Schizochytrium*) oltre che glutine di frumento vitale e concentrato di proteine di soia.

Le microalghe possono essere utilizzate anche per l'allevamento di molluschi. La *Mulinia lateralis*, una vongola nana è stata studiata in termini di densità di allevamento, di tasso di crescita, di capacità di sopravvivenza

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

e di capacità di metamorfosi delle larve per ottimizzare il suo sistema di coltura (Z. Yang et al., 2021). Un sistema di coltura efficiente consente di ottenere abbastanza larve di alta qualità per la ricerca genetica. A questo scopo, sono stati studiati gli impatti della dieta microalgale e sono state testate sette microalghe, tra cui *Isochrysis galbana* (IG), *Chlorella pyrenoidosa* (CP), *Nitzschia closterium* (NC), *Platymonas helgolandica* (PH), *Chaetoceros muelleri* (CM) e *Pyramimonas delicatula* (PD), che sono state ingerite dalle larve di età compresa tra 2 e 10 giorni.

Anche in Thailandia è stato valutato il tasso di crescita e quello di sopravvivenza di un altro mollusco, *pinna bicolor*. Questi molluschi sono stati alimentati con mangimi commerciali miscelati con alghe in tre diverse proporzioni, in condizioni indoor. I *pinna bicolor* sono stati prelevati nella provincia di Chonburi e sono stati acclimatati in uno stagno di cemento per 10 giorni con acqua di mare. Dopo l'acclimatazione, i molluschi sono stati divisi in tre gruppi e sottoposti a tre diverse alimentazioni. In particolare, tutti e tre i gruppi sono stati nutriti con la stessa specie di microalghe, *Isochrysis sp.* e *Tetraselmis sp.*, e con lo stesso tipo di mangime commerciale, ma in percentuali differenti. Alla fine dell'esperimento, della durata di tre mesi, tutti i trattamenti hanno avuto tassi di sopravvivenza del 100%, buoni tassi di crescita e non hanno mostrato differenze in lunghezza e larghezza, ma solo in termini di peso dimostrando la possibilità di allevare tali molluschi in condizioni indoor (Seatung, 2018).

Per produrre le microalghe, si può anche pensare di utilizzare macroalghe come substrato per far crescere specie di microalghe eterotrofiche e poi utilizzarle come integratori alimentari per pesci. In uno studio presente in letteratura, è stata esaminata l'idrolisi della macroalga *Laminaria digitata* e la sua liberazione di zuccheri. L'idrolizzato è stato utilizzato come terreno di coltura e fonte di nutrienti per far crescere eterotroficamente tre diverse specie di microalghe, ovvero *Chlorella protothecoides*, *Chlorella vulgaris* e *Chlorella sorokiniana*, che sono considerate preziose fonti di proteine. La *Chlorella protothecoides* ha presentato il tasso di crescita più alto, ed ha mostrato un contenuto proteico e una composizione degli amminoacidi soddisfacente. Infatti, il contenuto di amminoacidi essenziali alla fine dell'esperimento è stato 6 volte maggiore rispetto al contenuto originale dell'idrolizzato di macroalghe che era stato utilizzato come substrato per la coltivazione di microalghe (D'Este et al., 2017).

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

Le microalghe però, possono essere coltivate anche in fotobioreattori, però non tutti i fotobioreattori sono adatti per l'acquacoltura. In un recente studio di letteratura è stato quindi progettato e collaudato un fotobioreattore marino (PBR) da 1650 litri, per produrre mangime per ostriche. L'esperimento è stato condotto in condizioni di coltura controllate, utilizzando la luce per promuovere la fotosintesi. Questo PBR è stato testato per la crescita di una coltura di *Tetraselmis* e sono stati monitorati la densità delle cellule di coltura, la temperatura e il pH arrivando a sostenere una coltura di 250000 cellule/ml (Caron, 2017).

Sempre utilizzando un fotobioreattore a doppia colonna (PBR) è stata realizzata la coltivazione della microalga *Rhodomonas salina* per utilizzarla come mangime vivo per copepodi, piccoli crostacei. Questa microalga ha presentato una densità cellulare relativamente stabile nella fase di crescita continua e un alto contenuto sia di acidi grassi totali che di amminoacidi liberi. Queste caratteristiche, hanno reso la *Rhodomonas* particolarmente adatta come mangime per i copepodi. Con questo PBR è stato possibile alimentare una coltura del copepode *Calanoide Acartia Tonsa* ad una densità di 2.500 adulti / L con una resa giornaliera di circa 17×10^6 uova. Lo studio infine suggerisce anche il volume delle colture di alghe per poter sostenere la produzione integrata di copepodi, che risulta essere circa il 1,3 g del volume di coltura di copepodi (Vu et al., 2018).



Figura 4-10 Produzione di microalghe in PBR (Fonte: it.wikipedia.org)

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

Da un lato, le microalghe potrebbero supportare un'industria dell'acquacoltura sostenibile con la produzione di mangimi alternativi, dall'altro lato, essendo essa una dei maggiori consumatori di acqua (insieme all'agricoltura) e una fonte significativa di emissioni di gas a effetto serra (GHG), si ha anche la necessità di sviluppare un'acquacoltura a basse emissioni di gas serra e a basso consumo idrico. In particolare, a seconda del tipo di piantagione, del clima, dell'impianto e degli input dei fattori di produzione (ad esempio i fertilizzanti) varieranno i consumi idrici e le emissioni di GHG (Tang et al., 2021b).

Una recente evoluzione di questi sistemi è stata ottenuta incorporando la tecnologia a membrana all'interno dei fotobioreattori, ottenendo così i cosiddetti *fotobioreattori a membrana* (MPBRs) (Luo et al., 2017).

Un tipico fotobioreattore a membrana (MPBR) è un sistema che opera in continuo e combina la tecnologia di un PBR chiuso (a pannello o a colonna airlift) con un processo di filtrazione a membrana sommersa o a flusso laterale, impiegando membrane a micro o ultra-filtrazione, in qualità di separatori solido-liquido (F. Gao et al., 2019; Honda et al., 2012; Luo et al., 2017; Nguyen et al., 2021). Rispetto ai convenzionali PBRs, i sistemi MPBRs operano garantendo una migliore accessibilità alla luce, grazie al loro alto rapporto area-volume, e offrono condizioni favorevoli per la crescita algale come miscelazione, facile accesso alle sorgenti carboniose e degasaggio effettuato mediante bassi stress idrodinamici, riducendo anche i costi di realizzazione e gestione (Luo et al., 2017).

L'accoppiamento della membrana al PBR viene effettuato per due scopi principali: aumentare il trasferimento di CO₂ e mantenere la biomassa nel reattore (Bilad et al., 2014). Il primo si ottiene poiché all'interno del sistema si crea una simbiosi tra batteri e alghe: la presenza della membrana, infatti, favorisce lo sviluppo di un biofilm ricco di batteri che, nel convertire l'ammonio in nitrati, producono CO₂ usata dalle microalghe durante la fotosintesi, le quali in cambio producono ossigeno usato dai batteri nelle loro attività metaboliche (M. Zhang et al., 2020). Allo stesso tempo, però, può generarsi una competizione tra microalghe e batteri nitrificanti per l'assorbimento dell'ammonio (González-Camejo et al., 2020): infatti, il tasso di assorbimento dell'ammonio nelle microalghe può essere fino a 15 volte maggiore rispetto a quello dei nitriti e dei nitrati (González-Camejo et al., 2019). Il tasso di fissazione della CO₂ in un fotobioreattore a membrana può essere fino a 6,4 volte maggiore rispetto

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

ai PBRs convenzionali (L. Fan et al., 2007), anche se, insieme alla produttività della biomassa, risulta essere dipendente dalla concentrazione dei nutrienti alimentati al reattore (Honda et al., 2012). Negli MPBRs la membrana fornisce una completa ritenzione delle cellule microalgali e il liquido che la attraversa, contenente la restante concentrazione di nutrienti, viene definito *permeato*: in tal modo si previene il fenomeno del dilavamento, dovuto all'ingresso del liquido di alimentazione, e si incrementa la concentrazione di biomassa nel bioreattore (Bilad et al., 2014; Discart et al., 2014; Luo et al., 2017). Quando la membrana è esterna al fotobioreattore, si può controllare la concentrazione della biomassa anche prevedendo un periodico ritorno del *ritentato* nell'MPBR (Bilad et al., 2014; Discart et al., 2014).

Il successo di un sistema MPBR, dunque, consiste nella regolazione del tempo di ritenzione idraulica (HRT), legato al controllo dei nutrienti, e del tempo di ritenzione della biomassa (BRT), legato alla produzione della biomassa, i quali, proprio in virtù della presenza della membrana, risultano essere disaccoppiati (González-Camejo et al., 2020; Luo et al., 2017; Nguyen et al., 2021). Tipicamente si consiglia di operare a bassi valori di HRT in maniera che le microalghe possano assorbire il maggior quantitativo di nutrienti, limitando perdite nell'effluente che potrebbero comportare uno sfioramento dei limiti normativi (González-Camejo et al., 2020). La scelta dell'HRT per un MPBR dipende da molti fattori quali, caratteristiche del refluo, obiettivi di trattamento e condizioni climatiche: tipicamente varia da un minimo di 6 ore ad un massimo di 5 giorni (Luo et al., 2017). Disaccoppiando l'HRT e il BRT, molti studi confermano che la produttività microalgale nei MPBRs può essere da 3,5 fino a 9 volte superiore rispetto ai PBRs convenzionali (Bilad et al., 2014; F. Gao et al., 2014; Marbelia et al., 2014) e che il tasso di rimozione dei nutrienti può essere 7 volte superiore per N e 5,4 volte superiore per P rispetto ai PBRs convenzionali (F. Gao et al., 2014).

Come in tutti i sistemi con membrana, gli MPBRs sono soggetti al fenomeno del fouling dovuto alla deposizione di massa algale, sostanza organica compresa sia quella prodotta dalle alghe che dai batteri (sostanza organica algale (AOM), prodotti microbici solubili (SMP) o particelle esopolimeriche trasparenti (TEP)) e accumuli di sostanza inorganica sulla superficie e all'interno dei pori della membrana (Luo et al., 2017).

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

4.5 COMBINAZIOTE TRA FOTOBIOREATTORI MICROALGALI E SISTEMI IDROPONICI

Negli ultimi anni si è incrementata la coltivazione delle alghe a scopo commerciale e, data l'elevata richiesta di nutrienti per la loro produzione, potrebbero costituire un'alternativa per il trattamento delle acque di coltivazione idroponica quando il ricircolo interno non si può realizzare (Hultberg et al., 2013). sistemi ebb and flow e sistemi statici aerati. Tali sistemi, però, presentano costi non trascurabili relativi, ad esempio, alle pompe e ai tubi (J. Zhang et al., 2017). In condizioni standard le microalghe nascono spontaneamente in un sistema idroponico e da lungo tempo vengono considerate un problema da risolvere, poiché generano competizione per i nutrienti, intasamento e incremento del carico di carbonio organico (J. Zhang et al., 2017). Allo stesso tempo, però, la fotosintesi algale fornisce O₂ alle radici delle piante, utile alla loro crescita (J. Zhang et al., 2017), le quali con la loro respirazione costituiscono una fonte di carbonio per incrementare la biomassa microalgale (Barone et al., 2019).

Pertanto, per evitare il rilascio di reflui idroponici ricchi di nutrienti inutilizzati nei corpi idrici, è possibile valutarne il trattamento mediante coltivazione microalgale (Supraja et al., 2020). Ciò può essere realizzato in maniera separata o in co-coltivazione.

Bertoldi et al., 2006 hanno valutato la produzione di lipidi, acidi grassi e carotenoidi prodotti dalla microalga *Chlorella vulgaris* coltivata in un refluo idroponico con diverse diluizioni. L'esperimento è stato condotto in modalità separata e i risultati hanno mostrato l'efficacia di utilizzare il refluo idroponico come mezzo di coltivazione alternativo di *Chlorella vulgaris*.

Hultberg et al., 2013 hanno valutato la crescita della biomassa e la rimozione di nutrienti, sempre in modalità separata, da parte sia di *Chlorella vulgaris* che di specie microalgali indigene all'interno di un refluo di coltivazione idroponica. L'esperimento è stato condotto all'interno di una serra con un fotoperiodo di 8-16 h, un'intensità luminosa di 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ e una temperatura di 20 °C, alimentando due volumi di 200 ml con due diverse soluzioni, una artificiale e una prelevata da una coltivazione sotto serra di pomodori. I risultati hanno mostrato che

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

entrambe le soluzioni sono in grado di supportare la crescita della biomassa microalgale, mentre l'abbattimento di azoto si attesta intorno al 41,2% per la soluzione standard e al 10,7% per la soluzione artificiale e quella di fosforo intorno al 76,6% per la soluzione standard e all'82,6% per la soluzione artificiale.

J. Zhang et al., 2017 hanno, invece, sperimentato una nuova strategia che prevede un'associazione simbiotica tra microalga e piantine. Tale metodo ha consentito la co-coltivazione di microalghe e piantine in un sistema eco-idroponico (EHS), adoperando *Chlorella infusionum* e piantine di pomodoro. Sono stati realizzati e messi a confronto quattro diversi trattamenti: coltura eco-idroponica (EHC), monocoltura algale, monocoltura delle piantine senza aerazione e con aerazione, in condizioni controllate di intensità luminosa, fotoperiodo, temperatura e umidità. Il sistema EHC include un contenitore trasparente, soluzione nutritiva inoculata di alghe e materiale di sostegno per la piantina. La soluzione nutritiva è del tipo Hoagland modificata con specifiche caratteristiche riportate nello studio. I risultati hanno concluso che la produttività della biomassa algale e delle piantine nel sistema EHC è risultata maggiore rispetto alla monocoltura algale e rispetto alla monocoltura delle piantine con e senza aerazione. Questo migliore risultato è attribuito all'aerazione fornita dalla fotosintesi algale e dal rifornimento di CO₂ generato dalla respirazione delle radici delle piantine all'interno dell'EHS. Nello specifico, le efficienze di utilizzo di azoto e fosforo sono alte a causa del co-utilizzo dei nutrienti da parte sia delle microalghe che delle piantine. Una coltivazione idroponica richiede l'aerazione delle radici per la crescita ottimale delle piantine e comunemente questa viene realizzata attraverso la tecnica del film di nutrienti (NFT), sistemi aeroponici. Sulla base dei risultati ottenuti da J. Zhang et al., 2017, sono stati realizzati una serie di studi simili che hanno previsto: la co-coltivazione delle microalghe *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus quadricauda* con le piantine di pomodoro in una soluzione nutritiva Hoagland nella quale sono stati aggiunti biostimolanti naturali ottenuti mediante estrazione alcalina da un digestato di residui agro-zootecnici (Barone et al., 2019); la co-coltivazione di *Chlorella vulgaris* e i suoi effetti sulla crescita di tre specie vegetali (rucola, cavolo rapa viola e lattuga) all'interno di un refluo sintetico ricco di nutrienti (Huo et al., 2020); la co-coltivazione di microalghe inoculate a diverse concentrazioni variabili tra 0,2-0,8 mg/ml, come miscuglio di *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Synechocystis sp.* e *Spirulina sp.*, e piantine di pomodoro all'interno di una

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

soluzione Hoagland modificata uguale a quella usata da J. Zhang et al., 2017 (Supraja et al., 2020).

Salazar et al., 2021 hanno investigato la possibilità di ricircolare gli effluenti idroponici provenienti da una coltivazione commerciale sotto serra di cetrioli per la coltivazione di biomassa microalgale. La procedura a step, inizialmente realizzata in laboratorio, ha previsto una successiva applicazione a scala pilota con un PBR tubolare posto all'interno della serra. È stata scelta la microalga della famiglia *Scenedesmaceae* coltivata per 36 giorni. La coltivazione in continuo è stata effettuata sotto quattro diverse condizioni e le efficienze di rimozione hanno raggiunto valori compresi tra 18-35% per N-NO₃⁻ e 40-98% per P-PO₄³⁻.

4.6 UTILIZZO DELLE MICROALGHE NELL'ACQUAPONICA

Si è visto come l'acquaponica sia un sistema di innovazione tecnologica emergente che prevede l'integrazione dell'acquacoltura con l'idroponica per lo sviluppo sostenibile. In un tale sistema integrato, i rifiuti secreti dagli animali acquatici vengono assimilati dalle piante, la cui crescita consuma alcuni nutrienti essenziali, e l'acqua trattata dalle piante viene riciclata per l'acquacoltura. Per quanto riguarda i principi tecnologici, l'acquaponica si basa sul riciclo dei nutrienti dalle escrezioni dei pesci per la crescita delle piante e sulla contemporanea rigenerazione dell'acqua pulita per l'allevamento dei pesci, creando un vantaggio reciproco. Innegabilmente, questa tecnologia emergente potrebbe alleviare alcuni problemi dell'acquacoltura tradizionale e ridurre i costi di produzione degli animali acquatici. Alcuni autori, però, hanno proposto un nuovo concetto di "Algacquacoltura", che potrebbe essere una nuova tendenza di sviluppo dell'acquacoltura nel prossimo futuro (L. Yang et al., 2020).

Il sistema acquaponico presenta alcuni problemi associati al recupero dei nutrienti e al consumo di energia. Il tasso di assorbimento dell'azoto e la capacità delle verdure o di altre piante a foglia può essere molto basso (Nhan et al., 2019). In secondo luogo, nel sistema acquaponico non viene risolto il problema dell'esaurimento dell'ossigeno, causato dalla respirazione degli animali acquatici. La maggior parte dei sistemi

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

acquaponici, infatti, ha migliorato il contenuto di ossigeno disciolto (DO) in acquacoltura mediante pompe di aerazione, che hanno un elevato consumo di energia e costi operativi. Inoltre, l'acquacoltura si basa ancora sui mangimi tradizionali, che rappresentano gran parte del costo totale dell'allevamento degli animali acquatici. Oltre al costo elevato, l'eccessiva aggiunta di antibiotici o medicinali nei mangimi tradizionali dell'acquacoltura è un altro problema affrontato dall'industria dell'acquaponica. Infine, la performance economica dell'acquaponica è messa in dubbio poiché a volte si verificano fluttuazioni della domanda di mercato e in molti paesi i valori economici della maggior parte delle verdure non sono elevati.

Allo scopo di risolvere tali problemi, è stato proposto questo nuovo concetto di "Algacquacoltura", che si riferisce a un'integrazione della coltura delle alghe con l'acquacoltura. Il sistema idroponico dell'acquaponica è sostituito dal sistema di coltura delle alghe, in cui le alghe, invece delle piante, convertono i nutrienti negli effluenti dell'acquacoltura in biomassa. In questo sistema le cellule di alghe fresche, che fissano continuamente l'anidride carbonica e forniscono ossigeno mediante la fotosintesi, agendo come una bio-pompa di aerazione, vengono aggiunte al sistema di acquacoltura. Allo stesso tempo, le alghe possono assorbire in modo efficiente i nutrienti dal flusso idrico, migliorando la capacità di autodepurazione del sistema di acquacoltura e producendo biomassa.

Mentre l'effluente dell'acquacoltura scorre attraverso il sistema di coltura delle alghe, i nutrienti nell'effluente potrebbero essere assimilati dalle cellule algali, producendo biomassa ricca di proteine, acidi grassi polinsaturi, polisaccaridi e pigmenti naturali.

La biomassa algale raccolta potrebbe essere aggiunta al sistema di acquacoltura per sostituire parzialmente i mangimi tradizionali. Di conseguenza, i flussi di acqua e sostanze nutritive potrebbero formare cicli chiusi nell'acquacoltura di alghe. Questa potrebbe migliorare l'immunità degli animali acquatici e vietare l'uso eccessivo di antibiotici o medicinali in acquacoltura. Inoltre, potrebbe essere utilizzata come materie prime nelle industrie per produrre prodotti a valore aggiunto, come integratori proteici, mangimi per animali, olio commestibile ricco di acidi grassi e pigmenti di qualità alimentare.

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

In uno studio recente si è valutata la possibilità di sfruttare la microalghe ed implementarle in un sistema di acquacoltura a ricircolo (RAS). In questo caso lo scopo principale è stato quello di ridurre la produzione di acque reflue. In particolare, è stata utilizzata una co-coltivazione di due specie di microalghe, *Chlorella vulgaris* e *Tetrademus obliquus*, per ottenere una coltura più forte ed è stata testata utilizzando acqua RAS sia su scala di laboratorio che su scala pilota in un fotobioreattore a strato sottile aperto. In entrambi i casi, la crescita è avanzata con successo e non sono stati osservati arresti anomali. La coltivazione su scala pilota ha avuto un'alta produttività e ha dimostrato la sua idoneità per il trattamento dell'acqua RAS (Tejido-Nuñez et al., 2020).

Sempre coltivando microalghe in un fotobioreattore, considerando che l'acqua proveniente dai sistemi di acquacoltura a ricircolo (RAS) sia un mezzo di crescita adatto per la coltivazione delle microalghe, e che le microalghe, a loro volta, possano essere utilizzate per migliorare la qualità dei reflui dei RAS, si è valutata l'area minima necessaria del fotobioreattore per ottenere una depurazione dei reflui RAS (Egloff et al., 2018). Tuttavia, sebbene sia possibile un trattamento efficiente delle acque reflue, il contenuto di nutrienti dell'acqua RAS limita le densità di biomassa di microalghe ottenibili. Questo studio ha dimostrato che le microalghe possano essere coltivate con successo per un massimo di tre settimane in acqua RAS senza nutrienti aggiuntivi e che sia possibile ottenere densità di biomassa elevate. Inoltre, poiché sia l'evaporazione dell'acqua sia la crescita delle microalghe nel fotobioreattore sono correlati positivamente tra loro a causa della loro dipendenza condivisa dalla radiazione solare, la fornitura di nutrienti si adatta continuamente ai cambiamenti della domanda. Si è così stimato che l'area di un fotobioreattore necessaria per trattare tutte le emissioni di un RAS richieda circa 6,5 volte l'area di quest'ultimo.

È poi fondamentale valutare l'influenza degli ormoni steroidei dei pesci sulla fisiologia delle alghe (*Scenedesmus quadricauda*) per poter capire se utilizzare le acque reflue della pesca per la produzione di biomasse di microalghe (Kozlova et al., 2020). Nello studio appena citato, la biomassa microalgale è stata sottoposta a due steroidi comunemente presenti negli effluenti degli allevamenti ittici. Questi ormoni hanno mostrato effetti stimolatori sulla crescita delle cellule di *S. quadricauda* e sull'accumulo di clorofilla-a, carotenoidi totali e lipidi. Lo scopo è stato quello di valutare la possibilità di integrare la piscicoltura in acqua fredda con la produzione

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

di alghe per massimizzare il riciclaggio dei nutrienti nelle acque reflue dell'acquacoltura, e i risultati suggeriscono che le nano concentrazioni di ormoni sessuali dei pesci nelle acque reflue dell'acquacoltura potrebbero essere effettivamente utilizzate per migliorare sia la produzione di biomassa di alghe che la sintesi di molecole ad alto peso molecolare come lipidi, carboidrati, proteine.

Diversi studi hanno valutato anche l'utilizzo di acque reflue diverse da quelle di acquacoltura. In particolare, le acque reflue di suini risultano particolarmente adatte per la coltivazione di microalghe poiché il contenuto di azoto totale, fosforo totale, ammoniaca e domanda di ossigeno chimico (COD) sono notevolmente superiori rispetto a quelli contenuti nelle acque reflue dell'acquacoltura (Chiu et al., 2015). Nonostante ciò, la coltivazione di microalghe utilizzando reflui di acquacoltura consente di sostituire le grandi quantità di acqua dolce usata convenzionalmente, consentendo così il riutilizzo delle risorse idriche. Inoltre, come visto nel paragrafo precedente, con questo tipo di reflui la biomassa microalgale può essere utilizzata come mangime per l'acquacoltura o come additivo per mangimi, con una buona biosicurezza.

Gli elementi degli effluenti dell'acquacoltura che possono servire come nutrienti per la coltura microalgale sono riportati in Tabella (Guo et al., 2013).

Tabella 4-2 Nutrienti in effluente di acquacoltura (Fonte: Guo et. al, 2013)

Nutrienti	Concentrazione (mg/L)
NH ₄ ⁺ -N	0,12-14,7
NO ₂ ⁻ -N	0,02-1,5
NO ₃ ⁻ -N	0,01-5,3
PO ₄ ³⁻ - P	3,1-17,7

Inoltre, le acque reflue dell'acquacoltura contengono relativamente pochi microrganismi patogeni e basse quantità di metalli pesanti, pertanto, questi reflui sono adatti per sostituire l'acqua dolce nella coltivazione di microalghe (Kuo et al., 2016).

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

In letteratura è stata valutata la performance di crescita della microalga *Chlorella sp. GD* in reflui di acquacoltura ai quali sono stati aggiunti nutrienti e anidride carbonica proveniente da gas di combustione di caldaie. È stata valutata sia la crescita della microalga sia la fissazione della CO₂ da parte della *Chlorella sp. GD*. È stata scelta questa microalga perché presenta una rapida crescita ed è stata coltivata in un mezzo costituito da agar solido, preparato aggiungendo l'1,5% (w/v) di agar in acqua dolce. Le colture sono state mantenute ad una temperatura di 26 ± 1 °C, un pH pari a 6 e un'intensità della luce di circa 100 μmol m²s⁻¹. I nutrienti aggiunti, sono riportati in tabella.

Tabella 4-3 Nutrienti addizionali per coltivazione di microalghe in reflui di acquacoltura (Fonte: Kuo et al, 2015)

Nutrienti	Concentrazione
KNO ₃	1,25 g/L
KH ₂ PO ₄	1,25 g/L
MgSO ₄ · 7H ₂ O	1 g/L
CaCl ₂ · 2H ₂ O	83,5 mg/L
H ₃ BO ₃	0,1142 g/L
FeSO ₄ · 7H ₂ O	49,8 mg/L
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	88,2 mg/L
MnCl ₂ · 4H ₂ O	14,4 mg/L
CuSO ₄	10 mg/L
Na ₂ MoO ₄	7,1 mg
CoCl ₂ · 6H ₂ O	4 mg/L

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

Le cellule microalgali sono state coltivate in fotobioreattori a colonna fabbricati in vetro (ϕ 6 cm \times 80 cm di altezza) da 1L, che sono stati incubati a 26 ± 1 °C con intensità di luce di circa $300 \mu\text{mol m}^2\text{s}^{-1}$ fornita da una luce fluorescente bianca fredda continua. Il gas contenente CO_2 è stato premiscelato con aria e alimentato dal fondo del fotobioreattore con una velocità di aerazione di 0,05-0,3 vvm. La concentrazione iniziale di biomassa era circa $0,3 \text{ g L}^{-1}$, ed è stata poi monitorata ad intervalli di 24 ore. L'efficienza di fissazione della CO_2 è stata determinata dalla differenza nella concentrazione di CO_2 tra l'ingresso e l'uscita dei fotobioreattori utilizzati per le colture di microalghe.

È stata eseguita anche l'estrazione dei lipidi seguendo una metodica sviluppata dagli stessi autori (Kuo et al., 2015). La biomassa microalgale essiccata, 200 mg, è stata miscelata con una soluzione di metanolo/cloroformio (1/2, v/v) e sonicata per 1 ora. Successivamente, è stata aggiunta una soluzione di NaCl allo 0,9% per dare alla miscela un rapporto 2:2:1 di metanolo, cloroformio e acqua. Dopo la centrifugazione, la fase cloroformica è stata raccolta e lasciata evaporare. La soluzione rimanente è può essere definita come un lipide. I metodi utilizzati per la transesterificazione e il test del profilo degli acidi grassi dei lipidi microalgali sono stati basati sulle procedure riportate in studi precedenti (Kao et al., 2014). La composizione degli acidi grassi è stata determinata utilizzando un gascromatografo.

In queste condizioni, la produttività della biomassa e l'efficienza di fissazione della CO_2 sono risultate rispettivamente di $1,296 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ e $2,333 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Quindi la produttività della biomassa e l'efficienza di fissazione della CO_2 della microalga *Chlorella sp. GD* è migliore se coltivata in acque reflue dell'acquacoltura con aggiunta di sostanze nutritive ed aerazione con gas di combustione (Kuo et al., 2016).

Fondamentalmente, le microalghe offrono soluzioni innovative per uno sviluppo economico e sostenibile dal punto di vista ambientale in linea con gli obiettivi di sostenibilità delle Nazioni Unite.

Finora sono state evidenziate le potenzialità dei sistemi acquaponici, ovvero sistemi capaci di ridurre o eliminare completamente le acque reflue prodotte dai sistemi di acquacoltura, trattandole mediante la coltivazione idroponica di organismi vegetali, come piante commestibili e ornamentali. Sono state, inoltre, analizzate le potenzialità della coltivazione di alghe e/o

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

microalghe, le quali, mediante la fotosintesi, sono in grado di catturare CO₂, nutrienti e produrre ossigeno e biomassa.

Dinanzi a questi aspetti risulta importante capire se e come sia possibile migliorare un sistema acquaponico. Un sistema acquaponico convenzionale è caratterizzato da tre problematiche principali: basso tasso di assorbimenti dell'azoto da parte degli organismi vegetali a foglia (Nhan et al., 2019); elevati costi e consumi energetici per venire incontro alle richieste di ossigeno a causa della respirazione degli animali acquatici (Yang et al., 2020); utilizzo di mangimi tradizionali che incidono sui costi di gestione (Yang et al., 2020).

Al fine di risolvere queste problematiche è stato proposto il nuovo concetto dell'*Algacquacoltura*, che combina le parole *algacoltura* e *acquacoltura* e nel quale il sistema idroponico viene rimpiazzato da quello dell'algacoltura: le alghe, e meglio ancora le microalghe, rispetto alle piante, sono in grado di assorbire meglio i nutrienti, producono ossigeno e costituiscono biomassa che può essere adoperata come cibo alternativo per i pesci (Han et al., 2019; Yang et al., 2020).

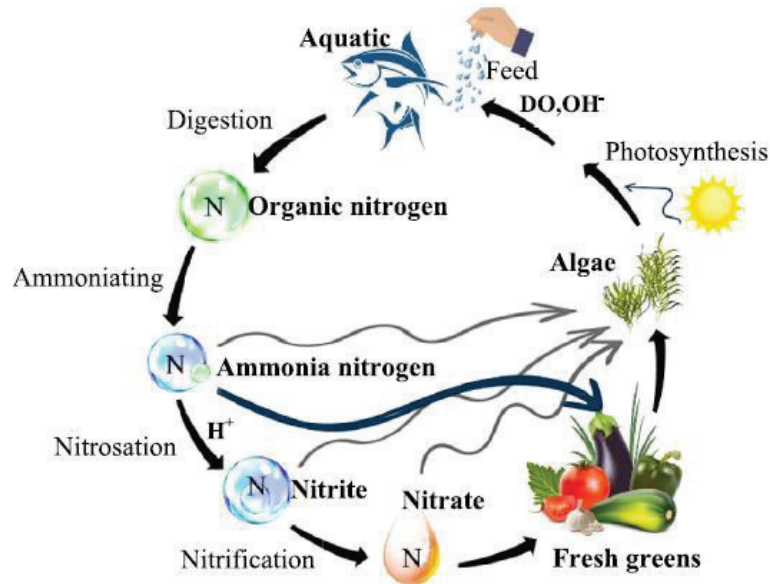


Figura 4-11 Diagramma concettuale di un sistema acquaponico con alghe (tratta da Y. Zhang et al., 2022)

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

Due specie di alghe possono essere adoperate in acquacoltura (Borowitzka, 1997): le colonie naturali di fitoplankton, presenti in ambienti naturali o in acque ricche di nutrienti e le colture monoalgali che sono quelle maggiormente adoperate in letteratura.

Nel paragrafo precedente è stato messo in evidenza il trattamento di acque reflue mediante microalghe sottolineando la loro grande capacità depurativa, soprattutto nell'assorbimento dei nutrienti. Le caratteristiche delle acque reflue tendono a differenziarsi a causa di molteplici aspetti, ma prima di tutto si differenziano in base alla tipologia di refluo da trattare: per un'acqua reflua derivante da acquacoltura, la differenza va colta nella tipologia di specie ittica allevata. Le caratteristiche di un'acqua reflua derivante dall'allevamento di tilapia, per esempio, sono sintetizzate nella seguente tabella:

Tabella 4-4 Caratteristiche di un refluo di acquacoltura (tratta da Tejido-Nuñez et al., 2020)

Parametro	Valore
NO ₃ -N [mg/l]	152,8
PO ₄ -P [mg/l]	16,1
NH ₄ ⁺ [mg/l]	≤ 0,1
Na ⁺ [mg/l]	246,4
Ca ²⁺ [mg/l]	168,9
Mg ²⁺ [mg/l]	39,6
K ⁺ [mg/l]	195,1
NO ₂ ⁻ [mg/l]	0,3
Cl ⁻ [mg/l]	147,3
SO ₄ ²⁻ [mg/l]	420,6
COD [mg/l]	38,4

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

Batteri [CFU/ml]	4,2 * 10 ⁵
------------------	-----------------------

Di seguito si riportano brevemente alcuni studi di letteratura condotti sull'Algacquacoltura.

Lo studio di Cheban et al., 2018 ha ottenuto dei buoni risultati effettuando una co-coltivazione di *Daphnia Magna*, un crostaceo planctonico e *Desmodesmus armatus*, una microalga, in un sistema di acquacoltura a ricircolo (RAS). *Daphnia Magna* viene coltivata in massa in quanto gli individui piccoli vengono usati come cibo per le larve dei pesci e gli individui maturi come cibo per i pesci più grandi. L'esperimento è stato condotto sia in coltivazione separata che co-coltivazione: i risultati hanno mostrato che la maggiore efficienza è stata ottenuta nella co-coltivazione ottenendo una biomassa di *Daphnia* con un contenuto di proteine, lipidi e carotenoidi maggiore e pari, rispettivamente, a 82,5%, 6,7% e 15,3 mg/g.

Egloff et al., 2018 hanno realizzato uno studio in cui sono state coltivate in due cicli microalghe all'interno di un sistema di coltivazione aperto inclinato, alimentate da un sistema RAS. Nel primo ciclo sono stati coltivati *Chlorella vulgaris* e pesce persico e nel secondo ciclo *Tetradismus obliquus* e tilapia, mentre la CO₂ è stata introdotta artificialmente per mezzo di una pompa. I risultati hanno mostrato un'elevata crescita della biomassa microalgale per tre settimane senza aggiungere nutrienti fino a 20 g/l.

Y. Fang et al., 2017 hanno messo a confronto i trattamenti di un refluo derivante da un sistema RAS, effettuati con un sistema acquaponico convenzionale e un sistema basato sulle microalghe. Le specie utilizzate sono *Chlorella vulgaris* coltivata in un fotobioreattore a membrana chiuso verticale a pannello, carpa comune e cavolo cinese. I risultati hanno mostrato che l'efficienza di utilizzo dell'azoto in un sistema basato sulle microalghe è del 13,79% maggiore di un sistema acquaponico convenzionale. Y. Fang et al., 2018, invece, si sono poi concentrati sul sistema basato sulle microalghe investigando sugli effetti che poteva avere il tempo di ritenzione idrica (HRT) sull'efficienza di utilizzo dell'azoto (NUE), svolgendo esperimenti su 3 PBR a pannello dotati di sistema di agitazione e caratterizzati da 3 tempi di ritenzione idrica diversi (0,5 giorni, 2 giorni e 4 giorni), i quali svolgevano operazione di trattamento di un refluo proveniente da un RAS in cui era presente la carpa comune. I

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

risultati hanno mostrato che il tempo migliore si è attestato a 2 giorni con un NUE del 39,28%.

Lo studio di F. Gao et al., 2016 si è soffermato sulla coltivazione microalgale per la produzione di biomassa e la rimozione dei nutrienti da un refluo di acquacoltura usando un fotobioreattore a membrana. Sono state utilizzate *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus obliquus* come microalghe e la mazzancolla tropicale come specie ittica. *Chlorella vulgaris* ha mostrato i risultati migliori, con una riduzione media di azoto totale e fosforo totale, rispettivamente, dell'81,6% e 82,7%.

Anche l'axenicità (assenza di batteri) dell'ambiente di coltivazione può incidere sulla produzione delle microalghe. Lo studio di Halfhide et al., 2014 dimostra, infatti, che un ambiente non-axenico determina un incremento nella produzione di lipidi nella specie *Chlorella*, a causa di condizioni di stress dovute alla competizione per i nutrienti tra alghe e batteri, causando una riduzione della biomassa microalgale.

Tejido-Nuñez et al., 2020 hanno realizzato una co-coltivazione di due specie microalgali, *Chlorella vulgaris* e *Tetradismus obliquus* in un sistema aperto inclinato alimentato da un refluo, in condizioni sia sterili che non-sterili, proveniente da un sistema RAS ed è stato confrontato con lo stesso esperimento condotto in condizioni di coltura separate delle microalghe. I risultati relativi alla crescita microalgale hanno confermato che entrambe le specie in entrambi gli esperimenti sono adatte alla crescita in sistemi RAS. Allo stesso modo vale per la rimozione dei nutrienti che ha superato il 98% per i nitrati e il 99% per i fosfati.

Kuo et al., 2016, invece, hanno realizzato la coltivazione di *Chlorella sp. GD* alimentata con un refluo di acquacoltura e con uno scarico gassoso (8% di CO₂) proveniente da una caldaia. È stata, inoltre, prevista l'aggiunta di ulteriori nutrienti nel mezzo di coltura microalgale. I risultati hanno mostrato che la produttività della biomassa si è attestata intorno a 1,3 g/L/d e la fissazione della CO₂ pari a 2,33 g/L/d.

Per il dimensionamento e il controllo di un fotobioreattore abbinato ad un sistema di acquacoltura bisogna tenere conto dei seguenti parametri.

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

Tabella 4-5 Parametri di dimensionamento e controllo di un fotobioreattore combinato con sistemi di acquacoltura

Parametro	Valore	Fonte
Volume PBR	20% del volume del RAS	(Vu et al., 2019)
Produttività biomassa	1,3 g/L/d	(Kuo et al., 2016)
pH	6-9	(Khan et al., 2018; Suthar & Verma, 2018)
Ossigeno disciolto	< 31 mg/l	(Kazbar et al., 2019)
Luce	33-400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	(S. P. Singh & Singh, 2015)
Temperatura	20-30 °C	(S. P. Singh & Singh, 2015; Suthar & Verma, 2018)
Produzione di CO ₂	97,8 mg/m ² /h	(Y. Chen et al., 2015)
Fissazione della CO ₂	800-1000 mg/1/d (<i>Chlorella</i>) 200-600 mg/1/d (altre specie)	(Ho et al., 2011)
Richiesta di microalghe	150 g di microalghe/kg di pesce (15% del peso)	(Camacho-Rodriguez et al., 2018)

Se correttamente gestite, le alghe possono apportare dei benefici in un sistema acquaponico: rimuovere i nutrienti e migliorare la qualità dell'acqua, controllare gli abbassamenti del pH causati dal processo di nitrificazione, generare ossigeno disciolto, produrre acidi grassi polinsaturi

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

come cibo aggiuntivo per i pesci, migliorare la resilienza del sistema (Addy et al., 2017).

A questo proposito uno studio interessante è stato realizzato da Addy et al., 2017. Lo studio si è diviso in due parti: la prima è iniziata nel settembre 2016 ed è proseguita per alcune settimane; in seguito, il sistema è stato gestito con uno sforzo regolare prevedendo ricambi d'acqua, rifornimenti di cibo per i pesci, rimozione dei vegetali e aggiustamenti del pH; la seconda fase, poi, si è tenuta nei mesi di febbraio e marzo 2017, quando il sistema era ormai maturo. Il sistema era composto dalla vasca dei pesci, vasca di chiarificazione, vasca di mineralizzazione, vasca di degasaggio, unità idroponica composta da tre sistemi flottanti con 15 alloggi per le piantine ciascuno, pompe per il ricircolo e per l'aerazione.

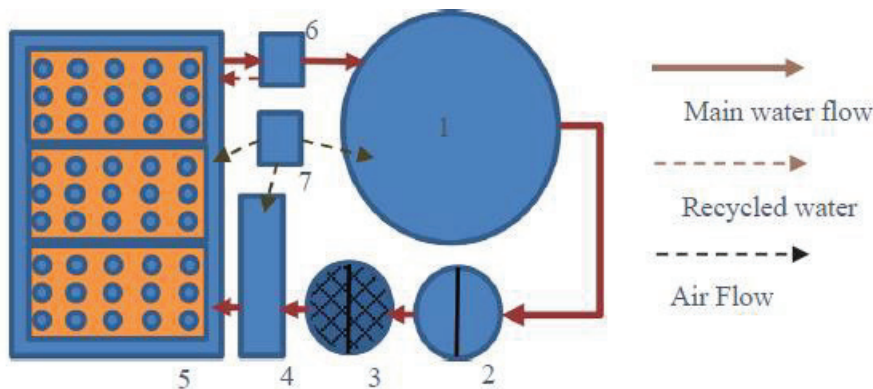


Figura 4-12 Sistema acquaponico realizzato nello studio di Addy et al., 2017: 1) vasca dei pesci; 2) vasca di chiarificazione; 3) vasca di mineralizzazione; 4) vasca di degasaggio; 5) unità idroponica; 6) pompe per il ricircolo; 7) pompe per l'aerazione

Sono stati realizzati due sistemi acquaponici di questo tipo (NP1 e NP2). La specie microalgale scelta è *Chlorella sp.* per la sua robustezza e velocità di crescita e la sua superiorità nel trattamento dei reflui, mentre per la specie ittica si è optato per la tilapia.

Il primo studio si è incentrato sulla comparazione dei due sistemi per valutare l'effetto delle alghe su un sistema acquaponico. Nel sistema 1 sono state inserite 30 piantine di cavolo nero resistente al caldo, considerando che le condizioni atmosferiche si sono mantenute simili alla stagione estiva, mentre la terza sezione flottante è stata rimpiazzata dalla coltivazione delle alghe. Nel sistema 2 sono state inserite 45 piantine in

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

tutte e tre le sezioni flottanti, senza alghe. Durante il funzionamento del sistema si è visto che le alghe si attaccavano alle pareti esposte alla luce solare e sul fondo della vasca, pertanto è stato deciso di posizionare una superficie orizzontale di polistirolo come appoggio per lo sviluppo della massa algale.

Il secondo studio, invece, ha previsto che nel sistema 2 il refluo dei pesci fosse sostituito dal refluo di letame suino digestato come sorgente di nutrienti. Inoltre, in entrambi i sistemi sono state inserite metà piantine di cavolo nero e metà di bietola svizzera. La sezione algale è stata inserita in entrambi i sistemi per valutare la produttività della biomassa. Dato che il refluo del letame suino contiene un livello maggiore di nutrienti a quello dei pesci, ci si aspetterà una migliore crescita algale nel sistema 2.

I risultati del primo studio sono i seguenti. Due pesci morti nel sistema 2. I livelli di ammoniaca del sistema 1 sono risultati più bassi grazie alla presenza delle alghe. Sono stati effettuati molti ricambi di acqua e per tale motivo è stato ridotto il numero dei pesci da 30 a 20 in entrambi i sistemi. Il valore dei nitrati è rimasto nel range tra 30-50 ppm. Le piantine sono cresciute allo stesso modo in entrambi i sistemi. L'ossigeno disciolto si è mantenuto a livelli ottimali e con valori molto simili in entrambi i sistemi, poiché bisogna considerare che anche i batteri nitrificanti consumano ossigeno.

I risultati del secondo studio sono i seguenti. Il livello dei nitrati è arrivato anche a 100mg/l nel sistema 2 e si è mantenuto sui 50 mg/l nel sistema 1. La crescita microalgale ottenuta non è stata quella che ci si aspettava con valori pari a 4,28 g/m²/d per il sistema 1 e 4,01 g/m²/d per il sistema 2, migliori comunque rispetto al primo studio. La produzione vegetale nel sistema 1 è stata di 155 g/m²/d nel sistema 1 e 120 g/m²/d nel sistema 2, decisamente migliori rispetto al primo studio. Il motivo per cui i risultati della crescita microalgale e vegetale sono migliori nel secondo studio è che il sistema risulta essere più maturo.

Inoltre, per capire se le alghe erano in grado di regolare gli abbassamenti del pH sono stati condotti dei test di laboratorio aggiungendo le alghe in acqua proveniente dal sistema acquaponico. I risultati hanno dato esito positivo con un aumento del pH di 2 unità (da 8 a 10) in 7 giorni. In questi test si è anche vista la capacità delle alghe, diversamente dalle piantine, di catturare l'ammoniaca che è passata da 2 mg/l a 0,22 mg/l in 7 giorni.

4. I fotobiorreattori microalgali e l'algaponica

Fin dall'inizio l'acquaponica è stata presentata come un importante strumento per raggiungere uno sviluppo sostenibile all'interno delle città, equilibrando così il loro carattere consumistico con l'opportunità di diventare anch'esse dei centri produttivi agricoli mediante l'introduzione di sistemi acquaponici in strutture esistenti o ex-novo. Nello studio di Y. Zhang et al., 2022 viene proposto un nuovo modello acquaponico, detto PRO-AP (Acquaponica a riossigenazione fotosintetica), nel quale il sistema viene migliorato con l'aggiunta di macroalghe. La novità dello studio proposto, oltre all'introduzione delle alghe, è quella di adattare il sistema all'interno di edifici esistenti, utilizzando le superfici verticali anziché quelle orizzontali, sia perché le mura in un edificio hanno un'estensione maggiore, sia per sfruttarne la loro esposizione alla luce solare, realizzando così delle facciate produttive a doppia parete.

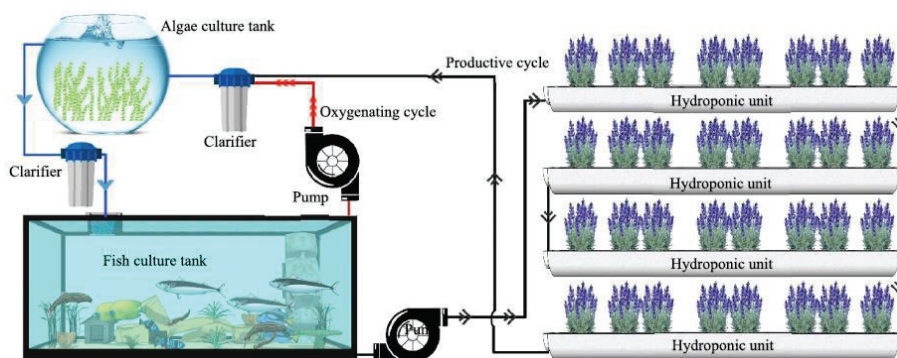


Figura 4-13 Schema del sistema acquaponico PRO-AP integrato con alghe (tratta da Y. Zhang et al., 2022)

La specie di alga adoperata è stata *Spirogyra*, mentre le specie vegetali sono state *Brassica Rapa* e *Beta vulgaris var. cicla* e quella ittica è stata il cobite di stagno orientale (*Misgurnus anguillicaudatus*). Sono stati valutati ossigeno disciolto, pH, solidi disciolti totali (TDS), conducibilità elettrica (EC), azoto ammoniacale e rimozione dei nutrienti chiave. I risultati hanno mostrato che l'ossigeno disciolto nel sistema si è incrementato notevolmente e che l'abbassamento del pH causato dai batteri nitrificanti potrebbe essere bilanciato nel momento in cui le alghe vengono irradiate efficacemente dalla luce. Inoltre, le alghe hanno avuto un ruolo fondamentale nella biofiltrazione del sistema, riducendo TDS ed EC nonché i contenuti di NH_4^+ , NO_3^- e PO_4^{3-} e di nitriti.

4. I fotobioreattori microalgali e l'algaponica

Questi risultati confermano la forte abilità autoregolatrice dei sistemi acquaponici combinati con la coltivazione algale.

5 IL RECUPERO DEI NUTRIENTI NEI SISTEMI ACQUAPONICI

Le specie vegetali hanno specifiche esigenze nutrizionali: affinché abbiano una buona crescita, riproduzione e un buon processo fotosintetico, necessitano di nutrienti. Ci sono due grandi categorie di nutrienti a cui facciamo riferimento: i micronutrienti e i macronutrienti.

5.1 MICRONUTRIENTI E MACRONUTRIENTI

I macronutrienti più importanti per il corretto sviluppo delle specie vegetali sono: azoto, fosforo, potassio, calcio, magnesio e zolfo.

- **Azoto:** elemento essenziale per la fotosintesi, la crescita cellulare, i processi metabolici e la produzione di clorofilla. Solitamente si trova sotto forma disciolta, cioè come nitrato, però le piante possono utilizzarlo, anche se in minima parte, in forma di ammoniaca o amminoacidi liberi.
- **Fosforo:** elemento strutturale delle membrane fosfolipidiche e per la costruzione del DNA, essenziale per la fotosintesi e per la formazione di oli e zuccheri. Favorisce la germinazione e lo sviluppo delle radici.
- **Potassio:** controlla la semipermeabilità della membrana, l'apertura degli stomi e il processo di fioritura. Importante per il trasporto degli zuccheri, l'assorbimento dell'acqua, la resistenza alle malattie.
- **Calcio:** elemento strutturale per le pareti cellulari, il rafforzamento dei fusti e lo sviluppo delle radici.
- **Magnesio:** elemento chiave per la fotosintesi.
- **Zolfo:** essenziale per la produzione di enzimi per la fotosintesi.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Tabella 5-1 Funzione dei macronutrienti

Nutriente	Funzione
Azoto	Fotosintesi clorofilliana, crescita cellulare, processi metabolici
Fosforo	Elemento strutturale delle membrane fosfolipidiche, fotosintesi clorofilliana, costruzione DNA, per la germinazione e sviluppo radici
Potassio	Processo di fioritura, trasporto degli zuccheri, assorbimento dell'acqua, resistenza alle malattie
Calcio	Elemento strutturale per pareti cellulari, fusto e radici
Magnesio	Fotosintesi clorofilliana
Zolfo	Produzione di enzimi per fotosintesi clorofilliana

I micronutrienti sono meno rilevanti rispetto ai macronutrienti, ma una loro carenza provoca comunque danni alla struttura delle specie vegetali. I sei elementi fondamentali sono i seguenti:

- Ferro: microelemento critico per la fotosintesi, in caso di carenza viene integrato come chelato di ferro.
- Manganese: importante per la fotosintesi.
- Boro: regola i percorsi metabolici delle piante, i polisaccaridi e le glicoproteine strutturali. È coinvolto nella riproduzione e nell'assorbimento dell'acqua da parte delle cellule.
- Zinco: influisce sulla dimensione, crescita e maturazione delle piante.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

- Rame: utilizzato nella riproduzione e per il rafforzamento dei fusti.
- Molibdeno: utilizzato per catalizzare le reazioni redox con le diverse forme di azoto, in sua assenza, le piante possono avere sintomi di carenza da azoto.

Tabella 5-2 Funzione dei micronutrienti

Nutrienti	Funzione
Ferro	Fotosintesi clorofilliana
Manganese	Fotosintesi clorofilliana
Boro	Processi metabolici, assorbimento acqua
Zinco	Crescita e maturazione piante
Rame	Rafforzamento fusti, riproduzione
Molibdeno	Catalizzatore di reazioni redox con l'azoto

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

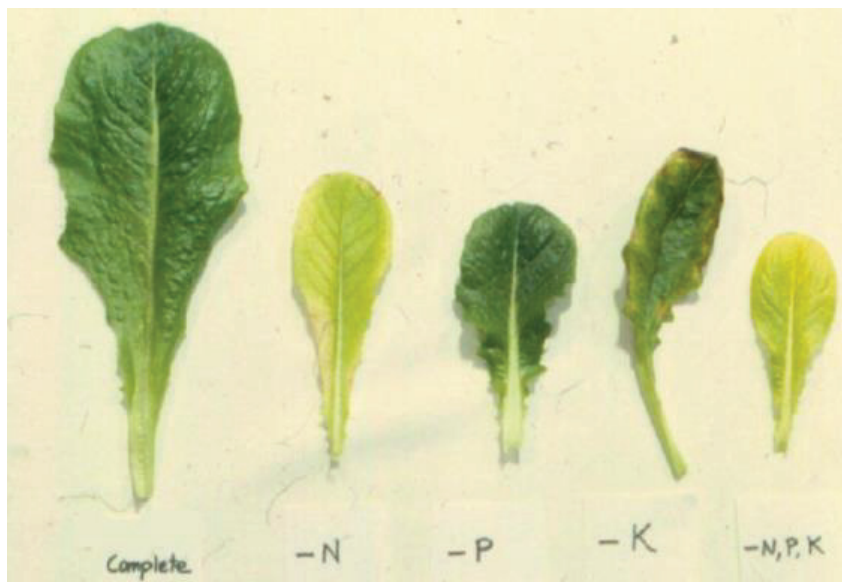


Figura 5-1 Effetto di alcune carenze nutrizionali su una foglia di lattuga (fonte: <https://hydrilla.in/>)

In acquaponica i nutrienti sono forniti dai pesci. Infatti, le acque reflue dell'acquario vengono immerse nelle vasche idroponiche per fornire nutrienti sotto forma di nitrati. Se le specie ittiche ricevono un'adeguata alimentazione, rilasciano una serie di scarti: mangime non ingerito, prodotti di escrezioni metabolica e feci. I rifiuti possono essere sia in forma solida che disciolta, sia di natura organica che inorganica, la maggior parte è costituita da composti di carbonio, azoto e fosforo. A questo punto, i rifiuti solidi prodotti dai pesci vengono trasformati dai batteri eterotrofi che rilasciano i nutrienti essenziali nell'acqua.

In un sistema non integrato (acquacoltura e idroponica), il rilascio tal quale dei nutrienti nell'ambiente può provocare dei problemi ed alterazioni dell'ecosistema, in particolare se si dovesse superare la capacità naturale di assimilazione di un ecosistema, potrebbero presentarsi fenomeni di eutrofizzazione di entità variabile, da localizzati e modesti ad ampi e rilevanti. Ad esempio, su scala locale si può verificare la riduzione dell'ossigeno disciolto e le alterazioni della biodiversità.

Per limitare l'impatto ambientale dei reflui di acquacoltura sul comparto acque e conseguentemente anche sul comparto salute, la normativa fornisce delle limitazioni. A livello nazionale, per la normativa ambientale

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

si fa sempre riferimento al D.Lgs. 152/2006. Esso fornisce limiti sia sulla qualità delle acque destinate all'allevamento, sia (Art. 101, Tabelle 1 e 2 dell'Allegato 5 parte terza) i limiti di azoto e fosforo nel caso in cui le acque reflue di un impianto di allevamento ittico, con densità di allevamento inferiore a 1 kg/m² o portata d'acqua pari o inferiore a 50 l/s, siano scaricate in aree sensibili. Per quanto riguarda gli impianti di acquacoltura e piscicoltura l'art. 111 del D.Lgs. 152/2006 rimanda a uno specifico decreto l'individuazione dei criteri relativi al contenimento dell'impatto sull'ambiente di tali impianti.

Secondo uno studio effettuato dall'ISPRA (Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale) nel 2018, nelle diverse regioni italiane si registra un differente bilancio tra immissione e sottrazione di azoto e fosforo da parte rispettivamente di pesci e molluschi.

In questo quadro si inserisce la ricerca, e la volontà di trasformare questo svantaggio in un possibile vantaggio, ovvero il recupero ed il riutilizzo di queste sostanze di scarto nell'ottica dell'economia circolare.

Come si è visto nei capitoli precedenti, la scelta di realizzare un sistema integrato, che sia acquacoltura e idroponica, piuttosto che acquacoltura e algocoltura è proprio finalizzata al recupero dei nutrienti e riutilizzo delle acque, che altrimenti dovrebbero subire trattamenti prima di essere reimmesse nell'ambiente. A questo scopo si utilizzano tecniche ingegneristiche ispirate a processi naturali di fitodepurazione per ottenere ovvi benefici: il continuo apporto di sostanze nutritive alle specie vegetali e l'allevamento degli animali acquatici in condizioni ottimali.

5.2 CICLO DEI NUTRIENTI

Le sostanze nutritive presenti in natura, come azoto, fosforo e carbonio, compiono un ciclo biogeochimico passando dall'atmosfera, al suolo, agli esseri viventi.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Il funzionamento di un sistema acquaponica è basato sull'equilibrio dinamico tra i nutrienti. Gli impianti acquaponici ottimizzano il ciclo dei nutrienti per due ragioni: in primo luogo, il ricircolo idrico evita lo scarico dei composti azotati e fosfati nelle acque di falda; in secondo luogo, si realizza la fertilizzazione delle colture idroponiche con soluzioni organiche, senza l'utilizzo di fertilizzanti di origine minerale potenzialmente dannosi ((Bittsánszky et al., 2016); Timmons and Ebeling 2013), (Eck et al., 2019).

Tuttavia il sistema a ricircolo rappresenta una sfida per il monitoraggio dei nutrienti disciolti: infatti risulta problematico controllare l'evoluzione di nutrienti prodotti dalla degradazione biologica della sostanza organica rispetto alle soluzioni nutritive di origine minerale utilizzate in idroponica (Bittsánszky et al.2016; Timmons and Ebeling 2013), (Eck et al., 2019). Inoltre, le esigenze nutrizionali delle colture variano in funzione delle diverse fasi di crescita fisiologica, ed è necessario soddisfare questi bisogni per massimizzare la produzione.

Al fine di riutilizzare gli effluenti idrici per produrre biomassa vegetale, occorre massimizzare il tasso di recupero di azoto e fosforo. Molti fattori influenzano questo processo, come le specie acquatiche allevate, la densità di allevamento, i parametri di qualità delle acque, le colture e l'attività batterica.

5.2.1 Ciclo dell'azoto

L'azoto percorre un ciclo di tipo prevalentemente gassoso, essendo il principale costituente dell'atmosfera terrestre.

L'azoto è un elemento di primaria importanza per le specie viventi (aminoacidi, proteine, DNA, RNA, ATP etc.), ma allo stato gassoso (azoto molecolare N_2 e ossidi NO_x) non è respirabile (dal greco “a-zoon = privo di vita”) né assimilabile dalle specie vegetali. Per questo motivo il ciclo inizia con la *fissazione batterica*, un processo che genera composti azotati a partire dall'azoto molecolare (N_2) presente in atmosfera. Questi composti, disciolti in acqua, possono essere prontamente assimilati dalle radici delle piante. Il composto azotato più comune è l'ammoniaca (NH_3), che si trova in quantità elevate nelle deiezioni animali (feci e urine) e in tutte le sostanze organiche in decomposizione. L'azoto ammoniacale subisce un processo

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

di nitrificazione che origina nitriti (NO₂) e nitrati (NO₃). Tra tutti i composti azotati i nitrati rappresentano una fonte nutritiva ottimale per le specie vegetali.

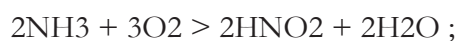
In natura le alterazioni antropiche (es. i fertilizzanti azotati) hanno provocato un aumento del volume di scambio dell'azoto, con conseguenti impatti negativi sull'ambiente, come le piogge acide e l'eutrofizzazione dei corpi idrici.

La nitrificazione può avvenire analogamente nell'ambito di un sistema acquaponico: solo il 30% dell'azoto organico contenuto nei mangimi tradizionali è utilizzato per il metabolismo e la crescita dei pesci, mentre il resto è espulso dalle branchie o sotto forma di feci e urina ((Ru et al., 2017)). In generale i pesci eliminano l'azoto sotto forma di TAN (*total organic carbon*), vale a dire ammoniaca (NH₃) e ammonio (NH₄⁺). L'equilibrio tra questi ultimi dipende dal pH e dalla temperatura.

In seguito, gli scarti sono convertiti in nutrienti grazie all'attività microbica. Pertanto, il successo di un impianto acquaponico dipende strettamente dalla presenza di una colonia batterica capace di abbassare i livelli di scorie azotate nelle vasche. Infatti, l'azoto ammoniacale è tossico per le specie ittiche, e in concentrazioni elevate potrebbe essere letale.

Nei sistemi acquaponici il ciclo dell'azoto si divide in 3 fasi:

- Ammonificazione: avviene la degradazione delle proteine ad opera dei batteri ammonizzanti, e si producono ammonio o ammoniaca, acqua e anidride carbonica;
- Nitrosazione: è la prima fase della nitrificazione, in cui avviene l'ossidazione dei composti ridotti dell'azoto (ammonio/ammoniaca NH₃/NH₄⁺) in composti parzialmente ossidanti (nitriti NO₂⁻), grazie all'azione dei batteri nitrosi:



- Nitrazione: è la seconda fase della nitrificazione in cui i nitriti (NO₂) vengono ossidati a nitrati (NO₃) per mezzo dei batteri nitrici.



In natura, il ciclo termina con la denitrificazione, un processo in cui i batteri trasformano i nitrati in azoto gassoso (N₂). I batteri denitrificanti

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

sono eterotrofi facoltativi e appartengono ai ceppi *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Proteus* and *Micrococcus* sp. (Gentile et al. 2007; Michaud et al. 2006; Wongkiew et al. 2017). Alcuni batteri possono attuare sia la nitrificazione che la denitrificazione se i livelli di DO sono inferiori a 0.3 mg/l ((Fitzgerald et al., 2015); Wongkiew et al. 2017)). La denitrificazione non deve avvenire in un sistema acquaponico in quanto i nitrati sono destinati alle piante come nutrimento.

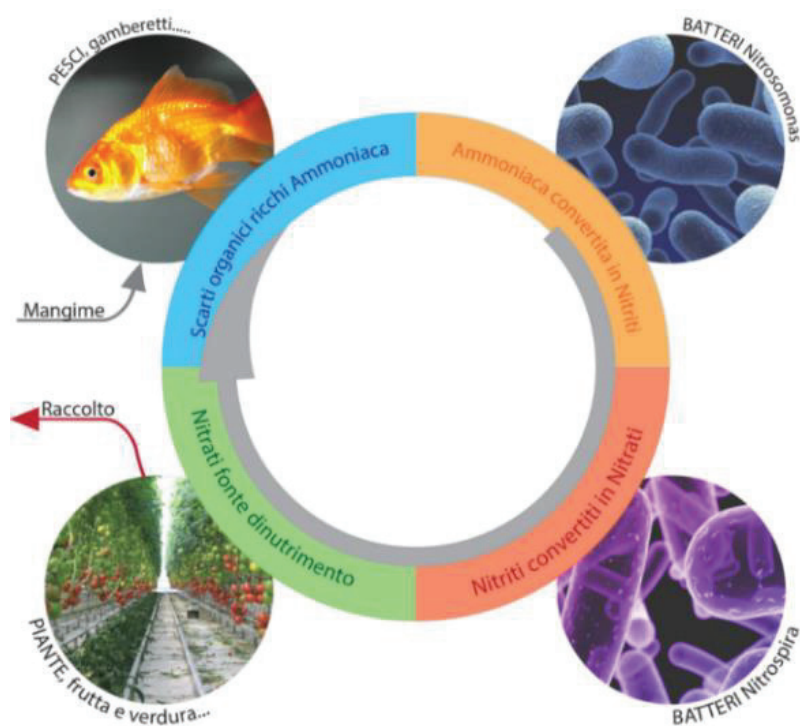


Figura 5-2 Ciclo dell'azoto (fonte: www.humansgarden.it)

I composti azotati devono essere costantemente monitorati nelle vasche acquaponiche poiché in alte concentrazioni diventano velenosi per i pesci. Le specie ittiche reagiscono in maniera diversa all'accumulo di azoto in base alla presenza di ammoniaca, nitriti o nitrati (i primi due sono circa cento volte più velenosi degli ultimi).

Gli effetti derivanti dagli accumuli dei composti azotati sono i seguenti:

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

- **Elevate concentrazioni di ammoniaca:** in questo caso un'esposizione prolungata può provocare danni alle branchie e al sistema nervoso dei pesci. Tilapia e carpe possono mostrare sintomi di avvelenamento da ammoniaca a livelli particolarmente bassi come 1 mg/l (Somerville et al., 2014). Tra gli effetti si osservano letargia, striature rosse sul corpo e boccheggio in superficie. Inoltre, l'attività dei batteri nitrificanti viene fortemente inibita per alti livelli di ammoniaca (può essere utilizzata come agente antibatterico per livelli superiori di 4 mg/l). In particolare, la tossicità dell'azoto ammoniacale aumenta secondo la temperatura e il pH delle acque: in ambiente acido gli ioni idrogeno formano con l'ammoniaca lo ione ammonio, riducendo la tossicità del sistema. Viceversa, in condizioni basiche, non ci sono ioni idrogeno liberi, e l'ammoniaca permane nella sua forma più nociva. Nel caso di temperature elevate la tossicità aumenta ulteriormente;
- **Elevate concentrazioni di nitriti:** i nitriti sono anch'essi tossici per i pesci e possono provocare problemi di salute come stress, malattie o morte, anche in concentrazioni basse come 0,25 mg/l. La presenza di nitriti nell'organismo dei pesci impedisce il trasporto di ossigeno al sangue e può causare la "malattia del sangue marrone", visibile attraverso le branchie;
- **Elevate concentrazioni di nitrati:** i pesci possono tollerare fino a 300-400 mg/l di nitrati, infatti si tratta dei composti azotati meno tossici. Tuttavia, un accumulo di nitrati nelle colture costituisce un pericolo per la salute umana.

5.2.2 Ciclo del fosforo

Il fosforo ha un ruolo biologico fondamentale in quanto interviene nei processi di sintesi e di degradazione delle molecole organiche. Si tratta di uno dei macronutrienti indispensabili per la crescita vegetativa, essenziale per la fotosintesi e per le fasi di germinazione e sviluppo radicale. Pertanto, viene spesso reintegrato nelle coltivazioni mediante fertilizzanti artificiali.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Il fosforo compie un ciclo biogeochimico di tipo sedimentario in quanto in natura è presente in forma organica e minerale in composti non volatili come i fosfati.

Il fosforo arriva al suolo sotto forma di ioni fosfato (PO_4^{3-}) solo in seguito all'erosione di rocce fosfatiche come l'apatite $\text{Ca}[(\text{PO}_4)_3\text{F}]$. Successivamente subisce un processo di organicazione da parte di funghi e batteri con cui viene reso disponibile per gli organismi vegetali autotrofi. Il ciclo avviene attraverso le seguenti fasi:

- Solubilizzazione dei fosfati nel suolo a opera dei microrganismi;
- Assorbimento degli ioni fosforici da parte delle radici;
- Sintesi di composti organici da parte di organismi vegetali, animali e batterici;
- Mineralizzazione batterica del fosforo negli scarti vegetali e animali;
- Fissazione batterica dei composti organici e inorganici del fosforo

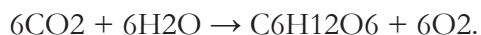
Dunque, i microrganismi esercitano un'azione di primaria importanza in quanto immobilizzano i fosfati e degradano i composti organici per produrre gli ioni fosforici assimilabili dalle piante. I principali batteri mineralizzanti sono: *Bacillus megatherium* var. *phosphaticum* e *Serratia carollera* var. *phosphaticum*. Inoltre, altri organismi hanno questa proprietà, come lieviti (*Saccharomyces*, *Candida*) e funghi (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*).

5.2.3 Ciclo del carbonio

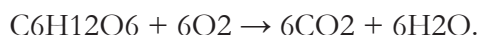
Il carbonio è il principale costituente dei composti organici e rappresenta l'elemento fondante della vita sulla terra. È presente nel DNA e nelle proteine, ma anche in atmosfera sotto forma di CO_2 . Il ciclo del carbonio è anch'esso gassoso e definisce il volume di scambio tra la geosfera, la biosfera e l'idrosfera.

Nei sistemi acquaponici il carbonio interviene sia nel metabolismo animale che vegetale. In primo luogo, le piante sono organismi autotrofi e ricavano i composti organici a partire dall'anidride carbonica e dalla radiazione solare. La fotosintesi clorofilliana segue la reazione:

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici



In secondo luogo, i pesci sono organismi eterotrofi, pertanto rilasciano CO_2 in acqua come prodotto di scarto dell'attività metabolica. La respirazione aerobica segue la reazione:



L'anidride carbonica è un gas climalterante mediamente solubile in acqua, con cui forma l'acido carbonico (H_2CO_3). Il passaggio di CO_2 dall'atmosfera ai corpi idrici raggiunge un punto di equilibrio dinamico quando la velocità con cui l'anidride carbonica si diffonde in acqua eguaglia la velocità con la quale torna in atmosfera. L'interfaccia aria-acqua rappresenta un sistema aperto e la velocità di scambio della CO_2 è fortemente influenzata dai parametri fisico-chimici. Infatti, nelle acque movimentate la velocità di rilascio della CO_2 aumenta. Inoltre, la solubilità in acqua è direttamente proporzionale alla pressione atmosferica e inversamente proporzionale alla temperatura.

Negli acquari la concentrazione di CO_2 oscilla quotidianamente in base ai processi fotosintetici: di giorno diminuisce la CO_2 e aumenta il DO grazie alla fotosintesi, mentre di notte l'ossigeno diminuisce e aumenta la CO_2 per effetto della respirazione di piante e pesci.

Quando la CO_2 , le sostanze nutritive e la radiazione solare non sono bilanciate, può sorgere un problema legato alla crescita eccessiva delle alghe. Come tutte le piante, le alghe producono ossigeno e consumano anidride carbonica, ma la loro attività può risultare dannosa per l'acquario nel caso in cui derivino la CO_2 dai composti carbonatici. In questo caso si produrrebbero delle pericolose oscillazioni di pH dovute alla improvvisa scomparsa dell'azione di buffer esercitata da carbonati e bicarbonati.

L'anidride carbonica svolge un ruolo fondamentale in acquaponica, ma è spesso carente negli acquari a causa dell'elevata richiesta da parte delle specie vegetali e dell'espulsione in atmosfera. Pertanto, può essere reintegrata in maniera artificiale attraverso dei diffusori commerciali, ma i livelli in acqua devono essere costantemente monitorati per non ledere la salute dei pesci. È consigliabile mantenere un livello massimo di 15-25 mg/L di CO_2 disciolta per soddisfare le esigenze acquatiche e vegetali.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

5.3 L'ATTIVITÀ MICROBICA

Per una corretta progettazione dei sistemi acquaponici è fondamentale la comprensione dell'attività biochimica dei microrganismi che degradano la sostanza organica, sicché questi ultimi rappresentano il motore biologico di qualsiasi processo depurativo.

I microrganismi presenti in acquaponica sono di natura batterica, ovvero organismi cellulari dell'ordine di grandezza di micron (μ), e in base alla loro morfologia si dividono in cocci, bacilli e vibrioni. Quasi tutti i batteri si nutrono di sostanza organica inerte; infatti, attraverso l'attività enzimatica possono demolire i composti organici complessi in semplici sostanze assimilabili che rappresentano il substrato nutritivo.

La decomposizione della materia organica richiede ossigeno e produce nuova materia cellulare, CO₂ e acqua.

Il metabolismo batterico è il risultato di reazione anaboliche e cataboliche. Nell'anabolismo le sostanze organiche provenienti dall'ambiente esterno sono utilizzate per la biosintesi di nuovo materiale cellulare con consumo di energia. Viceversa, nel catabolismo i composti organici complessi sono convertiti in prodotti di scarto semplici con rilascio energetico. Pertanto, la crescita microbica è subordinata alla presenza di carbonio, energia, nutrienti organici e inorganici. Di conseguenza, una carenza nutrizionale o l'impossibilità di accedere ad una fonte energetica, diventa un fattore limitante per la sintesi di nuovo tessuto cellulare e per la crescita microbica.

La reazione "tipo" di biodegradazione della materia organica a opera dei batteri è la seguente:

Sostanza organica + O₂ > nuove cellule + CO₂ + H₂O

In base alla modalità con cui i microrganismi ricavano il carbonio si distinguono due sottogruppi metabolici:

- organismi eterotrofi: derivano il carbonio dalle molecole organica;
- organismi autotrofi: derivano il carbonio dall'anidride carbonica

Gli organismi autotrofi hanno un tasso di crescita minore in quanto spendono più energia di quelli eterotrofi per la sintesi del carbonio.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Infatti, la conversione della CO₂ in tessuto cellulare organico è un processo chimico di riduzione che richiede un grande input energetico.

In secondo luogo, in base alle fonti di energia si distinguono:

- organismi fototrofi: ricavano dalla luce l'energia necessaria alla sintesi cellulare. Gli organismi fototrofi possono essere sia autotrofi (batteri sulfurei) che eterotrofi (alghe e batteri fotosintetici);
- organismi chemiotrofi: estraggono l'energia dalle reazioni chimiche di ossido-riduzione e in particolare dall'ossidazione di composti organici e inorganici. Anche questi ultimi possono essere sia autotrofi (batteri azoto fissatori) che eterotrofi (protozoi, funghi e molti batteri). I chemioeterotrofi ricavano energia dall'ossidazione di composti organici, mentre i chemioautotrofi da residui di composti organici come ammoniaca, nitriti e solfuri. Gli organismi chemioeterotrofi possono suddividersi in ulteriori gruppi in base al metabolismo e alla richiesta di ossigeno. Nell'ambito delle reazioni di ossido-riduzione avviene il trasferimento di elettroni da un donatore ossidato a un riceettore ridotto.

Gli organismi che ricavano energia dagli enzimi che trasportano elettroni da un donatore ad un riceettore esterno sono detti organismi con metabolismo respiratorio. Al contrario, il metabolismo fermentativo non necessita di un riceettore di elettroni esterno.

La fermentazione è un processo energetico meno efficiente della respirazione, per cui gli organismi fermentativi sono caratterizzati da un tasso di crescita minore rispetto agli organismi con metabolismo respiratorio.

Nel metabolismo respiratorio, quando l'ossigeno molecolare è usato come accettore esterno di elettroni si parla di *respirazione aerobica*. Viceversa, quando si utilizzano altre molecole inorganiche come accettori esterni di elettroni si parla di *respirazione anaerobica*.

Gli organismi a respirazione aerobica possono vivere solo in presenza di ossigeno molecolare a sufficienza, e sono detti strettamente aerobi.

Al contrario, gli organismi che generano energia dalla fermentazione e che possono esistere solo in un ambiente privo di ossigeno sono detti

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

strettamente anaerobi. Tra i batteri anaerobi ci sono i metanobatteri che producono metano, i riduttori di solfati che producono acido solfidrico a partire dai solfati, e i batteri denitrificanti che riducono nitrati e nitriti ad azoto gassoso. Infine esistono batteri *facoltativi* in grado di crescere sia in presenza che in assenza di ossigeno molecolare.

In acquaponica i microrganismi batterici sono responsabili del processo di nitrificazione e sono detti batteri nitrificanti, che appartengono principalmente a due categorie:

- I batteri nitrosi sono batteri AOB (*ammonia-oxidizing bacteria*), che agiscono nella prima fase della nitrificazione ossidando l'ammoniaca in nitriti. I ceppi più comuni sono Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrospira, Nitrosolobus e Nitrosovibrio.
- I batteri nitrici sono batteri NOB (*nitrite-oxidizing-bacteria*), che agiscono nella seconda fase della nitrificazione ossidando i nitriti in nitrati. I ceppi più comuni sono Nitrobacter, Nitrococcus, Nitrospira e Nitrospina. Il ceppo Nitrospira è considerato un nitrificante completo poiché è coinvolto in tutte le fasi della nitrificazione.

I batteri nitrificanti sono organismi strettamente aerobi poiché necessitano di ossigeno molecolare in alte concentrazioni, e inoltre sono chemioautotrofi in quanto traggono l'energia dall'ossidazione di ammoniaca e nitriti, e ricavano il carbonio dalla CO₂.

Anche i batteri responsabili della nitrificazione, come tutti gli organismi autotrofi, hanno un tasso di crescita molto lento e il processo di colonizzazione può avvenire nell'arco di diversi giorni o settimane.

Le condizioni ottimali per la crescita dei batteri nitrificanti sono le seguenti (Wei et al., 2019):

- Temperatura: i batteri nitrificanti sono organismi mesofili per cui l'intervallo di temperatura ottimale è tra 25 e 30°C, ma possono sopravvivere anche in un range più ampio di 17-34°C. Se la temperatura dell'acqua scende al di sotto di questo intervallo, la produttività dei batteri tende a diminuire. In particolare, il gruppo Nitrobacter è meno tollerante a temperature inferiori, pertanto durante i periodi più freddi occorre monitorare più attentamente i valori di nitrito per evitare accumuli nocivi;

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

- PH: i batteri nitrificanti preferiscono valori di pH più alti tra 7 e 9, a differenza di molte piante idroponiche che crescono maggiormente in condizioni di leggera acidità;
- BOD < 20 mg/L. È importante monitorare la qualità delle acque nelle vasche acquaponiche, in modo da non sovraccaricare il biofiltro. Occorre poi rimuovere il nuovo tessuto cellulare prodotto dall'attività batterica, che rappresenta una frazione di materia organica e contribuisce all'inquinamento dell'effluente sotto forma di BOD;
- DO > 100 mg/L. I batteri nitrificanti sono strettamente aerobi, pertanto è essenziale assicurare l'ossigenazione costante del biofiltro per prevenire lo sviluppo di zone anaerobiche. Infatti, la nitrificazione è una reazione di ossido-riduzione che avviene solo in presenza di ossigeno;
- Alcalinità > 100 mg/L. La nitrificazione rilascia acido nitrico e tende a far abbassare il pH dell'ecosistema acquaponico limitando l'attività batterica. Pertanto, è opportuno compensare l'acidità con l'aggiunta periodica di composti alcalini;
- No raggi UV. I batteri *Nitrosomonas* e *Nitrobacter* sono fotosensibili, per cui la luce solare influenza negativamente l'ossidazione dei composti azotati. Dunque occorre posizionare il biofiltro in una posizione riparata rispetto alla luce solare.

Nel caso in cui vengano rispettati tutti i parametri, ci si aspetta una colonia batterica acclimatata e produttiva. Misurando i livelli di ammoniaca, nitriti e nitrati, si possono dedurre informazioni sullo stato di salute dei batteri nitrificanti. Ad esempio, un livello di ammoniaca o di nitriti maggiore di 1 mg/l indica un problema nel processo di nitrificazione e potrebbe essere necessario ingrandire il biofiltro o ridurre la biomassa acquatica. Nel caso in cui il sistema acquaponico sia giustamente dimensionato, lo squilibrio potrebbe essere dovuto a una cattiva colonizzazione dei batteri nitrificanti e occorrerebbe controllare nuovamente tutti i parametri di qualità delle acque. Quest'ultimo caso è più frequente durante la stagione invernale poiché la temperatura dell'acqua scende e l'attività batterica rallenta (Somerville et al., 2014)

I batteri nitrificanti non sono gli unici microrganismi benefici in acquaponica, ma esistono altri batteri che contribuiscono alla decomposizione dei rifiuti solidi, cioè i batteri eterotrofi mineralizzanti

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Questi ultimi, a differenza dei primi, utilizzano il carbonio organico presente negli scarti fecali per attuare la mineralizzazione, un processo che scinde i rifiuti solidi in micronutrienti essenziali per le piante. Pertanto, in loro assenza, potrebbero verificarsi carenze nutrizionali nelle colture idroponiche. I batteri eterotrofi più diffusi in acquaponica appartengono al ceppo *Bacillus* e *Pseudomonas*.

Questi batteri proliferano molto più velocemente di quelli nitrificanti e possono colonizzare in diverse aree di un sistema acquaponico, soprattutto nelle zone più umide come i letti di crescita, nutrendosi di materia organica sotto qualsiasi forma (rifiuti animali e vegetali, cibo avanzato, batteri morti etc.). Si tratta di batteri che sopravvivono sia in condizioni aerobiche che anaerobiche, tuttavia, mentre in presenza di ossigeno elaborano la sostanza organica estraendo azoto, al contrario in assenza di ossigeno lavorano nella direzione opposta andando a produrre ammoniaca a partire dai nitrati. Pertanto, è importante garantire un'ossigenazione costante anche per i batteri eterotrofi.

Occorre notare che i batteri non sono gli unici organismi che concorrono alla decomposizione della materia organica nei sistemi acquaponici. Infatti nei letti di crescita è possibile trovare lombrichi, isopodi, anfipodi e larve che lavorano in simbiosi con i batteri per la degradazione dei rifiuti solidi. Infine, è importante sottolineare che non tutti i batteri svolgono un'azione benefica nei confronti dei trattamenti biologici. I batteri indesiderati in acquaponica sono:

- Batteri solfato-riduttori: sono batteri che realizzano reazioni di ossidoriduzione con lo zolfo producendo idrogeno solforato (H₂S). Questo gas è altamente tossico per le specie acquatiche, per questo alcuni impianti acquaponici di grandi dimensioni possiedono un sistema di degasaggio. Si tratta di batteri anaerobi che proliferano quando si creano condizioni putrefattive dovute ad accumuli di rifiuti solidi. L'unico modo per contrastarne la crescita è l'ossigenazione continua delle vasche in modo da impedire lo sviluppo di zone anaerobiche;
- Batteri denitrificanti: si tratta dei batteri coinvolti nell'ultima fase del ciclo dell'azoto, cioè la riconversione di nitrati in azoto atmosferico. In acquaponica questo processo non deve verificarsi altrimenti si perderebbero i nutrienti destinati alle colture e dunque bisogna impedire la proliferazione di questi batteri. Tuttavia, in

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

alcuni impianti dove la concentrazione di nitrati è particolarmente alta, si può utilizzare la denitrificazione controllata per ridurre lo squilibrio;

- Batteri patogeni: questi batteri sono pericolosi per la salute di tutte le specie viventi che abitano l'ecosistema acquaponico. Un esempio è il ceppo batterico *Escherichia coli* o *Salmonella*. Questi ultimi possono essere introdotti nel sistema attraverso le feci animali o attraverso qualsiasi forma di mangime vivo per pesci. Inoltre, bisogna impedire il contatto diretto tra l'acqua delle vasche e le colture idroponiche, per evitare la trasmissione in acqua di patologie vegetali.

I parassiti e i batteri patogeni sono impossibili da eliminare completamente poiché l'acquaponica non è un sistema sterile, tuttavia un impianto efficiente riduce la minaccia di infestazioni pericolose. Pertanto occorre allevare i pesci in condizioni ottimali, senza causare stress eccessivo, e garantendo l'accesso a tutti i nutrienti essenziali: in questo modo gli organismi possono tenere lontane le infezioni mediante i propri sistemi immunitari mantenuti in perfette condizioni (Somerville et al., 2014).

5.4 TRATTAMENTI RECUPERARE NUTRIENTI IN ACQUAPONICA

La maggior parte dei pesci assimila solo il 30-40% del cibo digerito, mentre il 60-70% è rilasciato come scarto. Di questo scarto, il 50-70% è disperso sotto forma di ammoniaca e i rifiuti restanti sono un mix organico di proteine, carboidrati, grassi, vitamine e minerali (Somerville et al., 2014). Pertanto, i rifiuti organici in acquaponica si dividono in:

- Solidi sedimentabili: particelle grossolane più dense dell'acqua che precipitano sul fondo;
- Solidi sospesi: particelle più piccole che hanno una densità simile a quella dell'acqua per cui non sedimentano ma seguono il flusso idrico;

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

- Solidi disciolti: scorie azotate espulse dalle branchie dei pesci o derivanti dalla mineralizzazione dei solidi.

Per rimuovere questi scarti occorre trattare le acque di ricircolo attraverso una sequenza ordinata di processi meccanici e biologici. In primo luogo, occorre rimuovere i rifiuti solidi sospesi mediante filtrazione meccanica e successivamente i rifiuti disciolti attraverso un biofiltro. Infatti i biofiltri operano in acqua pulita, priva di solidi organici, perciò è ragionevole posizionare i dispositivi di rimozione dei solidi prima dei biofiltri (Van de Ven R. et al., 2014 – 2018).

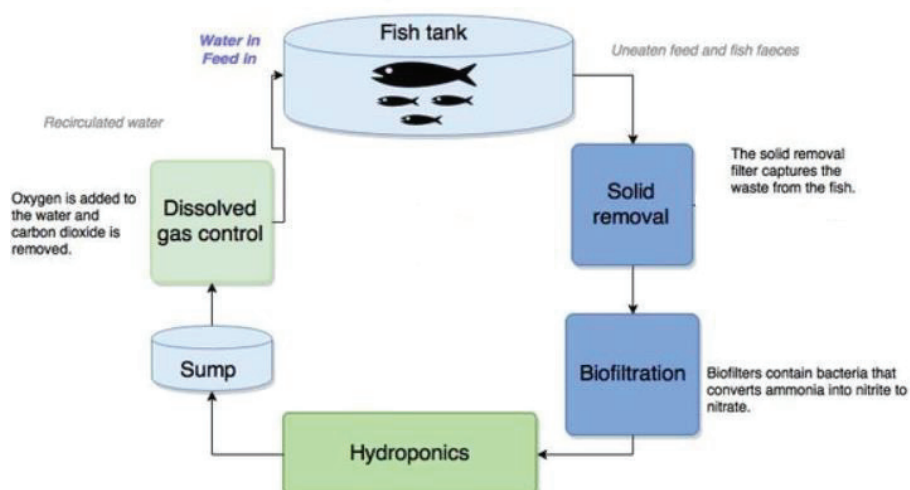


Figura 5-3 Schema esemplificativo dei trattamenti convenzionali in un impianto acquaponico (fonte: Thorarinsdottir, 2015)

Dunque i principali trattamenti in acquaponica sono di due tipologie:

- Trattamenti fisico-meccanici;
- Trattamenti biologici

Inoltre è sempre opportuno prevedere un meccanismo di ossigenazione delle acque (es. aeratore, pietre porose, pompe ad aria), specialmente quando la densità di allevamento è molto elevata e il naturale assorbimento dell'ossigeno atmosferico non è sufficiente.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

5.5 TRATTAMENTI FISICO-MECCANICI

Il primo trattamento dedicato alle acque contaminate degli acquari è la rimozione dei solidi, la cui decomposizione potrebbe causare condizioni critiche per la salute dell'ecosistema. Nel caso in cui si scelga una tecnica idroponica media-based la filtrazione viene realizzata direttamente nei letti di crescita, specialmente nei sistemi acquaponici di piccole dimensioni. Al contrario, in assenza di un growbed, e negli impianti su grande scala, è necessario implementare un trattamento di filtrazione aggiuntivo. Infatti, negli impianti ad elevata densità di allevamento, si producono elevate quantità di rifiuti solidi: per ogni kg di mangime, i pesci producono 0,25 kg di solidi fecali al giorno (Wei et al., 2019).

Una quantità eccessiva di solidi può causare problemi di intasamento dei componenti idraulici e provocare condizioni di anossia nelle vasche, danneggiando sia i pesci che le piante. Infatti, lo sviluppo di condizioni anaerobiche può innescare la fermentazione dei rifiuti solidi e la produzione di gas nocivi come l'acido solfidrico (H₂S), un gas tossico e potenzialmente letale. Pertanto, è consigliabile inserire un certo livello di filtrazione meccanica, a prescindere dalla dimensione dell'impianto.

La modellazione dei processi di rimozione dei solidi in acquacoltura non ha ricevuto molta attenzione nella letteratura scientifica. Controllare il tasso di rimozione per sedimentazione è complicato a causa della variabilità di diametro e densità delle particelle solide sospese. Pertanto, un confronto realistico delle differenti modalità di rimozione dei solidi richiederebbe la definizione di un protocollo unico di campionamento e analisi dei campioni ((Delos and Malone, 1996); (Pfeiffer et al., 2008)).

Per la rimozione dei solidi è consigliabile procedere in maniera graduale. In primo luogo, occorre rimuovere i solidi sedimentabili per mezzo di separatori meccanici, ovvero vasche di sedimentazione. Alcuni esempi sono: il sedimentatore a pianta rettangolare, conico, a vortice o a flusso radiale. Questi dispositivi rimuovono solo i solidi più pesanti che sono in grado di sedimentare, quindi per eliminare i solidi sospesi bisogna ricorrere ad altre soluzioni, come ad esempio i filtri meccanici: a griglia, a tamburo o a dischi. I processi convenzionali rimuovono particelle solide maggiori di 100 µm, e solo alcuni processi tipicamente utilizzati in acquacoltura possono rimuovere solidi più piccoli di 20 µm (Chen *et al.*, 1994) (El-Sayed G. Khater¹, Samir A. Ali², Adel H. Bahnasawy³, 2011). Filtrare i solidi sospesi può risultare superfluo in un impianto acquaponico con letti di

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

crescita, mentre è fondamentale per i sistemi DWC e NFT, in cui ci si aspetta una qualità delle acque più elevata. Una volta prelevati, i solidi possono essere utilizzati come concime nell'ambito di coltivazioni tradizionali.

In generale è impossibile prevenire la formazione dei solidi all'interno degli acquari, tuttavia è utile seguire alcune regole di buona prassi per ridurre la quantità:

- Evitare di sovraccaricare i pesci con quantità eccessive di mangime, è necessario rispettare il fabbisogno giornaliero;
- Evitare l'uso di mangimi scadenti che producono più rifiuti;
- Non sovraccaricare le vasche con troppi pesci: il totale di biomassa acquatica deve essere bilanciato rispetto ai letti di crescita;

L'efficacia di rimozione dei solidi può essere rilevata studiando il colore delle radici delle colture: un colore troppo scuro, grigio-nero, vuol dire un eccesso di rifiuti solidi, per cui occorre migliorare il livello di filtrazione generale del sistema. Seguendo queste poche regole si può evitare l'installazione di dispositivi di filtrazione meccanica esterni. Vale a dire che in un impianto acquaponico di piccole dimensioni, se vengono rispettate tutte le condizioni ottimali di funzionamento dell'ecosistema, può bastare l'azione di filtrazione esplicitata dai letti di crescita idroponici.

Generalmente questi dispositivi richiedono una pulizia manuale, a differenza dei separatori meccanici dove è presente una valvola di drenaggio dei solidi raccolti.

5.6 VASCHE DI SEDIMENTAZIONE

La sedimentazione è un processo che sfrutta la gravità per rimuovere le particelle solide sedimentabili. Infatti, a differenza dei solidi sospesi, i solidi sedimentabili hanno un peso specifico di gran lunga maggiore di quello dell'acqua (997 kg/m^3), per cui sedimentano sul fondo e possono essere rimossi facilmente. La velocità di sedimentazione dei rifiuti fecali nelle vasche di sedimentazione può variare tra 0.83 e 5 m/h, un risultato

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

applicabile al 65%-90% solidi totali (Chesness *et al.*, 1975; Chen *et al.*, 1994). Uno dei fattori critici nella progettazione di un sedimentatore è la velocità della portata in ingresso, che deve risultare né troppo bassa, per soddisfare il ricircolo del sistema, né troppo elevata, altrimenti non permetterebbe la sedimentazione dei solidi. Aumentando il tempo di detenzione nel sedimentatore si aumenta l'efficacia di chiarificazione. Inoltre è importante evitare la formazione di turbolenze, che lasciano i solidi in sospensione e impediscono la decantazione (Nelson & Pade, 2007). Un'analisi rigorosa della sedimentazione richiede lo studio dei seguenti criteri: distribuzione delle grandezze e delle densità delle particelle, velocità di sedimentazione, interazione tra le particelle (es. flocculazione), profili di velocità del flusso idrico, tempo di detenzione, risospensione delle particelle dovuta a lavaggio o attività dei pesci (James, 1984b; Tchobanoglous and Schroeder, 1985; Chen *et al.*, 1994).

5.6.1 Sedimentatore a pianta rettangolare

Il sedimentatore a pianta rettangolare è una vasca dal fondo piano, in cui l'acqua entra da un'estremità ed esce dall'altra con modalità *flow-through*. In questo modo le particelle solide hanno il tempo di sedimentare man mano che l'acqua compie il suo percorso. Subito dopo l'ingresso si raccolgono i solidi grossolani che sedimentano velocemente. In seguito, può trovarsi uno stramazzo per trattenere i solidi più leggeri prima dell'uscita del flusso. In generale, il tempo minimo per consentire la sedimentazione dei solidi è di 20 minuti, a seconda delle portate in ingresso. Si tratta della tecnica di sedimentazione più comune in acquacoltura, tuttavia risulta complicato controllare le particelle solide minori di 40 μm che possono causare problemi nel ricircolo (Libey, 1993 and Merino *et al.*, 2007).

5.6.2 Sedimentatore conico

Nel sedimentatore conico l'acqua arriva dall'alto e viene rallentata da una serie di paratie che consentono ai solidi di sedimentare sul fondo, dove è collocato un tubo di raccolta. L'acqua chiarificata continua il suo percorso verso il tubo di uscita e il successivo trattamento. Attualmente si tratta della tecnologia di sedimentazione migliore per impianti acquaponici di grandi dimensioni. Inoltre, l'efficacia di rimozione dei solidi può essere

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

incrementata con una doppia filtrazione (*double recirculating aquaponics systems, DRAPS*).

5.6.3 Separatore meccanico a vortice (Swirl filter)

Si tratta di una vasca tronco-conica, che sfrutta la forza centrifuga per allontanare la frazione solida. L'acqua entra mediante una condotta tangente alla vasca tale da creare un moto vorticoso, per questo il dispositivo è anche noto come "idrociclone". In questo modo le particelle solide sono spinte contro le pareti e precipitano sul fondo dove è collocato un tubo di raccolta. Questo sistema di filtrazione è economico e di facile realizzazione, ma risulta meno efficiente di altri dispositivi.

5.6.4 Separatore meccanico a flusso radiale (Radial flow separator)

Anche in questo caso si utilizza una vasca conica ma il principio di funzionamento è diverso rispetto al separatore a vortice. Qui l'acqua entra direttamente al centro della vasca, con un flusso diretto dal basso verso l'alto. In questo modo si realizza un rallentamento del flusso idrico e le particelle più pesanti sono costrette a sedimentare sul fondo. I rifiuti solidi sono poi raccolti mediante l'apertura di una valvola sul fondo mentre il flusso chiarificato prosegue verso il trattamento successivo.

5.6.5 Filtri meccanici

Sono dispositivi che hanno lo scopo di filtrare l'acqua trattenendo i solidi sospesi, ovvero quelle particelle che non riescono a sedimentare a causa del basso peso specifico. Pertanto, è utile inserire un filtro meccanico come seconda unità di filtrazione dopo il sedimentatore.

Attualmente esistono diverse tecnologie di filtrazione meccanica che si differenziano in base alle esigenze impiantistiche.

Gli impianti acquaponici su grande scala utilizzano dispositivi automatizzati, che richiedono un livello di manutenzione minima come i filtri a griglia (*screen filters*), i filtri a tamburo (*drum filters*) e a dischi (*disc filters*). Viceversa, per impianti domestici di piccole dimensioni conviene ricorrere a soluzioni più semplici ed economiche, che tuttavia richiedono maggiore

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

manutenzione manuale, come i filtri *raft* (*raft filters*) o retini di vario genere (*bird netting*).

5.6.6 Filtro meccanico con griglia (Screen filter)

In primo luogo, il processo di filtrazione con griglia, attualmente poco diffuso in acquaponica, consiste nell'effettuare una vera e propria vagliatura con apertura delle maglie di pochi micrometri.

Questo sistema lavora a gravità, lasciando fluire l'acqua verso il basso attraverso il filtro, dove si accumulano i solidi, e infine nel bacino di raccolta dell'acqua filtrata. Il filtro è in acciaio inossidabile con un design parabolico, che sfrutta l'effetto Coanda, cioè la tendenza dei fluidi a percorrere superfici ricurve. Questa tecnologia ha un costo significativo e consente di raggiungere un livello di filtrazione elevato, necessario per impianti ad alta produttività.

5.6.7 Filtro meccanico a tamburo (Drum filter)

Un altro dispositivo molto efficiente è il filtro meccanico a tamburo. Si tratta di un serbatoio cilindrico orizzontale contenente un tamburo rotante che funge da filtro. L'acqua viene immessa al centro del tamburo, viene filtrata attraverso il micro-filtro che lo riveste, e arriva nel serbatoio cilindrico esterno, da cui sarà drenata ai letti di coltura. Pertanto, c'è un vano interno destinato all'acqua da filtrare, ovvero il tamburo stesso, e un vano esterno secondario che contiene l'acqua già filtrata.

Attualmente ne esistono due diverse tipologie a seconda del materiale di cui è fatto il filtro: acciaio inossidabile o materiale plastico vetro-rinforzato. Il filtro a tamburo fornisce un livello di filtrazione molto elevato e per questo è il dispositivo più diffuso nei grandi impianti di acquaponica e acquacoltura a ricircolo. Infatti, si tratta di una tecnologia d'avanguardia, il cui costo di acquisto non è alla portata di piccoli impianti su scala domestica. In particolare, conviene distinguere tra filtri a tamburo classici e filtri a tamburo "*water-driven*", cioè azionati dal flusso idrico. I primi, sono dei filtri a rotazione continua ad elettricità, mentre i secondi dipendono dal moto dell'acqua e permettono di risparmiare sui costi energetici. Alcuni studi effettuati sui filtri *water-driven* hanno dimostrato un efficientamento energetico di 18 kW al giorno (Wei et al., 2019) (S. A.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Ali, 2013). Oltre ad essere molto efficiente, questo sistema è dotato di un meccanismo autopulente: l'intasamento del filtro fa innalzare il livello d'acqua, in questo modo si attiva la rotazione del tamburo che realizza un contro lavaggio e rimuove i solidi accumulati.

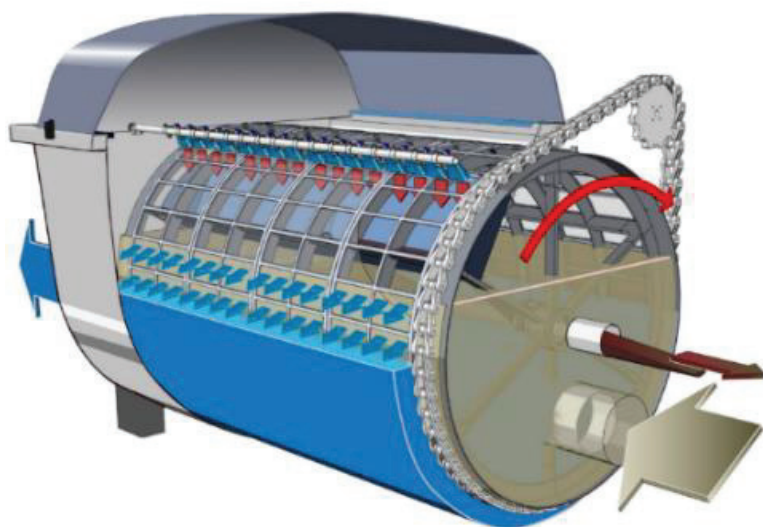


Figura 5-4 Filtro meccanico a tamburo (fonte: img.directindustry.it)

5.6.8 Filtro meccanico a dischi (Disc filter)

Una variante del filtro a tamburo è il filtro a dischi. La struttura è la stessa, ma in questo caso il tamburo centrale è circondato da dischi filtranti disposti in serie. In questo modo si crea una geometria modulare molto compatta, particolarmente indicata quando occorre una superficie di filtrazione maggiore. I dischi possono essere inseriti in numero diverso, in base alle esigenze specifiche di filtrazione dell'impianto. Anche il filtro a dischi, come quello a tamburo, ha un costo elevato ed è consigliabile per impianti di grandi dimensioni. Del resto, questi dispositivi sono molto durevoli e richiedono interventi minimi di manutenzione.

5.6.9 Filtri domestici

Per quanto riguarda gli impianti domestici e su piccola scala, la rimozione dei solidi sospesi può avvenire mediante l'impiego di materiali compatti

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

facilmente reperibili. I filtri domestici realizzano sia la filtrazione meccanica che biologica, e si inseriscono perfettamente nell'ottica dei piccoli impianti sprovvisti di unità di trattamento esterne. Questi filtri infatti raccolgono la materia di scarto solida, ma rappresentano anche un mezzo di supporto per la crescita dei batteri nitrificanti. In questo modo si concentra l'efficacia depurativa in un unico filtro basilare, riducendo al minimo la complessità di installazione e di funzionamento del sistema acquaponico. Inoltre, queste soluzioni hanno un costo minimo, non consumano energia e occupano poco spazio. Tuttavia, richiedono molta manutenzione e hanno una vita utile molto breve, se paragonata ai filtri automatizzati. Indubbiamente questa scelta impiantistica fornisce un livello di filtrazione ridotto che può soddisfare esigenze produttive limitate.

Oltre ai tradizionali filtri per acquari, un'altra soluzione domestica è fornita dai *raft filter*, tappetini di spugna che possono essere inseriti direttamente nelle vasche: l'acqua attraversa il filtro e i solidi vengono trattenuti dal supporto spugnoso. Si può realizzare una filtrazione progressiva disponendo più tappetini in serie con aperture diverse delle maglie. Questo sistema di filtrazione è estremamente semplice e richiede poca manutenzione.

Un'altra soluzione domestica è l'impiego di reti di nylon: in questo caso i solidi in sospensione aderiscono al supporto creando una sorta di biofilm, pertanto è una tecnica efficace ma richiede molta manutenzione. Le reti sono state utilizzate dall'Università delle Isole Vergini (UVI), la quale ha sviluppato un impianto acquaponico su grande scala, che sfrutta l'azione congiunta di un sedimentatore e di una rete di nylon.

5.7 TRATTAMENTI BIOLOGICI

L'equilibrio di un sistema acquaponico dipende fortemente dalla buona riuscita dei processi biologici, pertanto è essenziale scegliere e dimensionare correttamente la migliore tecnologia filtrante. Un sistema di filtrazione dimensionato in modo scorretto può causare infatti diversi squilibri e portare l'impianto al collasso. Col passare del tempo il sistema acquaponico diventa auto-regolante, per cui uno squilibrio interno può essere rilevato mediante lo stato di salute dei pesci, delle piante etc.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

In primo luogo, la nitrificazione batterica ha lo scopo di elaborare i prodotti metabolici dei pesci, vale a dire ammoniaca e nitriti presenti nelle vasche. Infatti, la maggior parte delle scorie azotate viene disciolta direttamente in acqua e non è filtrabile con i filtri meccanici, poiché si tratta di particelle troppo piccole per essere rimosse meccanicamente. Pertanto, per trattare questi rifiuti microscopici, un sistema acquaponico utilizza batteri microscopici (Somerville et al., 2014). La nitrificazione avviene nei filtri biologici, che devono essere opportunamente dimensionati secondo le esigenze di ciascun impianto. Tra gli effetti secondari della nitrificazione, si realizza l'ossigenazione del refluo, la rimozione di CO₂ e la trasformazione dell'azoto in forma gassosa.

In secondo luogo, i batteri eterotrofi realizzano la mineralizzazione dei rifiuti solidi trattenuti nei filtri meccanici, nei biofiltri o nei letti di crescita, rilasciando ulteriori nutrienti per le piante. Pertanto, una permanenza prolungata dei rifiuti solidi nel sistema può servire a nutrire meglio le colture idroponiche, purché si presti attenzione ai problemi di intasamento dei filtri. La mineralizzazione può avvenire in loco o in un serbatoio esterno: con quest'ultima opzione si raccolgono i rifiuti solidi che dopo un certo periodo saranno metabolizzati dall'attività batterica e l'acqua ricca di nutrienti potrà essere reimpressa nel sistema.

5.7.1 Biofiltri

Nei sistemi acquaponici il processo di nitrificazione avviene all'interno dei filtri biologici, ovvero dispositivi che facilitano la colonizzazione batterica e rappresentano il fulcro di un sistema a ricircolo. Si tratta di un processo a "colture adese" poiché i batteri nitrificanti, come *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, agiscono metabolicamente solo se aderiscono ad un substrato di supporto, fisso o mobile. In questo modo le colonie batteriche formano una pellicola biologica, chiamata "biofilm", che permane sul biofiltro finché non intervengono fenomeni metabolici che ne causano il distacco. La formazione del biofilm dipende molto dal tipo di materiale utilizzato, che può essere naturale o sintetico, e dalla sua scabrosità. Ad esempio, una superficie di supporto rugosa facilita la colonizzazione batterica rispetto ad una superficie liscia.

Un altro parametro che influenza significativamente il risultato della filtrazione biologica è la superficie specifica del filtro, ossia la quantità di superficie esposta per unità di volume [m²/m³]. In generale, più le

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

particelle del materiale del biofiltro sono piccole e porose, tanto maggiore è la superficie disponibile per la colonizzazione da parte dei batteri (Somerville et al., 2014). Nel caso in cui il biofiltro sia correttamente progettato, la nitrificazione può convertire fino al 95% dell'azoto ammoniacale in nitrati. Un buon sistema acquaponico deve essere progettato in modo da assicurare un certo livello di biofiltrazione già nei letti di crescita. Infatti, i *growbeds* idroponici come sabbia, perlite o pietrisco, si prestano bene alla crescita batterica. Pertanto, molti sistemi acquaponici non impiegano alcun biofiltro esterno, ma in questo caso occorre controllare eventuali problemi di intasamento del substrato.

Questa soluzione può funzionare molto bene nel caso di sistemi idroponici galleggianti (*floating systems*) in cui i supporti di polistirolo forniscono un adeguato mezzo di crescita batterica. Al contrario, non è applicabile nel caso di sistemi a ricircolo RAS, sistemi NFT, e in tutti quei casi in cui manca il substrato di crescita (tecniche *water-based*).

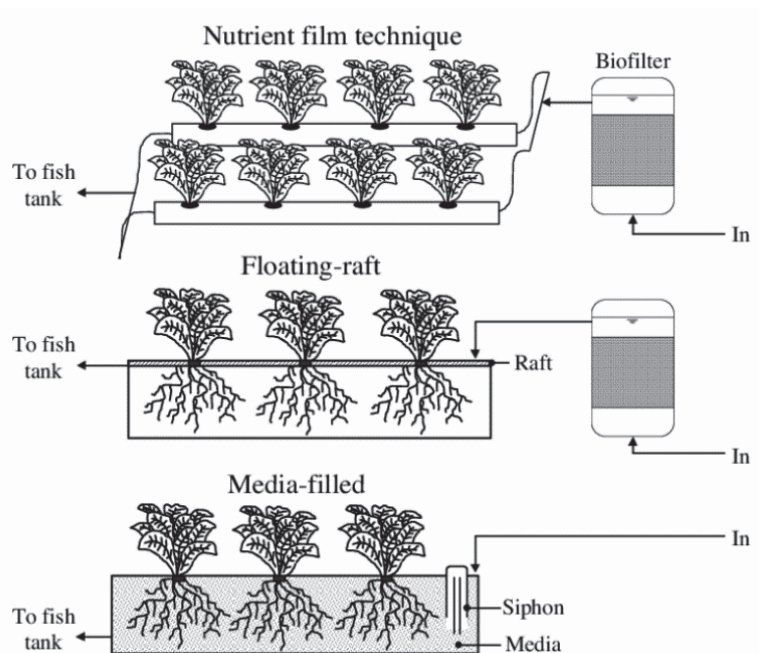


Figura 5-5 Introduzione del biofiltro a seconda di diversi sistemi idroponici (fonte: aquaponictrend.blogspot.com)

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Attualmente i biofiltri più diffusi sono: biofiltri percolatori, biofiltri MBBR (*moving bed biofilters*) e biofiltri a letto fluido.

5.7.2 Biofiltro a letto percolatore (Trickling bio-filter)

I letti percolatori rappresentano un metodo di filtrazione biologica tradizionale e molto utilizzato negli impianti di depurazione delle acque reflue. Per letto si intende una struttura in cui l'aria può circolare liberamente entro la massa di contatto, quindi il suo funzionamento è a pressione atmosferica. Mentre negli impianti di depurazione si sfruttano delle grandi vasche di cemento armato, in acquaponica può bastare un piccolo serbatoio che contiene il materiale di riempimento per la crescita batterica. Il liquame da trattare viene iniettato attraverso una canalizzazione centrale in modo da sviluppare il gocciolamento del refluo attraverso il mezzo di supporto. Questo moto di percolazione consente l'ossigenazione interna del biofiltro e permette ai batteri di formare il *biofilm*.

Per un'adeguata crescita batterica, occorre distribuire uniformemente il refluo sul materiale di supporto, per cui conviene inserire un braccio rotante per l'iniezione del refluo. Il materiale di riempimento deve essere durevole nel tempo, non solubile e possibilmente ruvido, per questo molto spesso si utilizzano ciottoli o ghiaia. Altre alternative includono le rocce laviche, gli aggregati di argilla espansa, i gusci d'ostrica o supporti plastici reperibili in commercio.

La formazione e il distacco del biofilm sono due processi spontanei che governano il funzionamento del sistema. Il biofilm si forma già a partire dalle prime gocce di refluo percolante, e si accresce sempre di più, strato dopo strato. Tuttavia, l'accrescimento è limitato poiché gli strati batterici interni hanno difficoltà ad accedere all'ossigeno e alla sostanza organica, e ciò ne comporta la scomparsa. Pertanto, si verifica un calo dell'aderenza sul biofiltro e il conseguente distacco del biofilm. Questo fenomeno viene inoltre facilitato dallo sviluppo di metanobatteri nelle zone anaerobiche più interne: il rilascio di biogas esercita una pressione tale da far distaccare il biofilm dalla superficie di supporto. Dunque, nella prima fase il biofilm si accresce sul biofiltro, mentre successivamente tende a distaccarsi autonomamente da esso. Il biofilm separato viene infine raccolto dal fondo del serbatoio.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Oltre ad un'efficiente ossigenazione, tra i vantaggi dei biofiltri percolatori c'è la semplicità di funzionamento e il costo ridotto di realizzazione. Inoltre, il moto percolatore del refluo consente anche l'espulsione di CO₂ e azoto gassoso. Viceversa, la bassa velocità di rimozione volumetrica, la distribuzione disomogenea dei batteri nitrificanti e l'eventualità di intasamenti, giocano a sfavore di questa tecnologia (Wei et al., 2019).

5.7.3 Filtri MBBR (Moving bed bio-reactors)

I reattori a letto mobile sono una tecnologia di filtrazione biologica già utilizzata negli impianti di depurazione e rappresentano un avanzamento del processo tradizionale a fanghi attivi. Si tratta di un processo a biomassa adesa per cui la colonia batterica si sviluppa sotto forma di biofilm su mezzi di supporto, detti "carriers", inseriti nel refluo da trattare. Questi ultimi sono mantenuti in movimento per effetto di insufflazione d'aria nella massa liquida, in modo da assicurare allo stesso tempo l'ossigenazione e la miscelazione del refluo (nel caso di processi anaerobici la miscelazione avviene per via meccanica). Il contatto frequente tra il materiale di supporto e la massa liquida, che prende il nome di "biofilm mobile", facilita lo sviluppo dei microrganismi, sia adesi che sospesi (Wei et al., 2019). Il distacco del biofilm dai mezzi di supporto è facilitato dal continuo sfregamento tra i carriers, e pertanto la manutenzione di questo sistema è limitata alla rimozione dei sedimenti accumulati sul fondo.

In acquaponica si può riprodurre questa tecnologia filtrante su piccola scala, attraverso un serbatoio contenente i supporti plastici all'interno delle acque da trattare. I carriers possono essere di diverse forme e dimensioni, e solitamente presentano delle cavità interne allo scopo di incrementare la superficie specifica. Il mezzo di crescita batterica può essere fornito anche da materiali riciclati (es. tappi di bottiglia) o naturali (es. ghiaia vulcanica), purché abbiano buone prestazioni all'interno del processo biologico. Per quanto riguarda invece i supporti reperibili in commercio, oggi si utilizzano soprattutto materiali plastici (polietilene, propilene etc.) come i Kaldnes e le Bioballs. Questi ultimi sono dei piccoli elementi di plastica sagomata con una superficie molto più grande del proprio volume (500-700 mq/mc). In ogni caso bisogna adoperare materiali resistenti, durevoli, inerti e facilmente lavabili.

Inizialmente il supporto galleggia nella vasca poiché ha una densità di poco inferiore a quella dell'acqua (*positive buoyancy*), mentre con il passare del

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

tempo e la formazione del biofilm, tenderà ad aumentare la sua densità fino a raggiungere uno stato di equilibrio neutro (*neutral buoyancy*), per cui può inglobarsi meglio nel moto di ribollimento del refluo.

La messa a regime di un sistema MBBR è più complessa rispetto a quella di un biofiltro percolatore, tuttavia i vantaggi sono molteplici: ossigenazione costante, elevata superficie specifica, processo autopulente, flusso idrico libero senza punti morti o zone anaerobiche.

5.7.4 Filtri a letto fluido (Fluidized-sand bio-filters)

I filtri a letto fluido sono essenzialmente filtri a sabbia che operano in continuo con modalità di espansione (contro lavaggio). Il livello di nitrificazione dipende fortemente dalla superficie esposta del letto sabbioso, che funge da supporto per la crescita batterica. L'acqua entra in circolo dal basso in modo da fluidificare la sabbia e incrementare la superficie disponibile. A differenza di un letto statico, il letto fluido ha un volume maggiore e tutte le particelle sono esposte al refluo in ingresso.

Attraverso il flusso continuo si può rimuovere la CO₂ e assicurare un livello di DO fino al 90%, ma ci vuole una velocità del flusso molto elevata per assicurare la totale espansione del letto del filtro (Wei et al., 2019).

I filtri a letto fluido possono rimuovere il 50-90% dell'ammoniaca, mantenendo i livelli di azoto ammoniacale e nitriti inferiori a 0,1-0,5 mg/l in acqua fredda e <0,1-0,3 mg/l in acque temperate (Summerfelt, 2006).

Si tratta di filtri compatti poiché assicurano un buon livello di biofiltrazione in volumi molto ridotti. Inoltre sono economici e possono lavorare con grandi portate in ingresso fino a 190 L/s.

5.8 TRATTAMENTI AVANZATI NEI SISTEMI ACQUAPONICI

La notevole diversificazione tra gli impianti acquaponici nel mondo (su piccola o grande scala, domestici o commerciali etc.) impedisce di stabilire una prassi esclusiva ed unitaria per il trattamento delle acque di ricircolo. Infatti, ogni processo depurativo deve essere sito-specifico al fine di soddisfare le particolari esigenze dell'impianto per cui è stato progettato. Tutt'oggi si ricercano continuamente nuove tecnologie di trattamento e

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

abbattimento dei contaminanti in acquaponica, per ottimizzare il ciclo dei nutrienti e la produttività del sistema.

L'arbitrarietà ricade non solo sulla scelta degli strumenti più adatti, ma anche sul carattere del trattamento implementato. In questo modo, i processi convenzionali di depurazione, filtrazione meccanica e biologica, possono essere sia ottimizzati da nuove tecnologie sia affiancati da nuovi trattamenti.

All'interno di questo capitolo saranno affrontate tre categorie di trattamenti avanzati per l'acquaponica:

- Filtrazione con bioreattori a membrana;
- Disinfezione con ozono gassoso;
- Disinfezione con raggi UV.

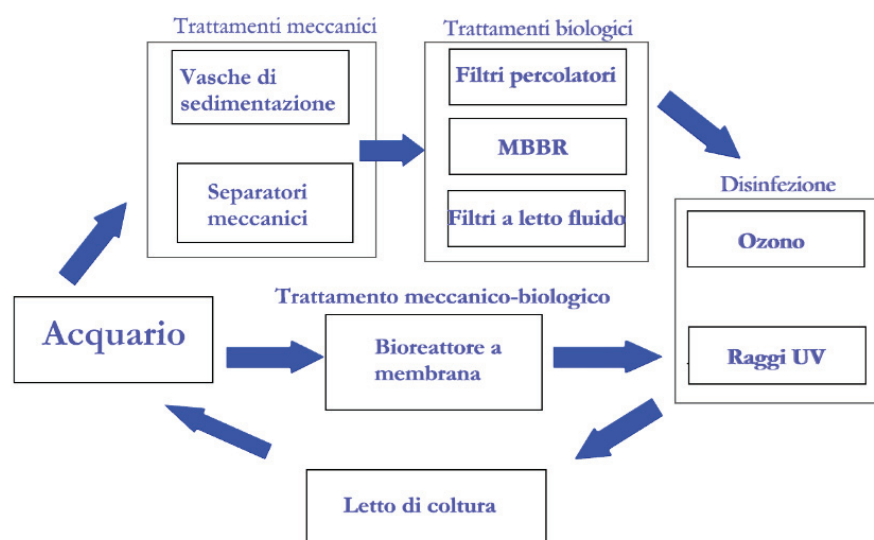


Figura 5-6 Sintesi dei possibili trattamenti implementabili in acquaponica

5.8.1 Bioreattori a membrana (MBR)

I bioreattori a membrana MBR (*Membrane Bio-Reactor*) sono una tecnologia di trattamento delle acque reflue che combina l'azione del processo a fanghi attivi e delle membrane porose per trattenere le sostanze sospese e disciolte in soluzione, sotto l'azione di una forza motrice. A seconda della

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

dimensione dei pori della membrana il processo viene distinto in: microfiltrazione, per la rimozione di batteri e solidi di piccole dimensioni; ultrafiltrazione, per la rimozione di virus; nanofiltrazione, per la rimozione di specie ioniche; osmosi inversa, per la desalinizzazione.

Il funzionamento delle membrane filtranti segue quello dei mezzi fisici di separazione: da un fluido in trattamento, o “alimento”, caratterizzato da una portata Q_{in} e dalla presenza di un contaminante in concentrazione C_{in} , si generano, dopo il passaggio attraverso la membrana, due correnti idriche, denominate rispettivamente, “permeato” (con portata $Q_{out} \leq Q_{in}$ e concentrazione $C_{out} \leq C_{in}$) e “retentato” o concentrato ($Q_{ret} = Q_{in} - Q_{out}$ e $C_{ret} \geq C_{in} \geq C_{out}$).

Per vincere la resistenza offerta dai pori al passaggio del fluido, si sfrutta solitamente la differenza di pressione, denominata pressione di transmembrana (TMP). Solitamente le prestazioni di una membrana sono valutate attraverso una variazione di TMP per avere una misura indiretta della permeabilità della membrana (Holan et al., 2014).

Infatti il funzionamento della membrana non è sempre ottimale nel tempo, a causa del graduale ricoprimento del substrato poroso da parte del refluo in trattamento. Quest'ultimo fenomeno è noto come *fouling* e può essere attribuito sia alla precipitazione di composti inorganici poco solubili (come il $CaCO_3$, ed in questo caso si parla di *scaling*), che ad inevitabili manifestazioni biologiche, generate da colonie microbiche che interagiscono con la membrana, usandola anche come supporto o come substrato (V. Naddeo, V. Belgiorno, 2013).

Il *fouling* può essere reversibile quando dipende da incrostazioni rimosibili fisicamente con contro-lavaggio o rilassamento in condizioni di crossflow, ed irreversibile quando dipende da incrostazioni eliminabili solo con la pulizia chimica (Judd, 2006; Jiang et al., 2003).

A seconda della geometria, si distinguono membrane piane e membrane cilindriche: le prime sono assemblate mediante moduli a lastre parallele, le seconde presentano moduli tubolari - capillari o a fibre cave - realizzati avvolgendo una membrana piana intorno ad una tubazione centrale che raccoglie il permeato.

A livello impiantistico sono possibili tre diverse soluzioni: *side-stream*, sommersa o integrata. La tipologia *side-stream* prevede l'allocazione della membrana all'esterno del reattore biologico, dal quale riceve il refluo

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

attraverso una pompa di alimentazione esterna e nel quale viene realizzato il ricircolo del permeato. Viceversa, nella configurazione sommersa le membrane sono sistemate nelle vasche biologiche e il permeato rappresenta l'unico flusso in uscita dal reattore, mentre il retentato resta al suo interno, contribuendo ad aumentare la concentrazione dei microrganismi (V. Naddeo, V. Belgiorno, 2013). Infine nella configurazione mista le membrane sono collocate all'esterno dei reattori biologici, ma immerse in unità differenti.

La configurazione sommersa, detta anche SMBR (*Submerged Membrane Bio-Reactors*) è generalmente più utilizzata delle altre in quanto coniuga la compattezza impiantistica al risparmio energetico dovuto alla mancanza di organi elettro-meccanici aggiuntivi.

Sebbene i primi impieghi dei bioreattori a membrana risalgano agli anni 70, il loro utilizzo in acquaponica è tutt'oggi argomento di studio e ricerca, ed è limitato a poche applicazioni sperimentali.

Per quanto riguarda i sistemi acquaponici e di acquacoltura a ricircolo, il principale vantaggio derivante dall'applicazione di una simile tecnologia è la possibilità di attuare contestualmente il processo biologico di trasformazione delle sostanze biodegradabili ed il processo meccanico di filtrazione. Inoltre, il trattamento a membrana è in grado di rimuovere le particelle più piccole (0,001-35 μm) che sfuggono alle tradizionali tecnologie filtranti e causano un incremento di BOD e il rallentamento della crescita ittica.

Chen et al. (1993) hanno caratterizzato i solidi sospesi in acquacoltura dimostrando che il 95% delle particelle solide arrivano a 20 μm , mentre l'80-90% del volume dei solidi totali (prefiltrati per rimuovere i solidi > 130 μm) arriva fino a 35 μm (Holan et al., 2014). Tuttavia le tecnologie tradizionali come i separatori a vortice e le vasche di sedimentazione, riescono a trattenere solo particelle solide con diametro maggiore di 100 μm , mentre i separatori meccanici a griglia e a tamburo possono arrivare ad un minimo di 30 μm (Wang et al., 2016).

Dunque, l'incorporazione della tecnologia MBR può non solo sostituire, ma anche migliorare l'efficacia filtrante dei separatori meccanici tradizionali. In particolare, le indagini sperimentali condotte da Di Bella (2008) su di un impianto pilota MBR hanno messo a confronto la capacità filtrante della membrana valutata tramite prove dirette di filtrazione (senza biomassa) e l'effetto aggiuntivo della membrana in merito alla rimozione

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

del substrato organico su di un effluente già sottoposto al processo. In primo luogo, nella prova di filtrazione diretta il maggior rendimento è stato ottenuto in termini di frazione sospesa (COD e BOD5), mentre è stato insignificante l'effetto della membrana sui composti organici in forma disciolta (tutte le forme azotate). In secondo luogo, il processo biologico ha contribuito al 70% nella rimozione del substrato organico, mentre solo il rimanente 20% è stato dovuto alla filtrazione attraverso la membrana.

Tali considerazioni trovano conferma in altri studi (Gander et al., 2000; Lee et al., 2003; Smith et al., 2003), che riportano contributi della membrana nella rimozione della sostanza organica pari al 20-30% del rendimento totale di rimozione. La membrana è quindi in grado di svolgere la sua attività selettiva in maniera efficiente soprattutto per quei composti che si trovano sotto forma particolata, mentre risulta minore (anche se non trascurabile) il rendimento di rimozione dei composti che si presentano in forma solubile (V. Naddeo, V. Belgiorno, 2013).

Alla luce di queste considerazioni, i sistemi di acquaponica e di acquacoltura a ricircolo possono beneficiare dall'installazione di una tecnologia MBR. Infatti in questo caso la filtrazione su membrana può rimuovere selettivamente i solidi sospesi derivanti dagli scarti fecali dei pesci andando ad agire come un mezzo di chiarificazione.

Inoltre, la ridotta capacità di rimozione di composti azotati risulta in effetti benefica nei confronti del ciclo acquaponico: in assenza di azoto ammoniacale non sarebbe possibile realizzare la nitrificazione batterica.

In effetti, i sistemi MBR possono lavorare con tempi di ritenzione dei solidi più lunghi, in modo da rendere possibile il trattenimento dei batteri nitrificanti a crescita lenta: come risultato, il tasso di nitrificazione può essere potenziato (Mohan & Nagalakshmi, 2020).

In più, l'utilizzo di una membrana del tipo sommersa può avvantaggiare la filtrazione biologica poiché facilita la crescita batterica e permette una conversione più efficace dei nitriti in nitrati. Holan et al. (2014) hanno esaminato gli effetti di un trattamento a membrana all'interno di un sistema di acquacoltura a ricircolo per la produzione di merluzzo, confrontandolo con un sistema a ricircolo convenzionale. Attraverso una doppia filtrazione giornaliera di tutto il volume di ricircolo, il bioreattore a membrana ha potuto ridurre la torbidità e il numero di particelle colloidali, rispettivamente fino al 38% e al 77% in più rispetto ai trattamenti convenzionali. In questo modo il tasso di sopravvivenza e di

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

crescita del merluzzo sono aumentati del 3,5% e del 13% in peso. Infatti una minore torbidità può aumentare il benessere della fauna ittica poiché le particelle colloidali compromettono le branchie dei pesci (Bullock et al., 1994; Timmons and Ebeling, 2007). Un altro parametro fondamentale per la crescita ittica è riconducibile alla proliferazione di microrganismi potenzialmente lesivi. A questo proposito i risultati sperimentali hanno dimostrato un abbattimento della carica batterica fino all'80% maggiore nel trattamento con membrana, con valori più stabili della crescita microbica. In più, nel sistema con MBR sono stati rilevati valori di NH₃ fino al 58% inferiori rispetto al sistema tradizionale, e valori di carbonio organico disciolto (fTOC) fino al 52% più bassi.

L'unità filtrante a membrana ha mostrato prestazioni soddisfacenti con sviluppo del fouling relativamente basso. Un altro studio interessante è stato condotto da Wang et al. (2016) per monitorare gli effetti dell'integrazione di un processo a membrana all'interno di un impianto acquaponico a ricircolo - con produzione di tilapia e spinaci d'acqua - rispetto ad un impianto tradizionale senza MBR per una durata totale di 12 settimane.

Nel bioreattore è stata impiegata una membrana sommersa a fibre cave in polivinilidene fluoruro. Questa soluzione impiantistica innovativa è riuscita a migliorare l'efficacia del trattamento biologico complessivo, trattenendo una maggiore carica batterica all'interno del bioreattore, con un conseguente potenziamento dell'azione nitrificante.

Viceversa, è stato rilevato un incremento di DO nelle vasche e una riduzione significativa di composti azotati nocivi. Il successo del trattamento è risultato evidente soprattutto in termini di produttività: il rendimento agricolo totale, l'aumento finale di biomassa acquatica e il tasso di crescita dei pesci sono stati rispettivamente del 34%, 69% e 54% più alti rispetto al sistema tradizionale senza MBR. In breve, i punti di forza dei sistemi MBR sono i seguenti (V. Naddeo, V. Belgiorno, 2013):

- Il ciclo del trattamento è semplificato e gli impegni di superficie e volume sono più contenuti;
- Le prestazioni depurative sono elevate e non dipendono dalla sedimentabilità dei solidi;

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

- Si realizza la trasformazione per via biologica di composti lentamente biodegradabili favorendo la proliferazione di specie batteriche benefiche;
- Si prestano bene agli interventi di adeguamento di impianti esistenti.

5.8.2 Membrane dinamiche auto-formanti (SFDM)

Una valida alternativa alle membrane tradizionali è rappresentata dalle membrane dinamiche DM (dynamic membrane). In questo caso la membrana si forma sul materiale poroso di supporto attraverso la deposizione delle particelle solide (nel caso della filtrazione di una soluzione contenente solidi sospesi).

Le membrane dinamiche possono essere classificate in due categorie: pre-rivestite PDM (precoated dynamic membrane) o auto-formanti SFDM (self-forming dynamic membrane).

In primo luogo, le membrane pre-rivestite si formano al passaggio di una soluzione contenente una o più componenti colloidali attraverso il materiale di supporto (C. Wang et al. 2015).

Secondariamente, le membrane auto-formanti sono prodotte dalla deposizione di composti organici, colloidali e solidi sospesi della miscela chiarificata sul materiale di supporto. Queste membrane utilizzano lo strato di “cake” (cake layer) come una membrana per la separazione solido-liquido (M. Saleem et al. 2017). Si tratta di una tipologia unica nel suo genere in quanto sfrutta i contaminanti per creare uno strato di filtrazione che può agire come una membrana (O. Cinar et al. 2013).

La tecnologia che combina un sistema a fanghi attivi con una membrana auto-formante prende il nome di sistema SF-DMBR (self-forming dynamic membrane bio-reactor).

I sistemi SFDMBR presentano i seguenti vantaggi rispetto ai convenzionali MBR: flusso elevato e bassa resistenza alla filtrazione, facile controllo del fouling, costi e dispendio energetico ridotti, e facile manutenzione (Xiong, 2014).

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

I materiali di supporto possono essere di diverso tipo, come acciaio inossidabile, fibre di nylon, fibre di poliestere e tessuti con apertura dei pori da 10 μm a 2 mm.

Per quanto riguarda la formazione della superficie filtrante, occorre distinguere due strati: il cake layer e il gel layer (Mohan & Nagalakshmi, 2020). Lo strato “di torta” è formato dalla deposizione di grosse particelle di fango e avviene subito dopo l’avvio del trattamento. Lo strato “di gel” si forma a causa della deposizione di colloidali, prodotti microbici solubili ad elevato peso molecolare e polimeri extracellulari.

Il primo strato è responsabile di quasi il 90% del processo di filtrazione complessivo, mentre il secondo strato realizza la filtrazione delle particelle più fini.

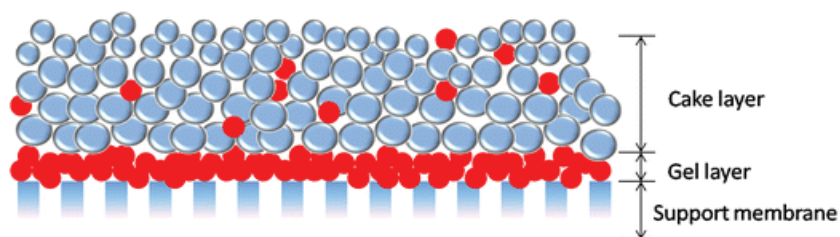


Figura 5-7 Stratificazione della membrana auto-formante (fonte: link.springer.com, Zhang et al. 2014)

Il processo di filtrazione su SFDMBR include 3 stadi:

- Formazione della membrana;
- Maturazione e stabilizzazione del trattamento;
- Pulizia e rigenerazione della membrana

La dinamica del trattamento può essere seguita mediante due parametri: il flusso e la torbidità. Il passaggio iniziale del refluo attraverso il materiale di supporto ancora pulito produce un effluente con alta torbidità e flusso elevato poiché in questa fase la membrana non è ancora formata. Successivamente si osserva una netta riduzione nella torbidità dell'effluente ($<5 \text{ NTU}$), congiuntamente a un improvviso decremento nel flusso del permeato, dovuti alla deposizione dei solidi sul materiale di supporto (Y. Hu et al. 2016). Dato che la riduzione della torbidità è legata ai trattamenti di microfiltrazione, una consistente riduzione della torbidità

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

suggerisce che il sistema SFDM si comporta come un processo di microfiltrazione (F. Rezvani et al. 2014).

Il tempo impiegato per la formazione della membrana può variare da pochi minuti ad alcuni giorni, in base alla grandezza dei pori del materiale di supporto, alle dimensioni dei solidi in soluzione, alle caratteristiche del fango e alle condizioni operative (Mohan & Nagalakshmi, 2020).

Una volta messa a regime la membrana, inizia la fase di maturazione – che dura da poche ore a molti giorni - in cui il permeato acquisisce valori pressoché stabili fino alla formazione del *fouling*: tutti i solidi che si depositano sulla membrana dopo questa fase rappresentano i “*foulants*” che incrementano la resistenza alla filtrazione.

In termini impiantistici, si possono implementare membrane SFDM piane (*flat sheet*) o tubolari, con configurazione sommersa o *side-stream* come le membrane convenzionali.

Attualmente le applicazioni delle membrane auto-formanti sono limitate, e in letteratura non ci sono evidenze del loro impiego nei sistemi a ricircolo. Pertanto, per valutare l'efficacia di questa tecnologia in acquaponica, si può fare riferimento ai risultati sperimentali ottenuti in merito alla riduzione della torbidità, ammoniaca (NH₃), azoto totale (TN) e fosforo totale (TP) su acque reflue di scarico civile.

Mohan & Nagalakshmi hanno confrontato diverse attività sperimentali determinando che la torbidità dell'effluente a valle del trattamento con membrana oscilla - nella quasi totalità dei casi - tra 0,5 NTU e 25 NTU, denotando una buona efficacia della membrana nell'abbattimento della torbidità, talvolta maggiore dei sistemi MBR.

In secondo luogo, la rimozione dell'azoto ammoniacale è risultata sempre maggiore del 90%, e poiché all'interno delle membrane prevalgono condizioni aerobiche, è garantita altresì l'ossidazione dell'ammoniaca in nitrati. Inoltre, Saleem et al. hanno riportato buone prestazioni della membrana anche in presenza di elevate concentrazioni di ammoniaca, che di norma comporterebbero l'inibizione dei processi di nitrificazione e denitrificazione.

Al contrario, l'efficacia di rimozione dell'azoto totale TN (NH₃, NO₂, NO₃ e composti organici azotati) è risultata scarsa nella maggior parte delle applicazioni, a causa della mancanza di condizioni anaerobiche.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Questo risultato è sconveniente per i processi di depurazione in cui occorre rimuovere i nutrienti dalle acque, ma risulta vantaggioso per le produzioni acquaponiche poiché in questo caso solo l'ammoniaca e i nitriti rappresentano una potenziale minaccia per il sistema, mentre i nitrati vanno mantenuti all'interno delle acque.

Oltre ai nitrati, anche il fosforo non è molto sensibile alla filtrazione su membrana, come confermano i risultati della rimozione del fosforo totale TP che è risultata $< 50\%$ in quasi tutte le prove. Millanar et al. hanno utilizzato una membrana auto-formante in tessuto *Dacron* per la depurazione di reflui civili ottenendo un tasso di rimozione di COD, NH₄-N e PO₄-P del 95%, 47% e 14% rispettivamente. Ciò dimostra che la membrana ha potuto trattenere sia i solidi che i batteri nitrificanti, mentre le condizioni aerobiche non hanno favorito la proliferazione dei microrganismi PAO (*phosphate accumulating organisms*) che partecipano alla rimozione del fosforo (Millanar-Marfa J.M.J. et al., 2019).

Alla luce di tali considerazioni, le membrane auto-formanti sembrano essere efficaci nell'ottica dei sistemi acquaponici poiché eliminano selettivamente i composti nocivi senza allontanare i nutrienti necessari per la produzione agricola.

5.8.3 Meccanismi di disinfezione

La disinfezione delle acque è un trattamento terziario che viene effettuato per soddisfare standard di qualità elevati come nel caso delle acque potabili.

Questo trattamento ha lo scopo di ridurre la carica batterica presente in soluzione attraverso l'uccisione e l'inattivazione dei microrganismi che possono costituire un rischio per la salute umana. Pertanto, la disinfezione mira all'eliminazione della sola carica patogena e si distingue dalla sterilizzazione, per cui si intende l'eliminazione di qualsiasi forma vivente.

L'individuazione dei microrganismi patogeni (virus e batteri) è difficile ed onerosa, e ai fini della caratterizzazione biologica dell'acqua si ricorre alla determinazione di organismi indicatori, noti come coliformi, un gruppo di batteri appartenenti alla famiglia delle Enterobacteriaceae, che sono di facile individuazione con la tecnica delle membrane filtranti.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

La famiglia dei coliformi da rilevare ai fini di legge (DLgs 152/99) è quella dell'*Escherichia Coli*, batteri appartenenti alla specie dei coliformi fecali. Si tratta di batteri che risiedono nell'intestino di molti animali a sangue caldo, compreso l'uomo, per cui una massiccia presenza di *E. Coli* nei corpi idrici indica una contaminazione di origine fecale. Nelle acque trattate a valle degli impianti di depurazione la presenza di *E. Coli* deve essere, per legge, inferiore a 5000 UFC / 100 ml.

Negli impianti acquaponici il rischio di contaminazione fecale da *Escherichia Coli* è relativamente basso in quanto i pesci sono animali a sangue freddo che non supportano un'elevata proliferazione di batteri enterici. Tuttavia il rischio permane nel caso in cui si utilizzi acqua di scarsa qualità o nel caso di diretto contatto con gli scarti fecali di animali a sangue caldo (Al-Harbi, 2003). I batteri fecali possono passare dagli acquari ai letti di crescita, fino a raggiungere i prodotti vegetali. Pertanto è sempre utile prevedere un livello di igiene adeguato all'interno di un sistema acquaponico e disporre, ove possibile, di un trattamento terziario di

disinfezione, analogamente a quanto accade negli impianti di depurazione.

Gli agenti disinfettanti più comuni nel trattamento delle acque sono di natura fisica (calore, radiazioni UV) o chimica (cloro, ozono, perossido di idrogeno).

A seconda dei meccanismi di disinfezione utilizzati, la riduzione della carica patogena può avvenire per danneggiamento delle pareti cellulari, alterazione della permeabilità cellulare, alterazione della natura colloidale del protoplasma, inibizione dell'attività enzimatica o alterazione del DNA e RNA degli organismi.

L'efficienza di disinfezione dipende da:

- Concentrazione del disinfettante (dose);
- Natura e intensità dell'agente;
- Tipo e quantità di microrganismi;
- Tempo di contatto;
- Parametri di qualità delle acque (T, pH, torbidità)

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

C'è una crescente sensibilizzazione nei riguardi della disinfezione delle acque reflue nell'ambito dei sistemi a ricircolo.

In molti casi la presenza di standard microbiologici da rispettare aiuta il controllo e la diffusione di malattie nell'industria ittica.

La tipologia del refluo da trattare e i microrganismi presenti possono influenzare la modalità di disinfezione, la dose e il dimensionamento dell'unità di disinfezione (Liltved et al., 1995; Bullock et al., 1997).

5.8.4 Processi di ossidazione avanzata (AOPs)

Nel panorama della disinfezione delle acque reflue sempre più attenzione viene rivolta ai processi di ossidazione avanzata (Advanced Oxidation Processes AOPs), introdotti per la prima volta negli anni 80 e utilizzati per la produzione di acqua potabile.

Gli AOPs sono processi basati sulla produzione di radicali ossidrilici liberi (OH⁻), una specie chimica altamente reattiva che attacca la sostanza organica e gli inquinanti tossici degradandoli in sottoprodotti semplici e privi di tossicità, come anidride carbonica e bicarbonati (mineralizzazione). Il processo implica la riduzione del carbonio organico totale (TOC) e porta alla decolorazione, deodorizzazione e disinfezione dei campioni acquosi (Capobianco et al., 2012).

Nei processi AOPs i radicali OH⁻ sono generati in quantità sufficienti per rimuovere la sostanza organica refrattaria, i contaminanti organici tracciabili e certi inquinanti inorganici, o per aumentare la biodegradabilità del refluo nell'ottica del seguente trattamento biologico (Deng & Zhao, 2015). Pertanto nell'ambito di un trattamento AOPs si consegue un duplice risultato: rimozione/degradazione di inquinanti organici e simultanea disinfezione.

I trattamenti AOPs includono: ossidazione fotocatalitica, processo Fenton, cavitazione a ultrasuoni e radiazioni ionizzanti. Infatti, a livello tecnico, la produzione di radicali ossidrilici può avvenire grazie a diverse combinazioni: due sostanze chimiche, un ossidante e la radiazione ultravioletta, la radiazione ultravioletta con acqua o mediante fotocatalizzatore.

Nell'ambito dei sistemi di acquaponica e acquacoltura a ricircolo c'è un interesse crescente verso i processi di ossidazione avanzata AOPs.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

In questo caso il trattamento più adoperato è quello che prevede l'integrazione di luce ultravioletta e ozono gassoso (O₃ + UV).

Infatti l'utilizzo combinato di questi due agenti disinfettanti si è rilevato altamente performante poiché porta alla formazione di ossidanti aggiuntivi attraverso la fotolisi dell'ozono (Deng & Zhao, 2015):



5.8.5 Ozono

L'ozono (O₃) è un agente disinfettante molto efficace con una scarsa tendenza a creare sottoprodotti tossici, per cui viene spesso impiegato nel trattamento di acque reflue destinate al ramo domestico, farmaceutico e alimentare.

Si tratta di un gas dal forte potere ossidante in grado di esercitare un'azione battericida e virucida attraverso la distruzione delle membrane cellulari, da cui deriva la possibilità di impiego negli impianti acquaponici o di acquacoltura a ricircolo. In questo modo l'ozonazione delle acque reflue può consentire non solo una buona disinfezione, ma anche l'ossidazione di solidi, composti azotati e sostanze organiche non biodegradabili (Summerfelt & Hochheimer, 1997).

L'applicazione dell'ozono in un sistema a ricircolo richiede la produzione, il trasferimento in soluzione, il tempo di contatto e possibilmente la sua conseguente eliminazione per evitare che i residui di ozono arrivino ai letti di crescita (Summerfelt and Hochheimer, 1997).

Per produrre ozono, occorre realizzare un processo di dissociazione dell'ossigeno molecolare, mediante scariche elettriche del tipo *corona discharge*. o per azione fotochimica con luce ultravioletta.

La reazione di produzione di ozono è la seguente:



Una volta prodotto, l'ozono gassoso è una molecola molto instabile che si decompone velocemente dopo la sua iniezione in acqua, e pertanto deve essere generato in situ. In acqua l'ozono forma radicali ossidrilici liberi (HO e HO₂) che conferiscono un elevato potere ossidante.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

La reazione di formazione dei radicali OH⁻ è la seguente:



Temperatura, pH, carbonio organico totale e bicarbonati sono alcuni dei fattori che influenzano la decomposizione dell'ozono e la sua efficacia ossidante (Gonçalves & Gagnon, 2011).

Inoltre, la velocità di decomposizione aumenta nel caso di impurità organiche e al crescere del pH.

La disinfezione a ozono nei sistemi acquaponici può essere svolta in continuo, attraverso numerosi trattamenti al giorno, o con un singolo trattamento discontinuo. A questo proposito, la disinfezione può essere effettuata sulla base del regime alimentare delle specie acquatiche: la concentrazione di scarti fecali e azotati raggiunge un picco nelle 3/4 ore successive alla nutrizione dei pesci. Pertanto, se il mangime è introdotto in maniera puntuale negli acquari, si può optare per un trattamento a ozono discontinuo, viceversa è consigliabile utilizzare il trattamento in continuo quando c'è un apporto costante di alimenti.

Per quanto concerne la quantità di ozono in ingresso, è opportuno seguire nuovamente il regime alimentare dei pesci: si raccomandano 10-15 g di ozono per Kg di mangime (Gonçalves & Gagnon, 2011).

Oltre alla rimozione della carica batterica patogena, la disinfezione con ozono si è dimostrata efficace nella rimozione della sostanza solida, nella stabilizzazione della qualità dell'acqua, nella sedimentazione e nella dissoluzione di particelle non biodegradabili. Rueter e Johnson (1995) hanno dimostrato che la presenza di ozono in soluzione migliora la flocculazione delle particelle grossolane e pertanto l'integrazione del gas prima della sedimentazione migliora la rimozione dei solidi sospesi.

Summerfelt et al. (1997) hanno sperimentato l'ozonazione in un sistema di acquacoltura a ricircolo per l'allevamento della trota allo scopo di ossidare i nitriti e il materiale organico, migliorare la qualità generale dell'acqua e assistere la rimozione dei solidi nel filtro meccanico. L'aggiunta di ozono in soluzione (25-39 g ozono/kg mangime) ha ridotto la concentrazione dei solidi sospesi totali (TSS) del 35%, la domanda chimica di ossigeno (COD) del 36%, il carbonio organico disciolto (DOC) del 17%, la concentrazione di nitrati e il colore dell'82% all'interno della vasca di allevamento (Gonçalves & Gagnon, 2011).

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Edwards et al. (1993) hanno notato che l'ozono può agire per rimuovere il carbonio (TOC) in due modi: attraverso l'ossidazione della sostanza organica o migliorando la coagulazione delle particelle dal contenuto organico, e hanno inoltre riscontrato che l'ozonazione migliora il tasso di rimozione delle particelle anche nel caso di una dose minore di 0,7 mg di ozono/mg TOC.

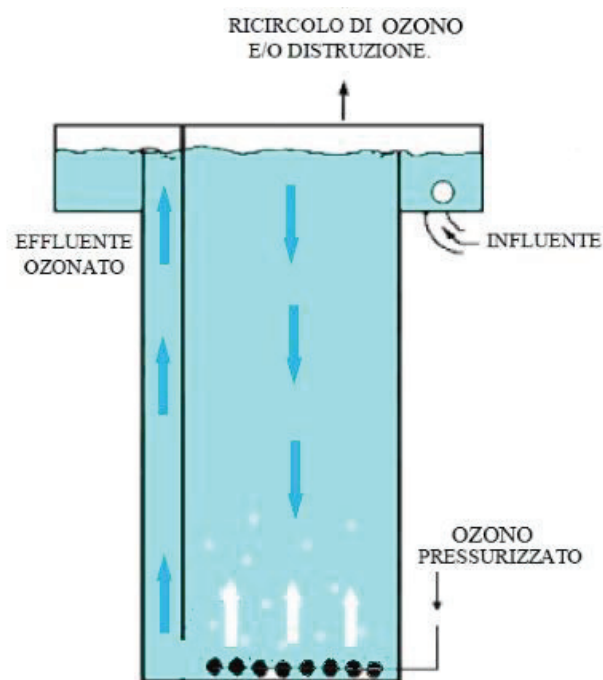


Figura 5-8 Reattore a ozono

Tra i principali vantaggi dell'ozono c'è la scarsa tendenza a formare sottoprodotti tossici (solo in presenza di bromuri) e la velocità di azione. Inoltre l'efficacia germicida è maggiore rispetto ad altri agenti disinfettanti (cloro e biossido di cloro) e non è influenzata dalle variazioni di pH.

Tra i principali svantaggi ci sono invece i costi di produzione e di gestione, e la difficoltà nel rimuovere l'ozono residuo a valle del trattamento.

Le problematiche derivanti dal sovradosaggio del gas in soluzione possono impattare negativamente sulla salute delle specie acquatiche determinandone la morte prematura. Infatti si tratta comunque di un gas tossico e altamente corrosivo che va maneggiato con cautela.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Esistono in commercio numerosi sistemi di diffusione dell'ozono in acqua, tra cui diffusori a bolle fini, iniettori, turbine elettromeccaniche, colonne a riempimento, miscelatori statici e *spray chambers* (Gonçalves & Gagnon, 2011).

5.8.6 Raggi UV

L'applicazione della luce ultravioletta come strumento di disinfezione rappresenta una tecnologia altamente efficiente ed ecosostenibile, e trova oggi largo impiego nei sistemi acquaponici e di acquacoltura a ricircolo.

Il potere disinfettante delle radiazioni UV deriva dalla capacità di penetrare a livello cellulare sul DNA dei microrganismi, impedendone la replicazione e causandone l'uccisione.

I raggi UV fanno parte di un intervallo di radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda compresa tra 100 e 400 nm, inferiore alla luce visibile e superiore ai raggi X, capace di degradare la sostanza organica. Di questo spettro elettromagnetico, il *range* germicida è compreso tra 220 e 320 nm (principalmente onde corte UV, UV-C). L'ultravioletto a onda corta (UVC) con lunghezza d'onda di 250-260 nm (254 nm è il valore ottimale) rappresenta l'intervallo battericida più efficace per trattare i reflui in acquacoltura (Wei et al., 2019).

In molti studi scientifici, l'uso efficiente del trattamento a UV ha suggerito la riduzione di un'abbondanza di batteri patogeni sospesi in soluzione, riducendo la probabilità di una contaminazione incrociata tra acqua e tessuto vegetale (Elumalai et al., 2017).

Pantanella et al. (2010) hanno dimostrato che l'utilizzo di UV a 300 Ws/m² nella produzione di lattuga ha portato a una conta totale dei coliformi minore di 1 UFC/g e ad una riduzione della carica microbica maggiore del 99%, senza alterazioni significative sui prodotti vegetali.

Rispetto al trattamento con ozono, la disinfezione a raggi UV presenta numerosi vantaggi: non modifica le caratteristiche organolettiche delle acque, non implica l'aggiunta di sostanze chimiche esterne e non produce in nessun caso sottoprodotti potenzialmente nocivi. In questo modo si può prevenire la mortalità delle specie ittiche dovuta al sovradosaggio di ozono in soluzione. Tuttavia gli UV non presentano la caratteristica di persistenza necessaria ad impedire la ricontaminazione del fluido in

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

seguito al trattamento (caratteristica che diventa importante nel caso di riutilizzo agricolo con irrigazione su colture destinate al consumo crudo).

Inoltre l'efficacia di disinfezione si esplica solo sui batteri direttamente esposti alla radiazione, e non su quelli annidati nelle particelle organiche. Infatti all'aumentare della torbidità dell'acqua - dovuta alla presenza di solidi sospesi in soluzione - corrisponde un decremento dell'azione disinfettante poiché le zone d'ombra assorbono la luce ed esercitano un'azione protettiva nei confronti della carica batterica.

Dunque, per ottimizzare l'efficacia disinfettante, l'acqua in ingresso deve essere sufficientemente libera da composti sospesi e per questa ragione la disinfezione è un trattamento terziario che va collocato a valle dei processi di filtrazione.

In particolare, Timmons and Ebeling (2007) suggeriscono che l'acqua debba essere filtrata con un filtro da 50 μm prima di essere esposta alle radiazioni UV, allo scopo di migliorare l'efficienza del trattamento nei sistemi a ricircolo (Elumalai et al., 2017).

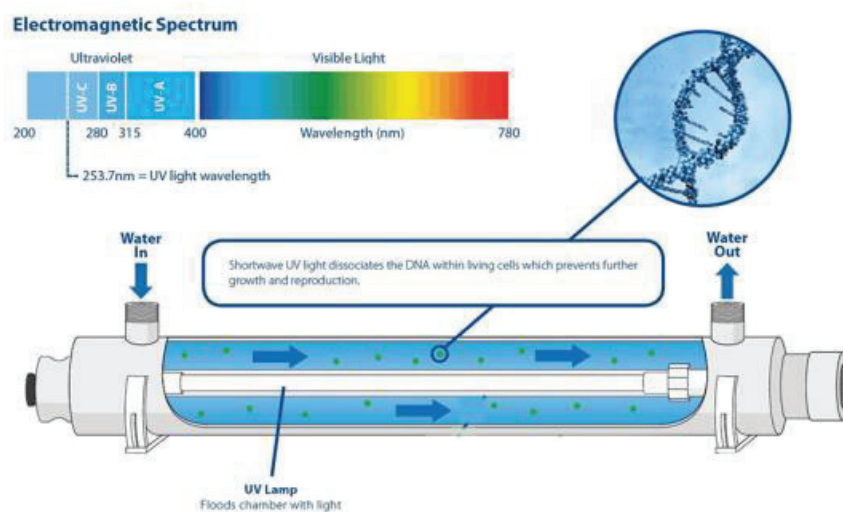


Figura 5-9 Funzionamento di una lampada UV (fonte: www.alfaaUV.com)

Il trattamento a UV viene realizzato mediante l'uso di lampade a mercurio, che si differenziano per pressione e intensità. A parità di pressione del mercurio nella lampada, un aumento di intensità comporta maggiore irraggiamento luminoso e dunque un minore tempo di contatto per la

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

disinfezione. D'altronde un incremento dell'intensità luminosa, paragonabile alla dose degli agenti disinfettanti liquidi, ha un'efficacia maggiore rispetto al prolungamento del tempo di esposizione.

Le soluzioni impiantistiche per l'applicazione dei raggi UV prevedono sistemi a canale aperto, con lampade parallele al flusso idrico, e a canale chiuso, con lampade perpendicolari al flusso.

5.9 ESEMPI APPLICATIVI DEL RECUPERO DEI NUTRIENTI IN ACQUAPONICA

I metodi per ottenere il recupero dei nutrienti in acquaponica possono essere sia di tipo chimico, sia biologico. Tra trattamenti chimici ci sono i letti galleggianti, coagulazione, flocculazione, l'adsorbimento e la precipitazione (Oladoja et al., 2015), ma questi possono dar luogo a residui chimici.

Per questo motivo, solitamente si opta per processi biologici che sfruttano la capacità batterica o di microalghe per trasformare i composti chimici in nutrienti.

Per ottenere il recupero dei nutrienti dall'acquaponica è necessario operare un'efficace separazione dei fanghi di pesce. Le tecnologie più utilizzate per la separazione dei solidi includono metodi meccanici e gravitazionali. Nell'acquacoltura e nelle applicazioni acquaponiche solitamente si utilizzano i filtri a tamburo, i microschermi rotanti e i chiarificatori.

La mineralizzazione dei nutrienti dei fanghi di pesce può essere ottenuta in condizioni aerobiche e anaerobiche tramite degradazione e conversione microbica, infatti i microrganismi decompongono i solidi organici in nutrienti solubili che possono essere utilizzati dalle piante.

I filtri biologici aerati (BAF) sono mezzi granulari per la crescita di colture adese. Quando l'acqua passa attraverso il BAF, i solidi sospesi e le particelle fini vengono rimossi dalla filtrazione e flocculazione dei microrganismi. Il materiale filtrante può ospitare un numero considerevole

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

di batteri nitrificanti per rimuovere l'azoto ammoniacale e degradare le sostanze organiche.

Alcuni autori hanno utilizzato BAF con ceramsite e segatura per il recupero di nutrienti da reflui acquaponici (Zhang et al., 2020). Con i BAF si può ottenere la separazione dei fanghi di pesce e la conversione dei nutrienti raggiungendo un'alta capacità di mineralizzazione. Le concentrazioni medie di macronutrienti N, P, K, Ca, Mg e S hanno raggiunto rispettivamente il 12,3%, 11,8%, 4,5%, 26,4%, 22,6% e 46,0% di quelle della soluzione nutritiva Hoagland. I micronutrienti Fe, Mn e B recuperati sono rispettivamente 10,0%, 12,0% e 18,0%, mentre Cu, Zn e Mo sono 1,5, 1,8 e 1,0 volte, rispettivamente, di quelli della soluzione nutritiva Hoagland.

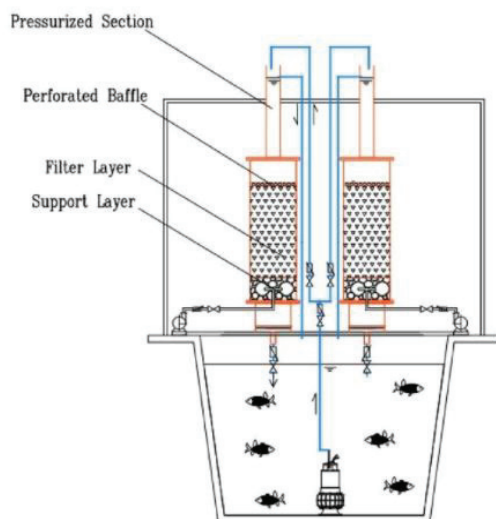


Figura 5-10 Trattamento con BAF (Fonte: Zhang et al., 2020)

In un centro di ricerca sull'acquacoltura è stata invece valutata la creazione di diversi tipi di compost a base di scarti di pesce da utilizzare come ammendanti per il terreno. I risultati delle analisi chimiche hanno mostrato la fattibilità della conversione di questi rifiuti in compost ricchi di nutrienti tali da poter essere reintrodotti in agricoltura in sostituzione di fertilizzanti chimici (Lopes et al., 2021).

Presso l'Università delle Hawaii a Manoa, è stato testato, invece, un sistema di osmosi inversa per il trattamento delle acque reflue

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

dell'acquacoltura. In questo modo il permeato ottenuto dal sistema può essere riutilizzato come fonte di acqua depurata per la piscicoltura, mentre gli scarti, ricchi di nutrienti possono essere trasformati in mangime per pesci con ulteriori trattamenti (C. C. K. Liu et al., 2007).

Come visto in precedenza, il fosforo è un elemento essenziale per i pesci, pertanto viene introdotto in acquacoltura attraverso i mangimi. In realtà, i pesci assimilano solo il 20-40% del fosforo introdotto, la restante percentuale viene rilasciata in acqua. In uno studio di ricerca si è analizzato un sistema di acquacoltura a ricircolo intensivo in grado di abbattere i contenuti di fosforo a percentuali $<1\%$ (Yogev et al., 2020). Del fosforo introdotto, il 29,5% è stato assimilato dai pesci, il 69,8% è stato trovato nei sedimenti e il 3,8% è stato rilasciato nell'acqua in forma solubile. Il fosforo è stato assorbito mediante denitrificazione da parte di organismi accumulatori di polifosfati e successivamente precipitato nel reattore anaerobico del RAS. In questo modo si è arrivati ad un recupero del fosforo del 69% ed inoltre, il fango trattato è stato testato come potenziale fertilizzante.

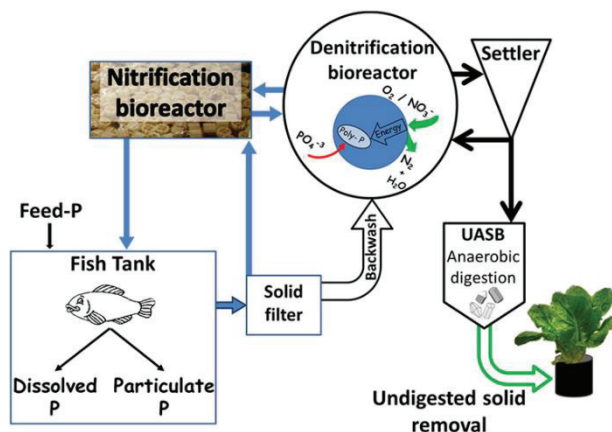


Figura 5-11 Recupero del fosforo (Fonte: Yogev et al., 2020)

Una tecnica di recupero di azoto e fosforo che potrebbe essere presa in prestito da quelle per i reflui urbani è lo scambio ionico in tre stadi. Si prevede una prima sedimentazione e successivamente si fa entrare l'effluente in un sistema a colonna composta da resine combinate sia cationiche che anioniche. Le resine cationiche con zeolite naturale rimuovono gli ioni ammonio, le resine anioniche rimuovono gli ioni fosfato. Gli effluenti dello scambio ionico vengono arricchiti di fosfato e

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

di ammonio e mescolati in un reattore per ottenere la precipitazione della struvite (minerale, fosfato idrato di ammonio e magnesio). Con questo metodo si arriva alla rimozione di circa il 90% del fosforo.

Un altro metodo per recuperare i nutrienti è l'UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket). Dall'effluente UASB nitrificato, ultrafiltrato e trattato con luce UV di un impianto di produzione di patate si è arrivati a recuperare l'80% e il 75% del nitrato-N e del potassio (Meesschaert et al., 2021).

Tabella 5-3 Sintesi recupero nutrienti

	Recupero nutrienti	Fonte
Filtri biologici aerati (BAF)	30 %	(Zhang et al., 2020)
Compostaggio	49-64 %	(Lopes et al., 2021)
Precipitazione in reattore anaerobico	69%	(Yogev et al., 2020)
Scambio ionico e precipitazione	90%	(BioMAC, 2019)
UASB	Circa 80%	(Meesschaert et al., 2021)
Microalghe	30-50%	(Lei et al., 2018)

5.9.1 Effetto dei trattamenti avanzati sui nutrienti

È necessario considerare che in un sistema acquaponico siano necessari anche trattamenti di filtrazione avanzata o di disinfezione per migliorare la qualità dell'acqua. È importante però valutare quale sia l'effetto di questi trattamenti sul ciclo dei nutrienti.

Un trattamento avanzato per la riduzione dei solidi e per lo sviluppo delle attività di degradazione batterica è l'MBR. In uno studio (C. Y. Wang et al., 2016a) è stata valutata l'influenza della membrana sulle prestazioni del sistema acquaponico e sul ciclo dei nutrienti confrontandola con un

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

sistema senza trattamenti. I risultati hanno indicato che il sistema contenente il trattamento MBR abbia fornito sostanze nutritive alle piante in modo più efficiente e portato ad una migliore condizione di crescita e a un minore intasamento delle radici rispetto al sistema senza trattamenti.

Anche il trattamento di disinfezione con raggi ultravioletti non compromette il contenuto dei nutrienti (Wängberg et al., 1998). Analizzando dei reflui di acquacoltura di plancton naturale esposti alla radiazione alla radiazione UV-B ($\approx 0,64 \text{ W m}^{-2}$ per 6 h al giorno), si è visto che il contenuto di particolato di carbonio, azoto e fosforo resti elevati. Al contrario, si riduce la carica batterica, dimostrando il miglioramento complessivo delle comunità esposta ai raggi UV-B.

Con il trattamento di disinfezione con ozono, di reflui derivanti dalla coltivazione di ceci, non si è notato nessun cambiamento nel contenuto di proteine, zuccheri solubili totali, calcio e fosforo (Bhatia et al., 2021). In un altro studio effettuato su piante di patate, si è visto che l'ozono tendesse addirittura ad aumentare le concentrazioni di nutrienti nei tuberi, soprattutto per l'azoto e manganese (Fangmeier et al., 2002) o che non avesse effetto su altre piante (Ogner, 1993).

Tabella 5-4 Effetto trattamenti sui nutrienti

	Effetto del trattamento sui nutrienti	Fonte
MBR	Migliore fruibilità dei nutrienti	(C. Y. Wang et al., 2016)
UV-B	Non incide	(Wängberg et al., 1998)
Ozono	Non incide	(Bhatia et al., 2021)

5.9.2 Conversione dei nutrienti in biomassa

Si è visto che le acque reflue dell'acquacoltura siano ricche di nutrienti, per recuperarli, i trattamenti più utilizzati sono quelli biologici con batteri o con microalghe, poiché efficienti e meno costosi di quelli chimici. Nei trattamenti con microalghe, esse vengono coltivate direttamente

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

nell'effluente dell'acquacoltura. A differenza dei processi di nitrificazione-denitrificazione ad opera dei batteri, le microalghe assorbono i nutrienti e li convertono in biomassa che può essere utilizzata per farina di pesce o fertilizzante, "chiudendo il ciclo" dei nutrienti. Inoltre, il trattamento con le microalghe aumenta l'ossigeno disciolto per le specie di acquacoltura (Milhazes-Cunha & Otero, 2017).

Le microalghe possono essere utilizzate anche in situ negli stagni di acquacoltura per regolare la qualità dell'acqua. In uno studio (Jung et al., 2017) si è visto come l'alga *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus*, utilizzate nello stagno di tilapia, possano portare ad una riduzione superiore all'80% dello scambio d'acqua rispetto al volume di controllo. (Volume totale: 2 m³, densità iniziale del pesce: 6,5 kg m⁻³).

Alcuni autori hanno valutato il tasso di assorbimento e l'efficienza di rimozione dei nutrienti da parte di diverse specie di alghe, tra cui la *Chlorella*, coltivate in reflui di acquacoltura (Nie et al., 2020).

Tabella 5-5 Recupero nutrienti con microalghe (Fonte: Nie et al., 2020)

	Vol. (L)	Luce ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	T (d)	N ₀ (mg L ⁻¹)	P ₀ (mg L ⁻¹)	Tasso crescita biom.	Tasso assorb. N (mg L ⁻¹ d ⁻¹)	Tasso assorb. P (mg L ⁻¹ d ⁻¹)
<i>Chlorella</i>	4	112.5	1	6.81	0.42	42.3	5.86	0.34
<i>Chlorella</i> GD	1	300	7	60	6.8	0.309	7.71	0.96

Inoltre, le alghe così coltivate presentano un adeguato contenuto di proteine, lipidi e carboidrati, tali da essere utilizzate come sostitute del mangime ottenendo buoni risultati nella composizione corporea dei pesci.

Tabella 5-6 Proteine, carboidrati e lipidi *Chlorella* (Fonte: Nie et al., 2020)

	Contenuto lipidi (%)	Contenuto carboidrati (%)	Contenuto proteine (%)

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

<i>Chlorella sorokiniana</i>	33.45	29.74	29.46
<i>Chlorella vulgaris</i>	9.1	19.1	47.5

Anche altri studiosi hanno dimostrato l'efficacia di rimozione dei nutrienti in eccesso dai reflui di acquacoltura. Due ceppi microalgali, *Chaetomorpha linum* e *Cladophora prolifera*, sono stati utilizzati per il biorisanamento di acqua di mare ricca di nutrienti (ammonio, nitrato e fosfato) (Aquilino et al., 2020). Il *C. linum* ha portato ad una rimozione quasi completa dell'ammonio in 24 ore in una prima fase, e migliorato l'efficienza di rimozione sia dei nitrati che dei fosfati in una seconda fase, dimostrando anche in questo caso l'efficacia delle alghe nel biorisanamento delle acque reflue dell'acquacoltura.

Per la coltivazione di microalghe può essere anche utilizzato refluo proveniente da sistemi di acquacoltura a ricircolo (RAS). È stato valutato che allevando spigole di 120 g, la concentrazione di azoto nell'influente del reattore di microalghe (*tetraselmis chuii*) risulti $\geq 8 \text{ mg TN L}^{-1}$, limite minimo per il corretto funzionamento del reattore. I *tetraselmis chuii* sono stati coltivati in reattori a colonna a bolle da 18 litri in funzionamento batch e semicontinuo. I risultati hanno mostrato una produttività media della biomassa di $69 \text{ mg di TSS L}^{-1} \text{ d}^{-1}$, una concentrazione di nutrienti di $0,76 \text{ mg TDN L}^{-1}$ e $0,01 \text{ mg TDP L}^{-1}$, simili a quelle nell'acqua di reintegro del RAS. Inoltre, la composizione della biomassa di microalghe ottenuta è compatibile come sostituto della farina di pesce nell'alimentazione della spigola (Villar-Navarro et al., 2021).

L'efficienza del trattamento delle microalghe nell'acqua RAS può dipendere da diversi fattori:

- specie di microalghe
- pretrattamento dell'acqua
- vasca in cui viene effettuato il campionamento (ad es. Dall'acquario dei pesci, dopo la disinfezione UV, ecc.)

A questo scopo, (Tejido-Nuñez et al., 2019) hanno confrontato le prestazioni due specie microalgali in diverse condizioni. Hanno

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

dimostrato che sia *Chlorella vulgaris* che *Tetradismus obliquus* siano in grado di crescere nell'acqua RAS e di rimuovere efficacemente i nutrienti in essa contenuti, ma con prestazioni differenti in funzione della qualità dell'acqua. In acqua sterile RAS, la crescita e l'efficienza di rimozione dei nutrienti di *C. vulgaris* hanno superato quella di *T. obliquus*. In acqua RAS non sterile, il *pattern* si è invertito, quindi è fondamentale scegliere bene i pretrattamenti. D'altro canto, il prelievo dei campioni da vasche diverse non ha avuto alcun effetto visibile sulla crescita delle microalghe o sull'efficienza di rimozione dei nutrienti.

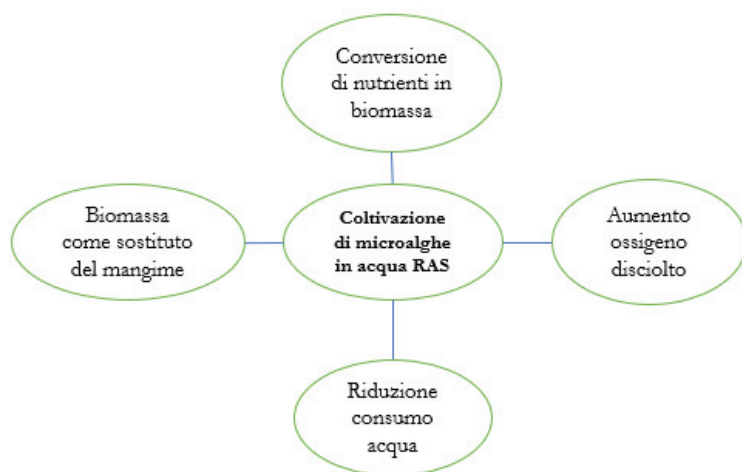


Figura 5-12 Vantaggi della coltivazione di microalghe in acqua proveniente da sistemi di acquacoltura a ricircolo (RAS)

5.10 QUADRO NORMATIVO E RIUTILIZZO DEI REFLUI IN AGRICOLTURA

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

5.10.1 Quadro normativo acque reflue

La disciplina della tutela delle acque dall'inquinamento è, attualmente contenuta nel d.lgs. 3 aprile 2006, n. 152, (c.d. Codice dell'ambiente), recante «Norme in materia ambientale».

Esso si articola in sei parti: la Parte III è dedicata alle «Norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione, di tutela delle acque dall'inquinamento e di gestione delle risorse idriche» ed è suddivisa in tre sezioni riguardanti rispettivamente la tutela idrogeologica, la tutela delle acque dall'inquinamento e la gestione delle risorse idriche.

Nella Parte Terza sono contenute le prescrizioni valide su tutto il territorio nazionale e si demanda alle Regioni alcuni aspetti della disciplina degli scarichi.

Il D.Lgs. 152/2006 ripartisce il territorio nazionale in una serie di distretti idrografici, questi ultimi vengono suddivisi in una serie di bacini idrografici; ogni Autorità di bacino provvede a redigere un Piano di bacino, che ha valore di piano territoriale di settore. Le varie Regioni successivamente elaborano un Piano di Tutela delle Acque, contenente al suo interno prescrizioni variabili da zona a zona secondo i bacini idrografici e la loro sensibilità ambientale.

Il Decreto Legislativo disciplina gli scarichi in funzione del rispetto degli obiettivi di qualità dei corpi idrici, e impone il rispetto dei valori limite previsti in allegato al Decreto stesso.

Per scarico la normativa intende: qualunque immissione di acque reflue, indipendentemente dalla loro natura inquinante, anche sottoposte a preventivo trattamento di depurazione, in acque superficiali, sul suolo, nel sottosuolo o in rete fognaria.

Tabella 5-7 Limiti di emissione per gli impianti di acque reflue urbane

Potenzialità in Abitanti Equivalenti	2000-	10000	>	10000
---	--------------	--------------	-------------	--------------

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Parametri (media giornaliera)	Concentrazion e	% di riduzion e	Concentrazion e	% di riduzion e
BOD₅ (senza nitrificazione) [mg/l]	≤25	70-90	≤25	80
COD [mg/l]	≤125	75	≤125	75
Solidi sospesi [mg/l]	≤35(*)	90(*)	≤35	90

(*) = la percentuale di riduzione di BOD₅ non deve essere inferiore a 40; per i solidi sospesi la concentrazione non deve superare i 70 mg/L e la percentuale di abbattimento non deve essere inferiore al 70%

Nelle aree sensibili al rischio di eutrofizzazione, che ogni Regione deve individuare entro il proprio territorio, sono stabiliti limiti più restrittivi per azoto e fosforo.

Nell'ottica dell'economia circolare vi è la necessità di riutilizzare le acque reflue, a tale scopo abbiamo una norma mirata al riutilizzo delle acque reflue, il riutilizzo è regolamentato dal Decreto Ministeriale n.185.

Il Decreto Ministeriale n.185 (Allegato 1), emanato il 12 giugno 2003, dal Ministro dell'Ambiente e del Territorio, definisce le norme tecniche per il riutilizzo delle acque reflue domestiche, urbane ed industriali attraverso la regolamentazione delle destinazioni d'uso e dei relativi requisiti di qualità, al fine di salvaguardare la qualità e la quantità delle risorse idriche, andando a limitare il prelievo delle acque superficiali e sotterranee e ridurre l'impatto di tale utilizzo.

In tale Decreto sono stabilite queste definizioni:

- **Recupero:** riqualificazione di un'acqua reflua, mediante adeguato trattamento depurativo, al fine di renderla adatta alla distribuzione per specifici riutilizzi;
- **Riutilizzo:** impiego d'acqua reflua recuperata di determinata qualità per specifica destinazione d'uso, per mezzo di una rete di

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

distribuzione, in parziale o totale sostituzione d'acqua superficiale o sotterranea.

La normativa prevede tre possibili destinazioni d'uso ammissibili:

- Uso irriguo: irrigazione di colture destinate alla produzione di alimenti destinati al consumo umano e animale o a fini non alimentari (subirrigazione);
- Uso civile: per l'alimentazione di sistemi di riscaldamento o di raffreddamento, per il lavaggio delle strade nelle aree metropolitane, per la fornitura di reti di approvvigionamento duali diverse da quelle per l'acqua potabile;
- Uso industriale: come acqua di processo, antincendio, di lavaggio e per i cicli termici dei processi industriali.

I requisiti minimi di qualità delle acque reflue ai fini del riutilizzo sono quelli previsti alla tabella 3 dell'allegato 5 del D.Lgs. 152/2006

Tabella 5-8 Principali parametri per il riutilizzo delle acque reflue

Prescrizioni di qualità					
BOD₅ [mg/l]	COD [mg/l]	TSS [mg/l]	Torbidità à [NTU]	E.coli [numero/100 ml]	Salmonella
≤20	≤100	≤10	≤5	≤10	Assente

Il parlamento europeo e del consiglio ha emanato il Regolamento (UE) 2020/741. La commissione europea si pone come obiettivo quello di affrontare il problema della carenza idrica e della siccità nell'Unione europea, e stabilisce le misure che gli Stati membri devono adottare per gestire la scarsità d'acqua e la siccità.

Il riutilizzo dell'acqua ai fini irrigui in agricoltura può altresì contribuire a promuovere l'economia circolare andando a recuperare i nutrienti dalle acque trattate.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

La norma per uso irriguo intende l'irrigazione delle seguenti colture:

- colture alimentari da consumare crude, ossia colture destinate al consumo umano a uno stato crudo o non lavorato;
- colture alimentari trasformate, ossia colture i cui prodotti sono destinati al consumo umano dopo un processo di trasformazione (cottura o lavorazione industriale);
- colture non alimentari, ossia colture i cui prodotti non sono destinati al consumo umano (ad esempio, pascoli e colture da foraggio, da fibra, da ornamento, da sementi, da energia e per tappeto erboso)

Tabella 5-9 Prescrizioni di qualità delle acque affinate a fini irrigui in agricoltura

BOD₅ [mg/l]	TSS [mg/l]	Torbidità à [NTU]	E.coli[numero/100ml]	Legionella
≤10	≤10	≤5	≤10	< 1000 UFC/l

5.10.2 Classificazione delle acque reflue

Le "acque reflue", o acque di scarico, sono le acque maggiormente prodotte nelle attività umane, domestiche, industriali o agricole, queste contengono sostanze organiche e inorganiche che possono recare danno alla salute e all'ambiente. Le acque reflue non possono quindi essere riversate direttamente nell'ambiente (nel terreno, nei fiumi, nei laghi e nei mari) senza prima essere sottoposte a interventi di depurazione costantemente monitorati.

Questo processo deve essere effettuato secondo le normative italiane e comunitarie, che prevedono diverse azioni necessarie a raggiungere o mantenere il buono stato di qualità delle acque superficiali o profonde, tutelando dall'inquinamento.

Le acque reflue si distinguono in:

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

- Acque reflue domestiche - Acque reflue che vengono scaricate da edifici residenziali, aziende e altre fonti ed è per lo più derivate dal metabolismo umano e dall'attività domestica;
- Acque reflue industriali: sono tutti i tipi di acque reflue che provengono da strutture o impianti di produzione in cui vengono svolte attività commerciali o industriali; differiscono qualitativamente dalle acque reflue domestiche e dal deflusso delle acque piovane, e comprende tutte le acque reflue che sono entrate in contatto con sostanze o materiali, anche pericolosi, non correlati alle attività di stabilizzazione;
- Acque reflue urbane - Il miscuglio di acque reflue domestiche, di acque reflue industriali, e/o di quelle meteoriche di dilavamento convogliate in reti fognarie, anche separate.

5.11 RIUTILIZZO ACQUE REFLUE IN AGRICOLTURA

I ricercatori stanno esaminando vari metodi per recuperare le frazioni di nutrienti da riutilizzare come fertilizzanti in agricoltura questo per sopperire alla mancanza di disponibilità di fertilizzanti nei paesi in via di sviluppo e a causa dell'imminente aumento del costo dei fertilizzanti. (Saliu & Oladoja, 2021a)

Un ulteriore motivo per cui si esaminano i diversi metodi per il riutilizzo delle acque reflue è legato all'aumento dello stress idrico.

In Europa negli ultimi due decenni si è assistito a un crescente stress idrico, legato sia alla scarsità idrica che al deterioramento della qualità, questo ha spinto molti comuni a cercare un uso più efficiente delle risorse idriche, compresa un'accettazione più diffusa delle pratiche di riutilizzo dell'acqua. (Bixio et al., 2006)

Circa la metà dei paesi europei, che rappresentano quasi il 70% della popolazione, si trova oggi ad affrontare problemi di stress idrico.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

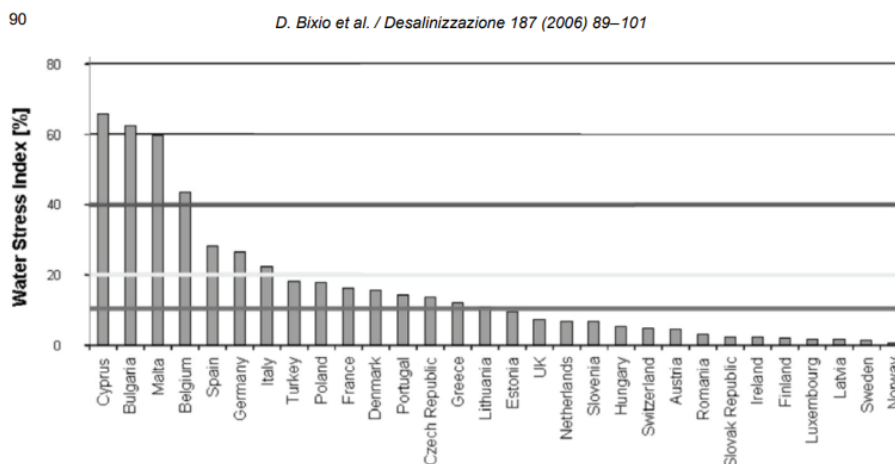


Figura 5-13 Classificazioni paesi in relazione all'indice di stress idrico. (figura tratta dall'articolo di (Bixio et al., 2006))

L'indice di stress idrico rappresenta il rapporto tra il prelievo totale di acqua di un paese e le sue risorse di acqua dolce rinnovabili totali, quest'ultimo rappresenta un indicatore approssimativo della pressione esercitata sulle risorse idriche

Con valori inferiori al 10%, lo stress idrico è considerato basso. Valori superiori al 20% sono indice di stress idrico alto. (Bixio et al., 2006)

Come possiamo vedere dalla figura sono molti i paesi che presentano uno stress idrico elevato, da qui la necessità di dover riutilizzare le acque reflue in modo tale da bilanciare la domanda e l'offerta della risorsa idrica.

La scarsità d'acqua è diventata un problema più diffuso nelle regioni aride e semiaride del mondo. Fino al 70% dell'acqua totale prelevata in queste zone è utilizzata per l'irrigazione agricola e agricola, principalmente da fonti idriche sotterranee e di superficie. Le acque reflue urbane rappresentano un fattore significativo per incoraggiare e rafforzare l'uso sostenibile dell'acqua esistente, questo aiuta ad alleviare la pressione che vi è sulle scarse risorse d'acqua dolce disponibili. (Ventura et al., 2019)

Ci sono vari benefici e sfide ambientali associate al riutilizzo delle acque reflue trattate per l'irrigazione. (Ofori et al., 2021a)

La qualità del refluo trattato e di altri fattori esterni determina la quantità dell'impatto che si determina. La composizione delle componenti fisico-

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

chimiche e microbiologiche degli effluenti delle acque reflue ne definisce la qualità. (Elgallal et al., 2016)

L'irrigazione con acque reflue ci permette di aggiungere importanti macro e micronutrienti al suolo, infatti le acque reflue aggiungono una preziosa fonte di azoto (N), potassio (K), fosforo (P), zinco (Zn), ferro (Fe), manganese (Mn) e rame (Cu).

Diversi studi hanno segnalato un aumento dei macro e micronutrienti del suolo dopo l'irrigazione con acque reflue. L'uso delle acque reflue trattate ci consente di migliorare il contenuto di azoto nel suolo e questo agisce come fertilizzante, questo è molto importante perché è stato segnalato che senza un ulteriore apporto di azoto al suolo un terzo della produzione alimentare potrebbe andare persa. Di conseguenza, il contributo dell'irrigazione che utilizza le acque reflue trattate è cruciale per la sostenibilità dell'agricoltura e la sicurezza alimentare. (Ofori et al., 2021a)

La qualità finale delle acque reflue è influenzata dal tipo di acqua reflua, dal metodo di utilizzo e dalla tecnologia di trattamento. Di conseguenza, anche dopo il trattamento, alcuni inquinanti o tossine possono ancora essere presenti.

All'interno delle acque reflue possiamo trovare contaminanti chimici, inerti/fisici o biologici composti inorganici (nutrienti), metalli pesanti, nanoparticelle e inquinanti organici (come farmaci, articoli per la cura personale, pesticidi, interferenti endocrini e sottoprodotti della disinfezione) sono tutti esempi di inquinanti chimici. (Fatta-Kassinou et al., 2011)

Gli inquinanti inerti sono costituiti da materiali degradabili e non degradabili come solidi sospesi, sabbia, sabbia e solidi galleggianti come legno e plastica.

Esempi di inquinanti microbiologici sono rappresentati da E. coli, Salmonella spp., elminti, protozoi, schistosoma e virus come l'epatite A. (Jaramillo & Restrepo, 2017; Ofori et al., 2021b)

I prodotti farmaceutici, i pesticidi e i disinfettanti sono presenti nella maggior parte delle acque reflue, ed è stato dimostrato che l'impiego di tecnologie basate su processi di sedimentazione, filtrazione o disinfezione, come biossido di cloro, UV, ozono o TiO_2 , sembrano adeguati nella maggior parte dei casi per il trattamento delle acque reflue per l'irrigazione,

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

ovviamente questo varia a seconda della qualità delle acque reflue grezze e delle esigenze applicative. (Becerra-Castro et al., 2015)

I diversi contaminanti contenuti nelle acque reflue possono accumularsi nel suolo attraverso l'irrigazione. Questi contaminanti possono diffondersi nell'ambiente circostante e nel suolo andando ad ostacolare la fertilità e a disturbare le comunità microbiche. (Becerra-Castro et al., 2015)

L'introduzione di contaminanti organici negli effluenti delle acque superficiali può avere un impatto sui sistemi endocrini degli animali acquatici, il che può alterare l'ambiente acquatico.

A differenza dell'acqua potabile per uso domestico, le acque reflue trattate possono contenere agenti patogeni, oltre che degli inquinanti organici, sostanze tossiche o metalli pesanti. Le sostanze chimiche e gli agenti patogeni potrebbero rappresentare un rischio per la salute degli agricoltori, e per i consumatori se non sono correttamente gestiti. (Khalid et al., 2018)

L'ingestione e l'inalazione attraverso la contaminazione alimentare e attraverso il sistema respiratorio sono i mezzi con cui gli agenti patogeni e i contaminanti possono entrare nel corpo umano. (Singh et al., 2012; Yi et al., 2011)

Pertanto possiamo dire che l'applicazione delle acque reflue trattate nell'irrigazione presenta una serie di vantaggi ma anche degli svantaggi.

Il rischio ad agenti patogeni e metalli pesanti può essere caratterizzato come svantaggi, l'approvvigionamento dei nutrienti, la tutela della risorsa idrica e la redditività dell'azienda agricola rappresentano i vantaggi. L'irrigazione con acque reflue promuove sia un'agricoltura sostenibile che la sostenibilità idrica, pertanto sono una valida fonte d'acqua alternativa per l'irrigazione ma per essere utilizzate è necessario adottare delle misure di prevenzione e mitigazione dei rischi. (Ofori et al., 2021b)

Una sfida importante è quella relativa agli impatti microbiologici legati all'irrigazione con acque reflue in modo tale da capire come questi microrganismi introdotti influenzeranno la comunità microbica del suolo. Questi effetti possono essere correlati non solo all'interferenza che le popolazioni esogene possono avere sulla comunità microbica del suolo, ma anche alla capacità degli organismi esogeni di sopravvivere nel suolo e costituire un rischio per la salute dell'uomo e del bestiame. (Becerra-Castro et al., 2015)

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

La presenza di agenti patogeni nelle acque reflue domestiche trattate è ben documentata e la loro trasmissione all'uomo può avvenire sia per contatto diretto o attraverso la catena alimentare come anticipato, in particolar modo le vie di trasmissione indirette comprendono l'aria, perché si può avere la formazione di aerosol, o l'acqua, dovuta al deflusso o alla lisciviazione. I rischi posti per l'uomo dai patogeni trasmessi attraverso l'irrigazione delle acque reflue sono difficili da stimare, ma dipendono da diversi fattori, legati alla sopravvivenza dei patogeni nell'ambiente, dalla dose infettiva e dall'immunità dell'ospite. (Intizar Hussain, 2002)

Nell'ambiente, in particolar modo nel suolo, la sopravvivenza dei microrganismi, compresi i patogeni, dipende da diversi fattori quali il contenuto di umidità, la sostanza organica, il pH e la temperatura.

I periodi di sopravvivenza nel suolo o nelle colture per alcuni batteri patogeni e parassiti possono variare da pochi giorni fino ad un anno per quelli altamente resistenti come le uova di helminths *Ascaris* riportate nella o ancora periodi più lunghi per le spore dei funghi. (Becerra-Castro et al., 2015)

Oltre ai microrganismi patogeni, negli ultimi anni è stato riconosciuto che gli antibiotici costituiscono una nuova classe di contaminanti dell'acqua di emergente preoccupazione con effetti negativi sulla vita acquatica. (Michael et al., 2013)

L'uso estensivo di antibiotici ha contribuito allo sviluppo di geni e batteri resistenti agli antibiotici, riducendo il potenziale terapeutico contro i patogeni umani e animali. (Kemper, 2008; Michael et al., 2013)

È possibile rimuovere gli antibiotici attraverso dei processi di trattamento a membrana che può avvenire attraverso molteplici meccanismi. In primo luogo, la rimozione può essere regolata dall'adsorbimento questo perché gli antibiotici sono idrofobici o hanno forti caratteristiche di legame idrogeno e quindi si adsorbono prontamente alle membrane già nelle fasi iniziali della filtrazione. In molti casi, la rimozione può avvenire a causa di effetti sterici per soluti non carichi o effetti sterici ed elettrostatici combinati per soluti carichi. Questi meccanismi dipendono dalle proprietà fisico-chimiche del composto quindi dal peso molecolare, dall'idrofobicità della soluzione dal pH, dalla forza ionica e dalle caratteristiche della membrana (materiale, morfologia superficiale, dimensione dei pori).

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Vari studi hanno mostrato una rimozione fino al 90% di diversi antibiotici con l'utilizzo delle membrane. (Michael et al., 2013)

Vi sono altre tecniche per la rimozione dei prodotti farmaceutici come l'adsorbimento con carbone attivo, l'efficienza di assorbimento degli antibiotici sul carbone attivo può essere significativamente alterata dalle concentrazioni iniziali dei composti bersaglio, dal pH, dalla temperatura e dalla presenza di altre specie nella soluzione.

Altri metodi sono rappresentati dai processi di ossidazione avanzati (AOP) che risultano abbastanza efficienti, infatti molti studi hanno riportato questo come trattamento efficace per la rimozione degli antibiotici. (Michael et al., 2013)

Oltre agli svantaggi sopra citati, abbiamo notevoli vantaggi legati al riutilizzo dei nutrienti in particolare i reflui agro-alimentari sono molto ricchi di nutrienti e pertanto si prestano bene ad essere riutilizzati in agricoltura.

5.12 REFLUO CASEARIO PER IL RIUTILIZZO IN AGRICOLTURA

La produzione italiana dei prodotti caseari può essere vista come un pilastro della nazione per l'alto calibro e il volume di merci esportate sempre più riconosciute e imitate in tutto il mondo.

La manifattura casearia si divide in una vasta gamma di prodotti: latte pastorizzato, burro, latte fermentato, condensato, concentrato, e formaggi di diverso tipo. Generalmente per la produzione viene impiegato latte bovino, ovino, caprino e bufalino prodotti in tutto il paese, con elevate concentrazioni in alcune regioni, dove rappresenta un importante fattore di sviluppo e di occupazione nel settore primario e nell'industria di trasformazione.

Con la rapida industrializzazione osservata e il tasso crescente di produzione di latte (intorno al 2,8 % annuo), la trasformazione dei prodotti lattiero-caseari produce la più grande fonte di acque reflue

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

industriali del settore agro-alimentare, soprattutto in Europa. (Aleksandar Kolev Slavov.)

In tutte le fasi della filiera lattiero-casearia (formulazione, lavorazione, confezionamento, trasporto, conservazione, distribuzione, ecc.) si generano scarti e questi possono causare seri problemi di inquinamento.

I reflui caseari sono composti sostanzialmente da siero, latticello ed effluenti. Le caratteristiche chimico-fisiche e microbiologiche sono estremamente variabili, in rapporto soprattutto alla tipologia di prodotto e alle dimensioni dell'industria.

Il siero è un liquido giallo-verdastro e torbido, che resta all'interno della caldaia dopo la separazione della cagliata e si distingue, in relazione all'origine del latte. Il siero del latte ha un elevato carico organico e volumetrico, rappresenta circa l'85–95 % del volume del latte e il 55 % dei componenti del latte. Quest'ultimo è costituito da carboidrati (4–5%), principalmente lattosio, le proteine e l'acido lattico ammontano a meno dell'1 %, i grassi a circa lo 0,4-0,5 %, mentre i sali variano dall'1 al 3 % . Il siero di latte viene prodotto principalmente nella lavorazione del formaggio e il suo volume dipende dalla produttività del formaggio e dal tipo di latte lavorato. (Aleksandar Kolev Slavov, n.d.)

Il latticello è il sottoprodotto che si origina dal processo di produzione dei formaggi a pasta filata e del burro nella fase di zangolatura della crema.

Gli effluenti, rappresentano gli inquinanti contenuti negli scarichi delle industrie lattiero-casearie, essi sono rappresentati dai residui del latte, dai suoi sottoprodotti e da eventuali sostanze impiegate nelle lavorazioni; a questi si dovranno aggiungere i prodotti utilizzati nel lavaggio e nella disinfezione degli ambienti, delle attrezzature e nei servizi complementari. (Laura Ercoli, Enrico Bonari, Francesca Barresi, n.d.)

Nei reflui caseari generalmente troviamo un elevato contenuto di COD, questo dimostra che sono altamente inquinati, ma da questi reflui è possibile ottenere notevoli quantità di composti organici e sostanze nutritive come l'azoto.

La quantità di COD, BOD, TSS, varia a seconda del tipo di lavorazione.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Tabella 5-10 Caratteristiche reflui caseari. Fonte (Goli et al., 2019)

Effluent type	COD (mg/l)	BOD ₅ (mg/l)	pH (units)	Alkalinity (mg CaCO ₃ /l)	Suspended solids (mg/l)	Volatile suspended solids (mg/l)	Total solids (mg/l)	TKN (mg/l)	Total phosphorus (mg/l)
Creamery	2000-6000	1200-4000	8-11	150-300	350-1000	330-940	—	50-60	—
Not given	980-7500	680-4500	—	—	300	—	—	—	—
Mixed dairy processing	1150-9200	—	6-11	320-970	340-1730	255-830	2705-3715	14-272	8-68
Cheese whey	68814a	—	—	—	—	—	—	1462a	379a
Cheese	1000-7500	588-5000	5.5-9.5	—	500-2500	—	—	—	—
Fresh milk	4656a	—	6.92a	—	—	—	—	—	—
Cheese	5340a	—	5.22a	—	—	—	—	—	—
Milk powder/butter	1908a	—	5.80a	—	—	—	—	—	—
Mixed dairy Processing	63100a	—	3.35a	—	12500a	12100a	53000a	—	—
Cheese whey	61000a	—	—	—	1780a	1560a	—	980a	510a
Cheese	—	—	4.7a	—	2500a	—	—	830a	280a
Not given	—	—	4.4-9.4	—	90-450	—	—	—	—
Fluid milk	950-2400	500-1300	5.0-9.5	—	90-450	—	—	—	—
Ice-cream	5200	2450	5.2	—	—	2600	3900	60	14
Ice-cream	4940	—	6.96	—	1100	990	—	—	—
Milk permeate	55200-63480	—	5.55-6.52	—	2670-3800	—	—	—	350-450
Milk processing	5000-1000	3000-5000	4-7	—	—	—	3000-7000	20-150	50-70
Dairy	4590	—	7.12	—	—	2100	4350	89	9.9
Dairy	2000-6000	1200-4000	8-11	—	350-100	330-940	—	50-60	20-50
Dairy	5000	2800	7.1	—	—	1350	3880	16.5	38.6
Cheese whey	60000	40000	4.46	—	—	1500	59000	—	—
Cheese whey	68600	7710	4.9	—	—	—	1350	1120	500
Dairy	3620	2115	8.5-10.3	—	647	1430	—	—	187
Milk processing	900-1200	640-850	6.8-7.2	—	40-50	—	—	—	48-52

* Mean concentrations are presented.

L'azoto contenuto nel refluo caseario è derivato principalmente dalle proteine del latte. Oltre all'azoto abbiamo anche la presenza di sodio (Na), potassio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), ferro(Fe), cobalto (Co), Nichel (Ni) e manganese(Mn).

Tabella 5-11 Principali elementi contenuti nei reflui caseari. Fonte (Goli et al., 2019)

Effluent type	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Fe (mg/l)	Co (mg/l)	Ni (mg/l)	Mn (mg/l)	Reference
Creamery	170-200	35-40	35-40	5-8	2-5	0.05-0.15	0.5-1.0	0.02-0.10	(43)
Cheese/whey	735a	42.8a	47.7a	11.4a	—	—	—	—	(29)
Cheese/alcohol	423a	41.2a	54.3a	8.3a	—	—	—	—	(29)
Cheese/beverages	453a	8.6a	33.6a	16.9a	—	—	—	—	(29)
Cheese/whey	419a	35.8a	52.3a	11.0a	—	—	—	—	(29)
Mixed dairy	123-2324	8-160	12-120	2-97	0.5-6.7	0	0-0.13	0.03-0.43	(42)
Cheese	720-980	—	530-950	—	—	—	—	—	(57)

Le concentrazioni di metalli pesanti tra cui Nichel, zinco e rame sono sufficientemente basse questo fa sì che non venga pregiudicato l'esecuzione del trattamento biologico.

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

La caratterizzazione fisico-chimica delle acque reflue comprende la valutazione di diverse proprietà quali la torbidità (NTU), solidi sospesi (TSS), l'acidità (pH), la salinità, il BOD o il COD e i diversi nutrienti. Inoltre le normative richiedono o raccomandano la determinazione di agenti potenzialmente tossici come metalli o contaminanti organici. (Becerra-Castro et al., 2015)

Viste le elevate quantità di nutrienti contenuti nelle acque reflue casearie, risulta vantaggioso il riutilizzo ma solo dopo un opportuno trattamento.

5.13 TRATTAMENTO PER IL RIUTILIZZO DEI REFLUI IN ACQUAPONICA

Il recupero delle acque reflue mediante l'eco-tecnologia a basso costo è una delle sfide attuali nella gestione delle acque reflue. Nell'agricoltura alimentata con acque reflue, i nutrienti contenuti all'interno delle acque reflue vengono assorbiti dalle piante che accelerano la rimozione dei nutrienti. La presenza dei nutrienti all'interno delle acque reflue ci consente di incrementare la produzione di colture, foglie o fiori destinate sia al consumo umano che per la produzione di piante ornamentali. La crescita delle piante e la resa delle colture e dei fiori ci consente di rimuovere i nutrienti dalle acque reflue e questo si traduce nel recupero delle acque reflue. Questo concetto può essere applicato come metodo per il trattamento ecologico delle acque reflue. (Rana et al., 2011)

Per il riutilizzo dei reflui è necessario un processo di trattamento affinché tutti i parametri possano rispettare la normativa vigente.

5.13.1 Riutilizzo dei reflui in idroponica

Nel corso degli anni, le acque reflue provenienti da diverse fonti come le pratiche agricole, gli effluenti industriali e dalle fognature contribuiscono alla generazione di enormi quantità di acque ricche di sostanze nutritive. Lo scarico di acque reflue ricche di sostanze nutritive ha comportato un aumento della fioritura algale e del fitoplancton, una diminuzione del livello di ossigeno disciolto e della trasparenza dell'acqua, il che ha aumentato il tasso di eutrofizzazione nei corpi idrici, mettendo così in pericolo la vita acquatica. (Saliu & Oladoja, 2021b)

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Si vuole analizzare lo studio condotto da (Kundu et al., 2022) dove è stata valutata la crescita di piante di pomodoro (*Lycopersicon esculentum*) su un letto galleggiante di fibra di cocco all'interno delle acque reflue urbane con quattro concentrazioni diverse (25%, 50%, 75% e 100%), in una sola condizione non è stata effettuata la diluizione mentre nelle altre 3 condizioni è stata effettuata una diluizione con acqua potabile, contenute all'interno di secchi di plastica da 10 L per due mesi.

Le acque reflue domestiche sono potenzialmente ricche di sostanze nutritive. L'efficienza del trattamento in maniera ecologica è funzione diretta delle performance di crescita delle piante di pomodoro. Sono stati valutati tutti i risultati: dall'aspetto della performance di crescita della pianta, dall'efficienza del recupero degli inquinanti e della fattibilità del trattamento considerando il bioaccumulo degli organismi patogeni e dei metalli pesanti, in modo da valutare se il prodotto potesse essere destinato al consumo umano (Rana et al., 2011).

La crescita più alta è stata registrata con una concentrazione del 100% di acque reflue, questa si è mostrata circa 4 volte maggiore rispetto alla crescita registrata con una concentrazione del 25% di acque reflue. (Rana et al., 2011)

La rimozione del COD variava dal 20% con una concentrazione del 25% di acque reflue fino al 61,38% con una concentrazione del 100% di acque reflue. Queste rimozioni di COD chiaramente aumentano con l'aumento della concentrazione di acque reflue. (Rana et al., 2011)

La pianta ha bisogno più di azoto (N) che di fosforo (P) per una crescita normale. Pertanto, le piante di pomodoro hanno assorbito più NO_3 che H_2PO_4 in tutti i trattamenti e questo assorbimento ha rimosso N e P dalle acque reflue. Nel 100% delle acque reflue, la rimozione di N era massima a causa del massimo assorbimento di NO_3 e la massima rimozione di P è stata massima con una concentrazione del 50% di acque reflue. La sedimentazione della sostanza organica sospesa e non disciolta delle acque reflue ha causato la rimozione del COD e lo stato statico delle acque l'ha favorita. Poiché il solido totale era massimo nel 100% delle acque reflue, la rimozione del COD in questo caso è stata la più alta. (Rana et al., 2011)

Secondo (Rana et al., 2011) le piante di pomodoro sono cresciute meglio con una concentrazione del 100% delle acque reflue domestiche. I batteri, N, P, BOD, coliformi e il carico di metalli pesanti nel 100% delle acque reflue domestiche sono stati recuperati in modo significativo attraverso la

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

coltivazione idroponica di piante di pomodoro. La resa del raccolto era secondaria in questa eco-tecnologia a basso costo. L'accumulo di metalli pesanti nelle colture dipendeva dalla concentrazione presente nelle acque reflue. Il raccolto di pomodoro prodotto nello studio non era sicuro per il consumo umano. La possibilità di trasmissione della malattia della colite dalle acque reflue all'uomo è molto bassa con questo approccio. Quindi, questa eco-tecnologia può essere consigliata per la gestione delle acque reflue grezze. Tuttavia, sono necessarie ulteriori ricerche per la possibile trasmissione di altri batteri patogeni che si trovano nelle acque reflue e dell'accumulo di metalli pesanti come Hg e As nei pomodori al fine di rendere il pomodoro sicuro per il consumo umano.

5.13.2 Riutilizzo dei reflui in acquacoltura

L'acquacoltura nelle acque reflue trattate (TWW) è stata praticata in tutto il mondo, ma questo campo di ricerca non è ancora sviluppato, infatti abbiamo pochi dati scientifici, ed in particolare abbiamo pochissimi dati per l'aspetto del bioaccumulo di microinquinanti organici (OMP) nei pesci. (Zaibel et al., 2020)

La maggior parte degli studi ha rilevato che l'acquacoltura alimentata da TWW può essere considerata sicura per quanto riguarda i livelli di metalli e coliformi. Tuttavia, è noto che le acque reflue trattate contengono molti contaminanti emergenti, per lo più indicati come microinquinanti organici (OMP). Questo ampio gruppo di sostanze chimiche include tracce di prodotti farmaceutici e prodotti per la cura della persona (PPCP), composti che alterano il sistema endocrino (EDC), biocidi e pesticidi, nonché altri composti organici. Inoltre composti come carbamazepina, diclofenac, ibuprofene, sucralosio, ecc. sono stati frequentemente rilevati in campioni domestici di TWW di tutto il mondo. (Tran et al., 2018)

L'obiettivo dello studio di (Zaibel et al., 2020) era quello di valutare la fattibilità dell'allevamento di pesci all'interno di acque reflue trattate. In particolare modo è stata valutata la sopravvivenza dei pesci, il tasso di crescita e lo stato di salute, e sono stati forniti dei dati per valutare i potenziali rischi associati alla sicurezza alimentare e alla protezione dei consumatori monitorando il bioaccumulo di composti correlati a TWW nei tessuti dei pesci. La specie ittica utilizzata è la *Cyprinus carpio* (carpa).

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Si conclude che in un arco di tempo di cinque mesi, il TTWW non ha influenzato la sopravvivenza, il tasso di crescita o la funzione immunitaria della carpa comune e i livelli di metalli pesanti rilevati nel muscolo del pesce erano al di sotto dei limiti per i pesci commestibili. Tuttavia, la correlazione tra le concentrazioni di TTWW (0%, 50% e 100%) e l'accumulo di OMP nei tessuti dei pesci e le lievi alterazioni presenti, indicano che l'esposizione a TTWW ha avuto qualche effetto negativo sui pesci.

Sebbene l'allevamento ittico all'interno delle TWW sia proibito nella maggior parte dei paesi, viene applicato nei principali produttori ed esportatori mondiali di pesce commestibile d'allevamento ed è probabile che questa pratica si espanda a causa della crescente domanda di pesce e i alla crescente carenza d'acqua.

È importante notare che, nonostante il crescente utilizzo di TWW, soprattutto per l'agricoltura, non ci sono standard per la maggior parte degli OMP nei TWW, nel pesce commestibile e negli alimenti in generale. Lo studio di (Zaibel et al., 2020) fornisce conoscenze primarie e nuove per quanto riguarda il potenziale utilizzo di TTWW per l'acquacoltura, che è essenziale per lo sviluppo di linee guida e standard per proteggere la salute pubblica. Tuttavia, sono necessarie ulteriori indagini sull'accumulo di OMP in diverse specie di pesci commestibili con abitudini alimentari diverse proprio per garantire la salute pubblica quando si utilizzano acque reflue trattate per l'acquacoltura.

5.13.3 Riutilizzo dei reflui in acquaponica

Principalmente diversi studi si sono occupati del trattamento delle acque reflue durante la coltivazione di organismi acquatici, soprattutto con il fitorisanamento, effettuato ad opera di piante acquatiche come ad esempio gli spinaci d'acqua (*Ipomoea aquatica*) e la lenticchia d'acqua (*Lemna minor*) che vengono aggiunte come componente di bonifica (Effendi et al., 2015) o come integratore alimentare di pesci e altri organismi (Pinandoyo et al., 2019)

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

L'uso di acque riutilizzate invece nell'allevamento dei pesci come si evince dallo studio di Zaibel et al., (2020b), non influisce negativamente sul loro tasso di crescita e sopravvivenza. Lo studio condotto con delle carpe (*Cyprinus carpio*) allevate in soluzioni di 0%, 50% e 100% di acqua urbana riutilizzata per 5 mesi, ha mostrato come le concentrazioni di metalli tossici nella carne del pesce erano al di sotto dei livelli massimi stabiliti dalla FAO. Questi risultati possono far intuire come l'utilizzo dell'acqua riutilizzata possa eventualmente essere applicata nella coltivazione in acquaponica per alcune specie di pesci.

Gli studi di Effendi et al., (2015) hanno invece dimostrato la capacità di rimozione dei nutrienti di un sistema acquaponico con gamberi di fiume (*Cherax quadricarinatus*) e spinaci d'acqua, ottenendo una riduzione dell'85% per l' NH_4^+ , 34% per l' NO_3^- e del 44% per il PO_4 . (A. Endut et al., 2009) hanno utilizzato spinaci d'acqua per trattare le acque reflue di un sistema con pesce gatto africano con tre velocità di carico idraulico (HLR). I risultati hanno mostrato una rimozione del 65% di BOD, dell'83% di solidi sospesi totali, del 78% di ammoniaca e dell'89% di nitriti. Inoltre è stata osservata una correlazione positiva tra i tassi di rimozione e il tasso di carico idraulico (HLR). Tutti i tassi di carico idraulico (HLR) inoltre sono risultati efficienti per la rimozione dei nutrienti e per mantenere condizioni di qualità dell'acqua utili alla crescita dei pesci.

L'impiego di acqua riutilizzata nei sistemi acquaponici è ancora un campo, non del tutto inesplorato, che richiederebbe però molta ricerca. Un'opzione può essere quella di riutilizzare l'acqua come fonte di nutrienti di sistemi acquaponici con l'obiettivo di coltivare piante ornamentali o allevare pesci ornamentali. Sebbene sia comunque necessario prendere in considerazione i rischi per la salute umana (de Bon et al., 2010).

Il mercato dei pesci ornamentali nel 2010 è stato stimato essere pari ad un valore di 10 miliardi di dollari. I maggiori importatori di pesci ornamentali sono Stati Uniti, Unione Europea e Giappone, mentre i principali esportatori sono Belgio, Paesi Bassi, Stati Uniti, Australia, Brasile e Colombia. È stato calcolato che più della metà del commercio totale di fauna selvatica è costituito dai pesci e che solo negli Stati Uniti sono presenti più di 160 milioni di acquari (Biondo & Burki, 2020).

Pertanto, se quest'acqua venisse impiegata per la produzione di pesci e piante ornamentali, non verrebbe pregiudicata la commercializzazione, in

5. Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

quanto non verrebbero utilizzati i prodotti finali per il consumo umano. (Cifuentes-Torres, Correa-Reyes, et al., 2021). Nonostante ciò l'obiettivo di sviluppare un'agricoltura sostenibile che sia anche in grado di produrre alimenti, in un contesto anche urbano, impiegando acque reflue prodotte nello stesso luogo di origine, richiede ancora oggi molto studio.

6 L'ATTIVITA' SPERIMENTALE

L'attività che è oggetto di studio di questo elaborato di tesi è stata effettuata presso il laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED dell'Università degli studi di Salerno.



Figura 6-1 Laboratorio di Ingegneria sanitaria ed ambientale (SEED) dell'Università degli studi di Salerno

L'attività si inserisce nel progetto WAFRA (*Wireless Aquaponic Farming in Remote Areas*). WAFRA è una parola araba che significa abbondanza, questa parola riflette l'obiettivo del progetto che è quello di sviluppare un sistema acquaponico intelligente in aree remote per fornire piante e pesci in abbondanza. Questo progetto, della durata di due anni, è stato finanziato dall' UE ed è capeggiato dall'Università Ains Shams (Egitto) in collaborazione con altri quattro istituti di ricerca europei e nordafricani:

- Università di Tunisi El Manar (Tunisia);
- Helmholtz Center for Environmental Research - UFZ Leipzig (Germania);
- Università di Salerno (Italia), presso il laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED;
- Università di Girona (Spagna).

6. L'attività sperimentale



Figura 6-2 Logo progetto WAFRA

In questa attività si valuteranno e confronteranno i risultati ottenibili con due diversi sistemi acquaponici, uguali per dimensioni e caratteristiche, ma differenti per un'unità di trattamento. Il primo sistema è costituito da un acquario per l'acquacoltura e da una vasca per l'idroponica, oltre che da componenti meccaniche che saranno descritte successivamente nel dettaglio; il secondo sistema oltre ad essere costituito da un acquario per l'acquacoltura e da una vasca per l'idroponica, comprende anche trattamenti avanzati che differiscono per i diversi cicli che verranno successivamente descritti, con lo scopo di sviluppare una nuova generazione di sistemi acquaponici.

Al fine di ottenere risultati validi si eseguiranno diverse operazioni in parallelo nei due sistemi e con cadenza definita per valutare l'andamento delle caratteristiche delle acque, della presenza di nutrienti, della temperatura e della concentrazione di batteri patogeni.

6. L'attività sperimentale

6.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA

I due sistemi messi a confronto nei diversi cicli sono costituiti entrambi da due elementi principali rappresentati: dall'unità dell'acquacoltura, e dall'unità dell'idroponica.

6.1.1 Unità di acquacoltura

Gli elementi che costituiscono l'unità di acquacoltura sono: l'acquario, il filtro meccanico, la mangiatoia automatica e la specie ittica. All'interno dei due acquari a base rettangolare ritroviamo la specie ittica scelta e il filtro meccanico. L'acqua non riempie completamente le dimensioni dell'acquario, bensì si mantiene un livello pari a 90 litri.

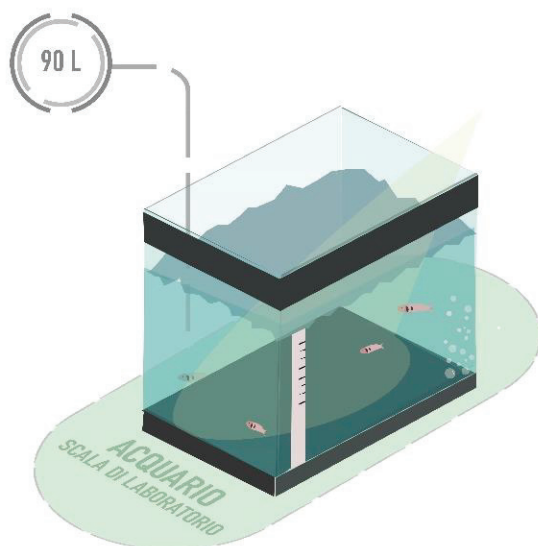


Figura 6-3 Illustrazione acquario adottato nell'attività sperimentale

Nello specifico l'acquario adoperato è "Acquario Milo 100 Luxline Black" prodotto da MTB Acquari – Casa del Vetro snc. Le caratteristiche dimensionali dell'acquario sono riportate nella tabella successiva.

6. L'attività sperimentale

Tabella 6-1 Dimensioni acquario

Lunghezza [cm]	Larghezza [cm]	Altezza [cm]	Spessore pareti [cm]	Capacità [L]
100,5	30,7	47	6	117



Figura 6-4 Acquario “Milo 100 Luxline Black”

Per quanto riguarda il filtro presente all'interno dell'acquario, esso effettua una filtrazione meccanica per la rimozione dei solidi più grossolani, tra cui i residui di mangime e gli escrementi dei pesci. Il filtro è costituito a sua volta da una pompa sommergibile per il ricircolo interno, un termoriscaldatore per mantenere una temperatura tra i 20 °C e i 30 °C e da materiale filtrante per la vera e propria filtrazione meccanica.

6. L'attività sperimentale

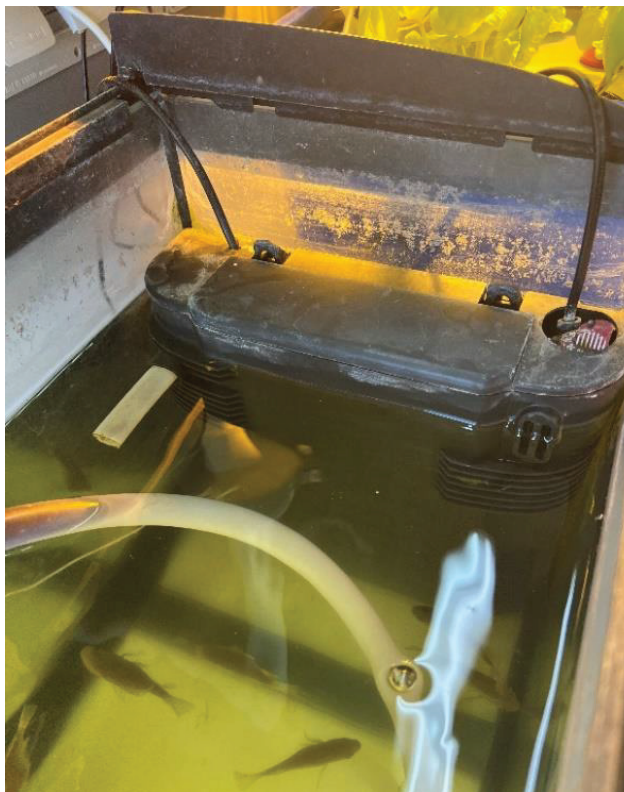


Figura 6-5 Filtro meccanico interno all'acquario

La specie ittica presente all'interno dell'acquario è la Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), una specie che si adatta bene a differenti range ambientali. La tilapia, popolarmente conosciuta come pollo acquatico, è uno dei pesci più allevati e commercializzati a livello internazionale. Grazie ai suoi valori nutrizionali e semplicità di allevamento, la sua produzione globale è aumentata rapidamente da 1,5 milioni di tonnellate a oltre 6 milioni di tonnellate (K. Wang et al., 2020). Le tilapie sono originarie dei laghi e dei fiumi africani e sono state allevate in un gran numero di paesi tropicali e subtropicali. Sono spesso scelte per i sistemi RAS in tutto il mondo, poiché consentono una buona produttività ed efficienza. Esistono diverse specie di tilapia, la Cina è il primo produttore mondiale di Tilapia (Taiwan detiene il 70% delle esportazioni mondiali di questo pesce), seguita dall'Egitto dove viene allevata in maggioranza la specie *Oreochromis Niloticus*. La tilapia ha un'elevata velocità di crescita e raggiunge la maturità sessuale già all'età di sei mesi e cova le uova (circa 1500 per ogni chilo di

6. L'attività sperimentale

peso corporeo) ogni 6-8 settimane. Può arrivare ad una lunghezza di 50 cm ed un peso corporeo di 6 kg. È uno dei pesci più allevati in acquacoltura per la sua resistenza alle condizioni sfavorevoli e adattabilità ad un ampio range di temperature, comprese tra i 20 e i 30 °C. Il range di temperatura ottimale per avere buoni tassi di crescita è 27-30 °C, quindi nelle regioni con climi temperati, nelle stagioni invernali, è necessario prevedere il riscaldamento dell'acqua.

Il rapporto ottimale tra maschi e femmine per incoraggiare la deposizione delle uova è di 2 maschi ogni 6-10 femmine, ciò incoraggia la deposizione delle uova. Il manuale dell'acquaponica consiglia di tenere un'alta densità di pesce nelle vasche di crescita, poiché altrimenti potrebbero esserci fenomeni di aggressione tra i maschi, che sono territoriali. Per evitare questi inconvenienti, alcune aziende decidono di realizzare lotti monosessuali di tilapia effettuando dei trattamenti ormonali o eseguendo un sessaggio manuale, ovvero separando manualmente i maschi dalle femmine riconoscendone le caratteristiche (questa tecnica è adottabile a piccola scala). Solitamente i pesci di sesso maschile hanno teste più grandi, con una più marcata regione frontale, una gobba posteriore e caratteristiche più squadrate. Le femmine sono più lucide e hanno teste più piccole. Inoltre, il comportamento del pesce può indicare il sesso perché i maschi inseguono altri maschi per scacciarli e poi corteggiare le femmine. In questo caso sono state allevate 13 tilapie, sia di sesso maschile che femminile. Per garantire la crescita ottimale delle tilapie si dovranno garantire specifici parametri delle acque e quantità di nutrienti.

Tabella 6-2 Parametri per la tilapia (fonte: manuale FAO, 2014)

Temperatura vitale (°C)-	14-36
Temperatura ottimale (°C)	27-30
Azoto totale (mg/l)	<2
Nitriti (mg/l)	<1
Ossigeno disciolto (mg/l)	>4
Fabbisogno proteico del mangime (%)	28-32

6. L'attività sperimentale

Tasso di crescita	600 grammi in 6-8 mesi
-------------------	------------------------

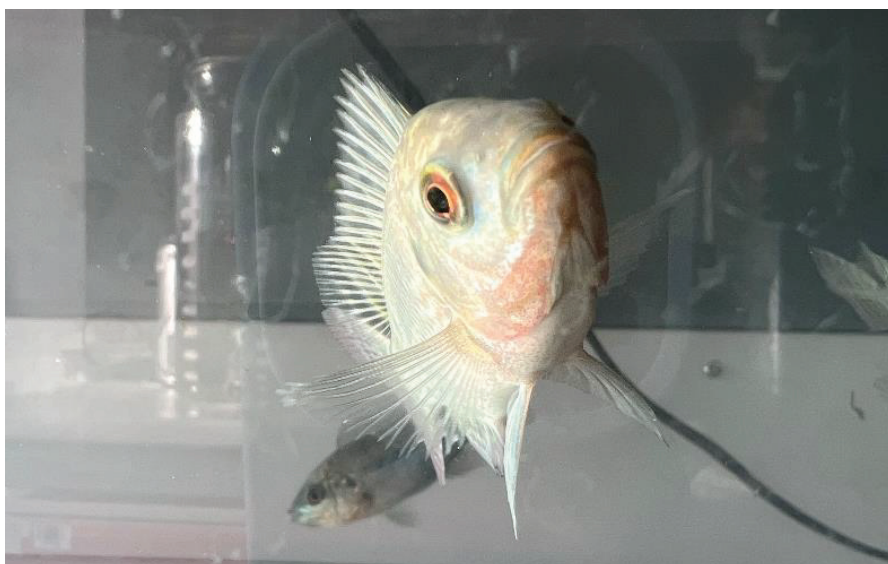


Figura 6-6 Specie ittica presente nell'acquario - Tilapia (12/09/2022 – Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED - Università degli Studi di Salerno)

Il mangime adoperato è del tipo “Cichlids Small di SHG”, un alimento completo basato sulle esigenze nutrizionali dei ciclidi di piccole e medie dimensioni e di facile assimilazione. Questo mangime viene distribuito attraverso una mangiatoia automatica del tipo “Amtra Autofood 24 LCD Delux” che permette di impostare diversi orari automatici.

6. L'attività sperimentale

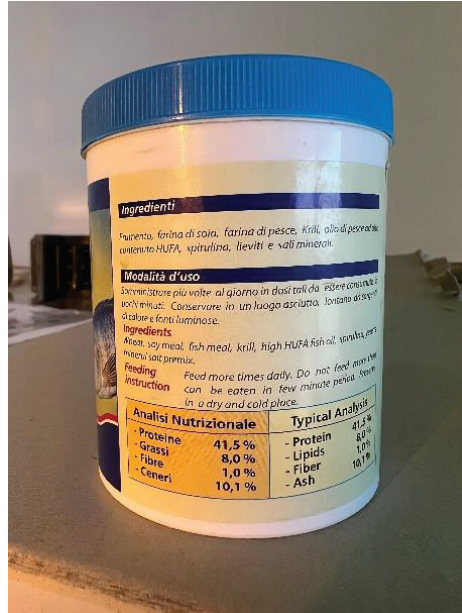


Figura 6-7 Mangime adoperato e valori nutrizionali

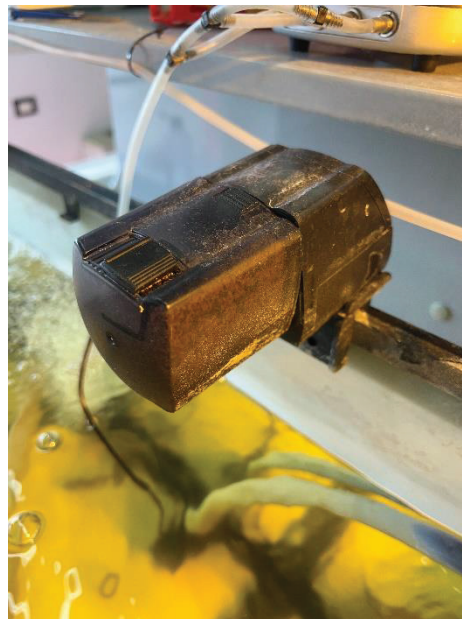


Figura 6-8 Mangiatoia automatica

6. L'attività sperimentale

6.1.2 Unità idroponica

L'unità idroponica è composta dalla vasca idroponica, dalla specie vegetale coltivata e dalla luce artificiale. La vasca idroponica è costituita da un serbatoio in PVC, alla cui sommità è presente un piano su cui alloggiare le piantine, lasciando libere nell'acqua di fondo le sole radici.



Figura 6-9 Vasche idroponiche

Questa vasca nel primo ciclo ha una capacità di 45 litri è un sistema DWC, nel quale le radici delle piantine sono completamente immerse in acqua. Aspetto fondamentale per la crescita delle piante è la luce, questa la impostiamo in maniera artificiale attraverso una lampada del tipo “Bulbo HPS Agro Sylvania”. Per simulare all'interno del laboratorio la luce solare impostiamo un timer che va dalle ore 09:00 alle ore 17:00.

6. L'attività sperimentale



Figura 6-10 Lampada del tipo “Bulbo HPS Agro Sylvania”

Le specie che sono state maggiormente utilizzate per la seguente attività sono state la Lattuga Gentilina (*Lactuca sativa* var. *secalina*) e il basilico italiano genovese (*Ocimum Basilicum*).

6. L'attività sperimentale



Figura 6-11 Lattuga nell'unità idroponica (02/07/2022 – Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED - Università degli Studi di Salerno)

6. L'attività sperimentale



Figura 6-12 Basilico nell'unità idroponica (12/09/2022 – Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED - Università degli Studi di Salerno)

6.1.3 Ulteriori componenti

Ulteriori componenti presenti in entrambi i sistemi sono le pompe peristaltiche e un sistema di aerazione. Gli elementi di connessione tra questi termini sono rappresentati da tubicini flessibili in plastica. Le pompe sono utilizzate per permettere il passaggio dell'acqua tra le varie unità e nel caso specifico è stata adoperata una pompa peristaltica del tipo “Lead Fluid BT300L”.

6. L'attività sperimentale



Figura 6-13 Pompa peristaltico Lead Fluid BT300L

All'interno degli acquari e delle vasche idroponiche è presente inoltre un sistema di aereazione, realizzato mediante pompe ad aria del tipo "Hailea ACO 9610" e pietre porose.

6. L'attività sperimentale



Figura 6-14 Sistema di aereazione "Hailea ACO 9610"

Le unità sopra descritte rappresentano dunque le componenti del sistema acquaponico convenzionale che d'ora in poi verrà denominato come sistema 1, mentre il sistema acquaponico avanzato, verrà denominato come sistema 2.

Nei diversi sistemi acquaponici avanzati utilizzati nei diversi cicli sperimentali, presentano in aggiunta alcuni unità specifiche a secondo del ciclo sperimentale. Nei paragrafi successivi vengono descritte tali unità, e successivamente, vengono illustrati schemi e processi di funzionamento del sistema 2 nei diversi cicli sperimentali.

6.1.4 Bioreattori

I bioreattori adoperati sono di forma cilindrica e in vetro con una capacità liquida di 16 litri. Per il primo reattore (quello contenete le alghe) è previsto un sistema di agitazione, costituito da un magnete inserito all'interno del reattore e un agitatore magnetico posizionato al di sotto. Il primo reattore prevede anche un'illuminazione artificiale mediante tre lampadine a LED

6. L'attività sperimentale

bianche di 16W ciascuna, legate ad un timer digitale programmato (dalle 9.00 alle 17.00).



Figura 6-15 Fotobioreattore microalgale

All'interno la specie di microalga utilizzata è *Chlorella vulgaris*, per le sue ottime performance di crescita e di cattura dei nutrienti e della CO₂.

6. L'attività sperimentale



Figura 6-16 Alghe *Chlorella vulgaris* (05/09/2022 – Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale SEED - Università degli Studi di Salerno)

Per invece contenere il refluo caseario è stato utilizzato un altro reattore con le medesime caratteristiche volumetriche del fotobioreattore microalgale. La preparazione del Dairy Wastewater (DWW) consiste nel diluire in 1 litro di acqua distillata i seguenti composti:

- (2,5 g) Latte in polvere;
- (1,4 g) NH_4Cl - Cloruro di ammonio;
- (0,05 g) $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ - Magnesio solfato;
- (1 g) KH_2PO_4 - Diidrogenofosfato di potassio;
- (2 g) NaHCO_3 - Bicarbonato di sodio;
- (0,038 g) CaCl_2 - Cloruro di calcio

Il latte in polvere impiegato è del tipo “Ristora – Latte scremato in polvere istantaneo”, dalla tabella dei valori nutrizionali viene riportato in 100 g di prodotto:

- 1,2 g di Grassi;
- 56 g di Carboidrati;
- 34 g di proteine;

6. L'attività sperimentale

- 1 g di sale;
- 1100 mg di Calcio;
- 800 mg di Fosforo;
- 110 mg di Magnesio;
- 2200 mg di Potassio

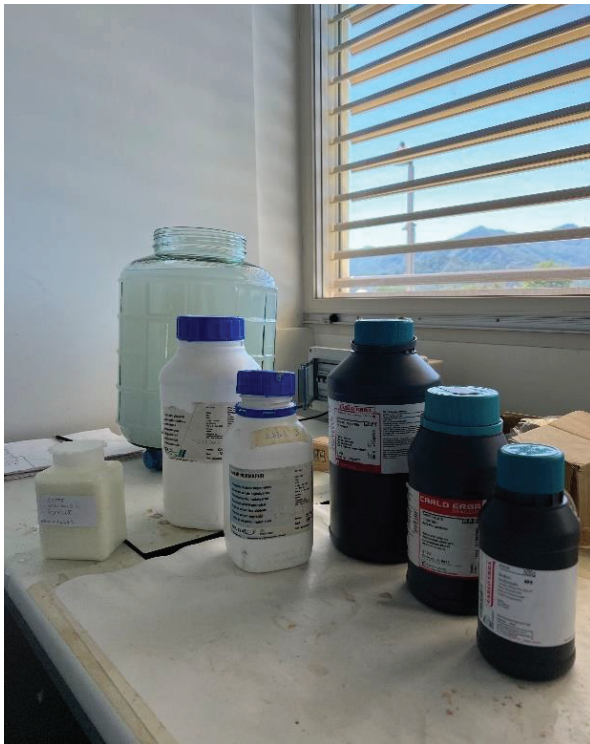


Figura 6-17 Preparazione del refluo caseario sintetico

6. L'attività sperimentale



Figura 6-18 Reattore per il contenimento del refluo caseario

In entrambi i reattori viene allocata una membrana dinamica autoformante (SFDM) che rappresenta la superficie di supporto per la filtrazione biologica e meccanica. La membrana è stata realizzata in laboratorio attraverso l'impiego di una rete plastica a maglie quadrate, utile a reggere il materiale poroso granulare di supporto per la nitrificazione batterica e un ulteriore strato di dacron a maglie più piccole. Il fissaggio dei diversi elementi del sistema è avvenuto attraverso l'utilizzo di silicone e fascette stringicavo. Nello specifico, la Membrana è stata realizzata alternando uno strato di griglia con fori di grandezza 40x40 mm all'interno del quale è stato inserito il materiale poroso, uno strato di dacron a bassa porosità (10 μm), un ulteriore strato di griglia 20x20 mm, uno strato di dacron (30 μm) ed un ultimo strato di griglia.

6. L'attività sperimentale

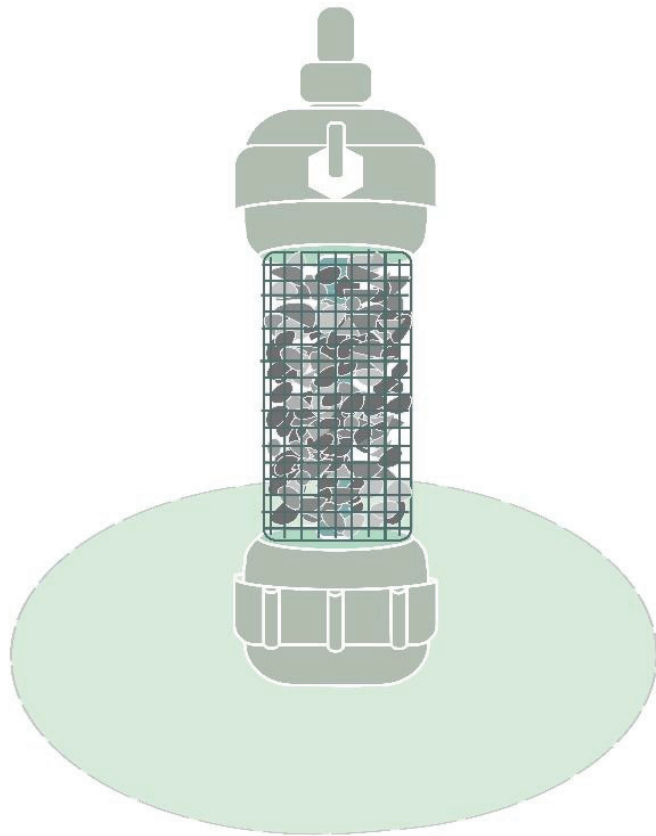


Figura 6-19 Illustrazione modulo membrana dinamica auto-formante

6. L'attività sperimentale



Figura 6-20 Layer della membrana dinamica autoformante



Figura 6-21 Membrana dinamica autoformante assemblata in laboratorio

Va sottolineato che nei cicli sperimentali dove non sono state utilizzate le alghe e il refluo caseario, la SFDM veniva allocato in un vasca trasparente con una capacità di 54 L , in cui alloggia la membrana per migliorare la qualità dell'acqua del sistema acquaponico. La membrana autoformante come già illustrato nel terzo capitolo funge sia da filtrazione meccanica che da filtrazione biologica, quindi si occupa sia di rimuovere ulteriori solidi

6. L'attività sperimentale

sospesi non sedimentati nel filtro meccanico dell'acquario che di favorire il processo di nitrificazione.



Figura 6-22 SFDM nel reattore dei primi cicli sperimentali

6. L'attività sperimentale

6.1.5 Lampada UV

Il refluo proveniente dalla vasca della membrana, prima di ritornare alla vasca idroponica subisce un trattamento di disinfezione fisica con luce ultravioletta. L'acqua viene pompata all'interno di una piccola tubazione alloggiata, insieme alla lampada UV, in un tubo di alluminio di diametro maggiore. Sottoposta a questa radiazione, i batteri patogeni presenti nel flusso vengono ridotti.



Figura 6-23 Cilindro metallico con alloggio luce UV

6. L'attività sperimentale

6.1.6 Generatore di ozono

Per migliorare la resa della disinfezione si è previsto anche un trattamento ad ozono, o una combinazione del trattamento UV ed ozono. L'ozono viene iniettato in controcorrente nella tubazione proveniente dalla vasca della membrana e garantisce la riduzione dei batteri patogeni. L'ozono utilizzato è prodotto in loco ed iniettato tramite un compressore.

L'iniezione di ozono è continua e la sua durata dipende dal volume di acqua da trattare. Per un volume di 15L, è necessario un trattamento della durata di 1h, per 24L, invece, ci sarà bisogno di 2h. Per evitare che l'ozono in eccesso dopo il trattamento sia reimpresso in atmosfera, si è prevista l'installazione di una cappa aspirante.



Figura 6-24 Cappa aspirante a naso di elefante

La disposizione del contenitore in riferimento alle diverse condizioni al contorno, come l'esposizione alla luce e la temperatura dell'ambiente circostante, è pari a quelle dei contenitori dell'idroponica.

6. L'attività sperimentale



Figura 6-25 Generatore di ozono con timer



Figura 6-26 Tubo ad U per il trattamento ad ozono

6. L'attività sperimentale

6.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Durante l'attività sperimentale, la qualità delle acque circolanti nel sistema è stata monitorata prelevando campioni e misurando una serie di parametri fisici e chimici. Per realizzare tali misurazioni sono state impiegate diverse strumentazioni:

- Sonda multiparametrica
- Torbidimetro
- Cromatografo
- Analizzatore a carbonio
- Spettrofotometro
- Strumentazione per prova microbiologica

6.2.1 Sonda multiparametrica

La sonda multiparametrica è uno strumento portatile in grado di misurare simultaneamente parametri fisici e chimici quali: pH, temperatura, potenziale redox (ORP), ossigeno disciolto (%DO, ppmDO), conducibilità e salinità.

6. L'attività sperimentale



Figura 6-27 Sonda multiparametrica

La sonda è costituita da un display sul quale leggere le misurazioni, un tastierino numerico per la calibrazione e lo strumento di misura vero e proprio. Questo viene immerso in acqua ed in pochi secondi fornisce i risultati. Per usare correttamente la sonda è necessario effettuare una calibrazione, sciacquare lo strumento con acqua e poi immergerla nella vasca. I risultati tenderanno a stabilizzarsi velocemente e saranno mostrati sul display.

6.2.2 Turbidimetro

Per l'analisi della torbidità è necessario l'utilizzo del turbidimetro. Questo strumento è in grado di fornire la torbidità di un campione di refluo emettendo un fascio di luce ed analizzando la sua dispersione e riflessione attraverso le particelle.

6. L'attività sperimentale



Figura 6-28 Turbidimetro e campioni

Per realizzare questa prova è necessario campionare 30 ml di refluo da inserire all'interno di una provetta trasparente. La provetta viene inserita nell'apposito vano dello strumento ed atteso qualche minuto per la stabilizzazione della misura, si può leggere il risultato mostrato sul display in NTU (unità nefelometrica di torbidità).

6.2.3 Cromatografo

Il cromatografo è stato utilizzato per valutare le concentrazioni degli anioni: fluoruro, cloruro, nitrito, nitrato, fosfato, solfato e zolfo. Questo strumento è costituito da un autocampionatore all'interno del quale vengono inseriti i campioni di refluo, da una cella di conducibilità che misura la conduttanza elettrica degli ioni, da un software che analizza i dati e li restituisce in forma tabellare.

Per realizzare la prova bisogna riempire l'autocampionatore con provette di 5 ml di refluo. Il refluo non viene inserito tal quale, ma aspirato con una siringa e successivamente immesso nella provetta facendolo passare per un filtrino di $0,45\ \mu\text{m}$. Una volta riempita la provetta è necessario richiuderla con un tappo forato, assicurandosi che il foro sia perfettamente centrato per evitare che il cromatografo non effettui la lettura correttamente.

6. L'attività sperimentale



Figura 6-29 Campioni cromatografo

6.2.4 Analizzatore a carbonio

L'analizzatore a carbonio è stato utilizzato per la misura del carbonio TOC (carbonio organico totale), TIC (carbonio inorganico totale), TC (carbonio totale). Preparati i campioni utilizzando filtri di $0,20\ \mu\text{m}$, si inseriscono all'interno di fiale nel campionatore automatico.



Figura 6-30 Analizzatore di carbonio

6. L'attività sperimentale

Un software analizza i dati e li fornisce sottoforma tabellare.

6.2.5 Spettrofotometro

Per analizzare le concentrazioni di azoto ammoniacale, si è utilizzato lo spettrofotometro. Questo dispositivo misura l'intensità luminosa in funzione della lunghezza d'onda della radiazione luminosa. La radiazione passa attraverso il campione contenuto nella cuvetta (nome specifico della provetta) e fornisce il contenuto di azoto ammoniacale in mg/L.

Per preparare la soluzione da inserire nello spettrofotometro è necessario compiere diverse azioni. Come prima cosa è necessario prelevare i campioni di refluo di 50 ml e preparare un campione di bianco (acqua distillata) di 50 ml. Questi campioni saranno inseriti all'interno di beute e successivamente sarà necessario aggiungere, per ogni campione, degli acidi ovvero 0,5 ml di potassio di sodio tartarato e 1 ml di reagente per sali di ammonio. Pronte le miscele, bisogna agitarle energicamente ed attendere 15 minuti affinché avvengano le reazioni chimiche.

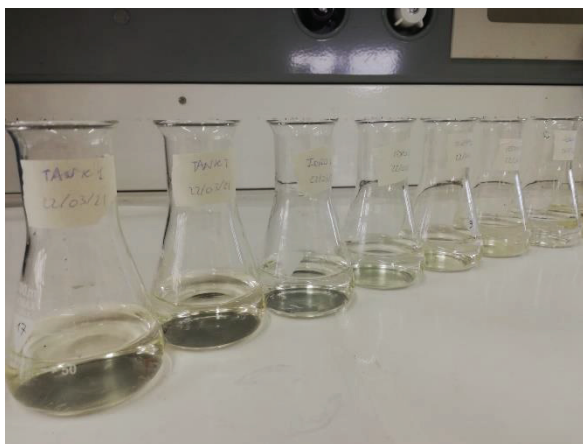


Figura 6-31 Beute per il test dell'azoto ammoniacale

Preparate le soluzioni, si procede con la prova con l'ausilio di un software per l'utilizzo dello spettrofotometro. Il software costituisce una guida da seguire durante la prova, come prima cosa si analizza il bianco e successivamente si inseriscono, uno alla volta, i diversi campioni. Terminati i campioni, il software fornisce tutti i risultati in un intervallo compreso tra 0,4 e 4 mg/L di azoto ammoniacale.

6. L'attività sperimentale



Figura 6-32 Spettrofotometro

6.2.6 Strumentazione per prova microbiologica

La procedura da adottare per effettuare analisi microbiologiche richiede particolare attenzione affinché i risultati non vengano alterati. Per prima cosa è necessario preparare i terreni di coltura, prelevare i campioni di refluo e sterilizzare tutta la strumentazione con la fiamma.

I terreni di coltura sono delle soluzioni solide contenenti sostanze nutritive che favoriscano la crescita delle colonie batteriche.

È importante scegliere con attenzione il tipo di terreno di coltura da utilizzare, poiché ognuno è adatto ad una particolare specie batterica, in questo caso il terreno di coltura selezionato è conforme allo sviluppo degli *Escherichia Coli* e dello *Staphylococcus aureus*. Il terreno di coltura deve essere preparato preventivamente utilizzando acqua e un agente gelificante, in particolare si è scelto di utilizzare il terreno TBX, la miscela viene inserita in autoclave, successivamente porzionata nelle capsula Petri ed acclimatate a 37°C.

6. L'attività sperimentale

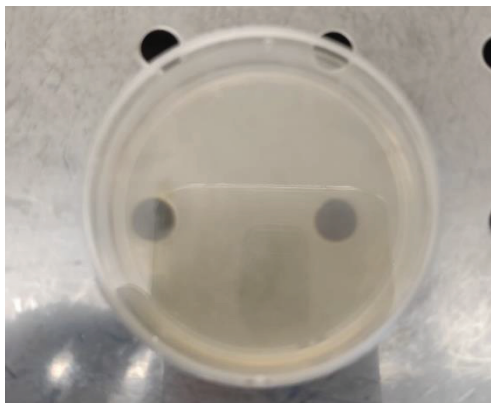


Figura 6-33 Terreno di coltura

Il giorno della prova sarà necessario prelevare campioni di refluo e filtrare 100 ml di campione

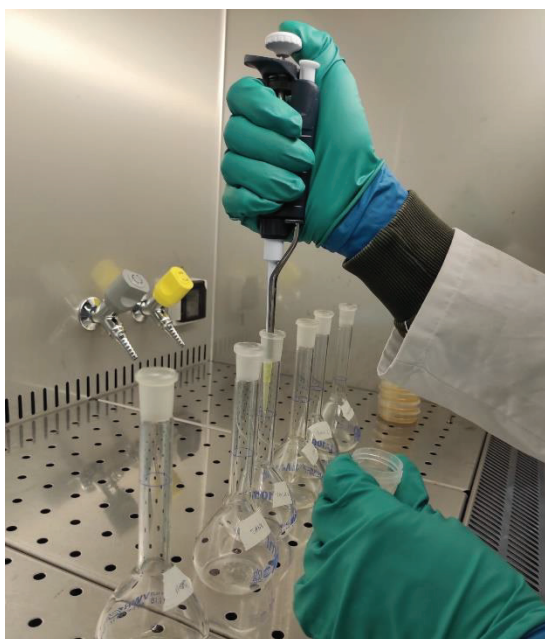


Figura 6-34 Preparazione dei campioni per la filtrazioni

Sterilizzata tutta la strumentazione, i campioni vengono inseriti in contenitori di acciaio collegati ad una pompa a vuoto.

6. L'attività sperimentale

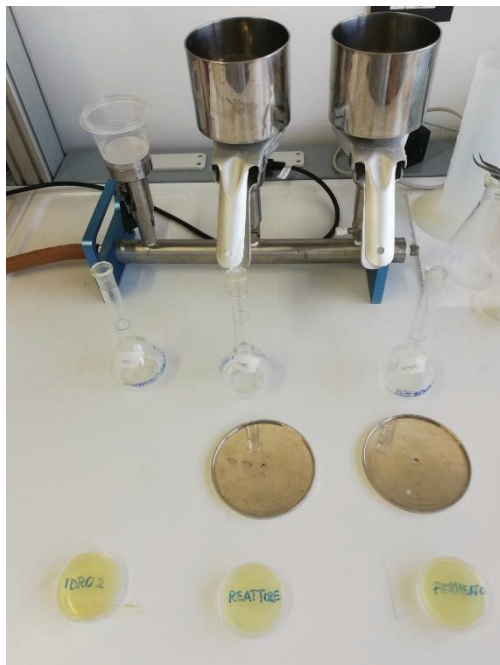


Figura 6-35 Strumentazione per prova microbiologica e capsule Petri

Azionata la pompa, il campione sarà vincolato ad essere filtrato su un filtro circolare con griglia di $0,45\ \mu\text{m}$. Completata la filtrazione, il filtro viene prelevato con pinzette sterili, posizionato all'interno del terreno di coltura e sigillato. Completata la procedura, il terreno contenente il filtro viene inserito in incubatore per 24 ore ad una temperatura di 37°C per favorire la crescita e lo sviluppo delle colonie batteriche.

Trascorso il tempo necessario, sarà possibile visualizzare chiaramente un certo numero di puntini, ovvero di colonie batteriche, al di sopra dei filtri. Effettuando una conta, tramite l'ausilio del software *Adobe Photoshop*, sarà possibile conoscere il numero di colonie di *Escherichia Coli* del refluo. Successivamente è necessario moltiplicare questo valore per il fattore di diluizione per ottenere la concentrazione batterica. È possibile riscontrare anche la presenza di muffe o di altri tipi di batteri, questo è dovuto alla contaminazione della strumentazione durante la prova, per questo motivo è bene procedere con attenzione e sterilizzare l'attrezzatura ad ogni utilizzo.

6. L'attività sperimentale

6.3 I CICLI SPERIMENTALI

L'attività di ricerca ha avuto come scopo quello di creare una nuova generazione di sistemi acquaponici avanzate in grado di fronteggiare le criticità dei sistemi acquaponici convenzionali. L'attività è stata suddivisa in diversi cicli sperimentali con lo scopo di rinnovare ed innovare sulla base dei traguardi raggiunti nei diversi cicli. Dopo una prima messa a punto dei sistemi, l'attività è iniziata con la pesata iniziale della specie ittica il 25 gennaio 2021. Da qui sono stati effettuati 10 cicli sperimentali.

- Ciclo I (1 marzo 2021 – 25 marzo 2021); Pesata 30 marzo 2021
- Ciclo II (12 aprile 2021 – 6 maggio 2021); Pesata 19 maggio 2021
- Ciclo III (14 giugno 2021 – 24 giugno 2021); Pesata 25 giugno 2021
- Ciclo IV (5 luglio 2021 – 29 luglio 2021); Pesata 3 agosto 2021
- Ciclo V (27 settembre 2021 – 21 ottobre 2021); Pesata 25 ottobre 2021
- Ciclo VI (26 ottobre 2021 – 18 novembre 2021); Pesata 22 novembre 2021
- Ciclo VII (18 gennaio 2022 – 3 febbraio 2022); Pesata 4 febbraio 2022
- Ciclo VIII (8 febbraio 2022 – 24 febbraio 2022); Pesata 25 febbraio 2022
- Ciclo IX (18 luglio 2022 – 04 agosto 2022)
- Ciclo X (5 settembre 2022 – 23 settembre 2022)

Tutti i cicli hanno quasi le medesime durate, dove ogni ciclo inizia con la pesata della specie ittica e con l'innesto di una nuova specie vegetale. La durata di ogni ciclo è stata stabilita considerando il raggiungimento della massima crescita della specie vegetale. Per ogni ciclo poi, è stato implementato il metodo del feed ratio descritto nei capitoli precedenti affinché vi sia equilibrio fra specie ittica e specie vegetale. La tabella successiva riassume il numero di piante e pesci implementati e i trattamenti avanzati implementati.

6. L'attività sperimentale

Tabella 6-3 Tabella riassuntiva dei cicli sperimentali

Ciclo sperimentale	N°specie animale	N° Specie vegetale	Portata di ricircolo	Caratteristica del sistema avanzato
I	14	9	100 ml/min	SFDM+UV+OZONO
II	14	9	100 ml/min	SFDM+UV+OZONO
III	14	9	100 ml/min	SFDM+UV+OZONO
IV	14	9	100 ml/min	SFDM+UV+OZONO
V	8	9	100 ml/min	SFDM+UV+OZONO
VI	8	9	100 ml/min	SFDM+UV+OZONO
VII	9	8	37,5 ml/min	SFDM+ALGHE
VIII	9	8	37,5 ml/min	SFDM+ALGHE
IX	14	12	37,5 ml/min	SFDM+ALGHE+REFLUO CASEARIO
X	14	12	37,5 ml/min	SFDM+ALGHE+REFLUO CASEARIO

Va specificato che la portata è stata diminuita da 100 ml/min a 37,5 ml/min, in quanto per i primi le pompe peristaltiche erano attivate per sole 8 ore al giorno e i trattamenti veniva effettuati per un totale di 3 ore, suddivise per 1 ore nelle seguenti fasce temporali: 8.00 – 9.00; 12.00 – 13.00; 15.00 – 16.00. Questo perché rappresenta esattamente un'ora dopo l'erogazione del cibo per la specie ittica, nonché il tempo di massima carica organica negli acquari.

Infine per i cicli IX-X è stata introdotta una nuova specie vegetale, in quanto la precedente specie aveva raggiunto la massima crescita stimata.

Nei paragrafi successivi, vengono illustrati nel dettaglio i set-up implementati nei diversi cicli sperimentali. Si precisa che per i cicli V-VI si è continuato ad implementare i trattamenti dei cicli precedenti, ma solo al fine di monitorare la crescita della specie ittica, con lo scopo di implementare nuovi processi, come è stato fatto per i cicli successivi.

6. L'attività sperimentale

Inoltre in parallelo è stato creato un sistema integrato fra fotobioreattore microalgale e un sistema di acquacoltura identico ai precedenti per valutare i potenziali impatti delle microalghe sul ciclo dei nutrienti e sul processo.

6.3.1 Set-up sperimentale cicli I-IV

Alla luce dei risultati ottenuti nei cicli sperimentali precedenti, in cui è stato utilizzato un ricircolo idrico discontinuo realizzato utilizzando delle vasche di raccolta, si è valutato che aumentando il numero di ricircoli aumentava l'efficacia dei sistemi e la loro interazione. Per questo motivo in questa attività sperimentale è stato previsto un ricircolo idrico semi-continuo della durata di 8 ore al giorno (esclusi il sabato e la domenica) utilizzando due pompe peristaltiche, una per ciascun sistema acquaponico. Le pompe sono state impostate con una portata di ricircolo idrico pari a 100ml al minuto, garantendo così un ricircolo di 48L al giorno tra tutte le unità acquaponiche.

Nel sistema1 il ricircolo idrico è molto semplice: l'acqua viene prelevata dall'unità di acquacoltura dalla pompa peristaltica e viene immessa nell'unità idroponica, dopodiché l'acqua nella vasca idroponica viene prelevata e ritorna nell'acquario di allevamento.

Nel sistema 2 il volume d'acqua prelevato dall'acquario2 viene indirizzato al bioreattore a membrana in cui avviene il primo trattamento fisico e biologico dove contemporaneamente viene permessa una filtrazione meccanica e una degradazione biologica della sostanza organica. Il refluo dopo aver subito i trattamenti nella vasca contenente la membrana, la attraversa e fuoriesce. Il refluo effluente viene chiamato permeato che viene mandato all'unità di disinfezione. Il permeato viene prelevato dalla membrana e passa all'interno di una tubazione di plastica trasparente contenuta a sua volta in un cilindro di alluminio. In questo cilindro alloggia anche una lampada UV e una tubazione che inietta ozono controcorrente. Alla fine dei trattamenti il refluo viene inviato in un pozzetto di raccolta da cui viene prelevato e raggiunge le vasche idroponiche. Infine, dalle vasche idroponiche l'acqua ritorna nell'acquario.

6. L'attività sperimentale

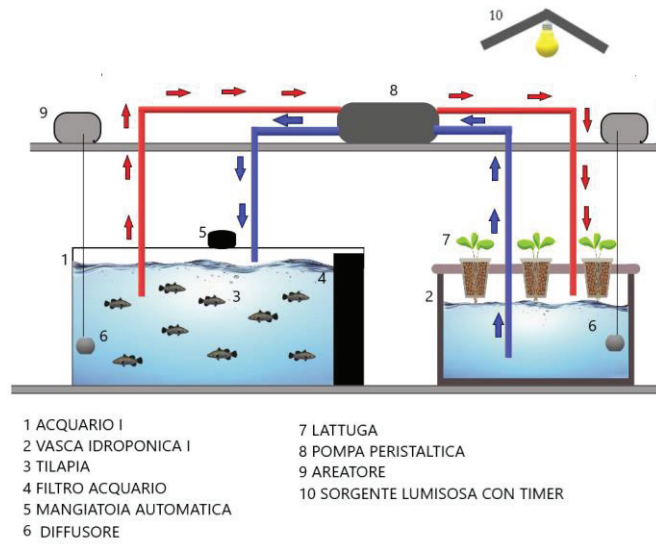


Figura 6-36 Set-up sistema acquaponico convenzionale ciclo I-IV(sistema 1)

6. L'attività sperimentale

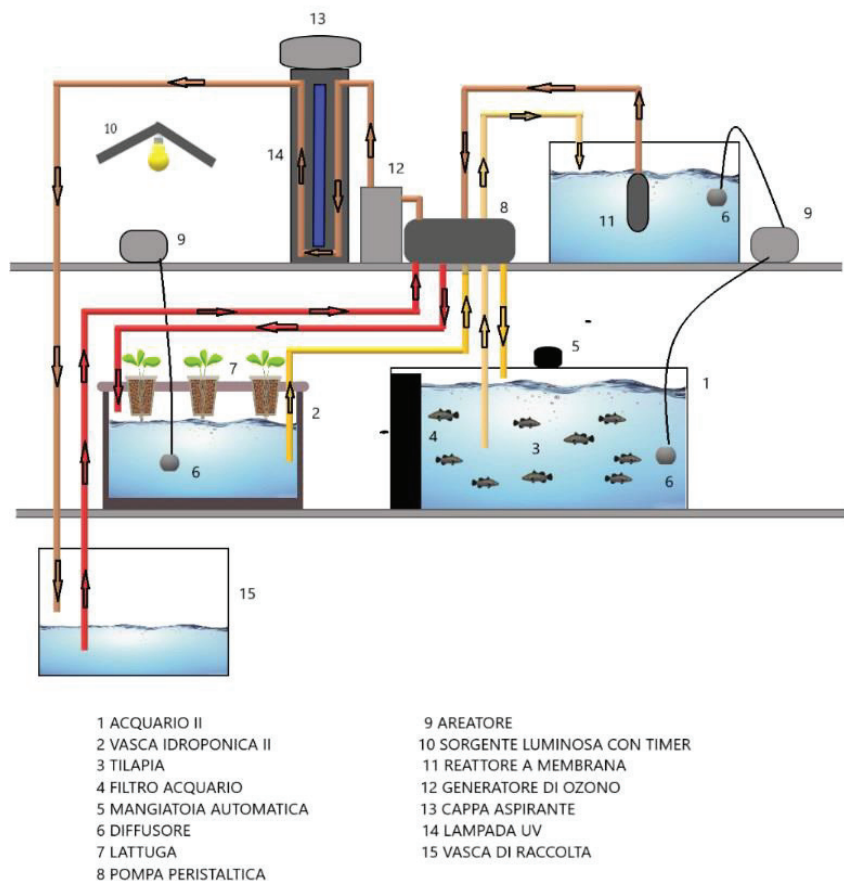


Figura 6-37 Set-up sistema acquaponico avanzato ciclo I-IV(sistema 1)

6.3.2 Set-up sperimentale cicli V-VI

Il seguente ciclo ha il medesimo set-up dei cicli precedenti. Al tempo stesso però è stato previsto un predimensionamento del sistema facendo riferimento ai dati di letteratura per alga *Chlorella* in reflui RAS.

6. L'attività sperimentale

Tabella 6-4 Parametri di riferimento predimensionamento sistema ibrido

	Stima del parametro	Fonte
Volume PBR	20% del volume RAS	(Vu et al., 2018)
Produttività biomassa	1,3 g/L/d	(Kuo et al., 2016)
pH	6	(Kuo et al., 2015)
Luce	100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	(Kuo et al., 2015)
Temperatura	26°C	(Kuo et al., 2015)
Produzione di CO ₂ dell'acquario	97,8 mg/m ² /h	(Chen Y. Et al., 2015)
Quantità di biomassa microalgale da inserire in acquario	15% del peso	(Yadav et al., 2020)
Contenuto % di nutrienti	33,45 lipidi 29,7 carboidrati 29,4 proteine	(Nie et al., 2020)

Noto il volume dell'acquario e la biomassa di pesci presente, considerando i parametri principali di progetto del fotobioreattore si è eseguito un calcolo preliminare del volume del PBR e della produzione sua produzione di biomassa algale. Fissando un EBRT di 5 min, si è calcolata la portata necessaria per la crescita della microalghe che, essendo maggiore di quella prodotta dai pesci, sarà integrata con un compressore. Infine, si è valutato il quantitativo di biomassa richiesta dai pesci in percentuale rispetto al loro peso.

6. L'attività sperimentale

Tabella 6-5 Predimensionamento sistema ibrido

Volume acquario	$Q_{CO_2 \text{ prodotta}}$	Biomassa richiesta		
L	mg/h	g/d		
90	48,5	39,6		
Volume PBR	EBRT	$Q_{CO_2 \text{ richiesta}}$	$Q_{CO_2 \text{ da integrare}}$	Biomassa prodotta
L	min	mg/h	mg/h	g/d
18	5	2955	2906,5	23,4

6.3.3 Set-up sperimentale cicli VII-VIII

Il sistema 1 è composto dall'acquario 1 e dalla vasca idroponica 1. Il flusso d'acqua viene pompato dall'acquario nella vasca idroponica e viceversa senza ricevere alcun trattamento.

Il sistema 2 è composto dall'acquario 2, dalla vasca idroponica 2, dal fotobioreattore microalgale a membrana, dall'unità di disinfezione e dalla vasca del permeato. Il flusso d'acqua viene pompato dall'acquario nel fotobioreattore a membrana; da qui, attraversando la membrana, l'acqua prosegue verso l'unità di disinfezione dove subisce il trattamento con UV e con ozono in controcorrente; dopo questo trattamento l'acqua viene scaricata nella vasca del permeato e da qui pompata nella vasca idroponica, per poi ritornare nuovamente nell'acquario. Il trattamento di disinfezione è stato effettuato per 1 ora tre volte al giorno: nella fascia 9- 10, nella fascia 12-13 e nella fascia 15-16.

6. L'attività sperimentale

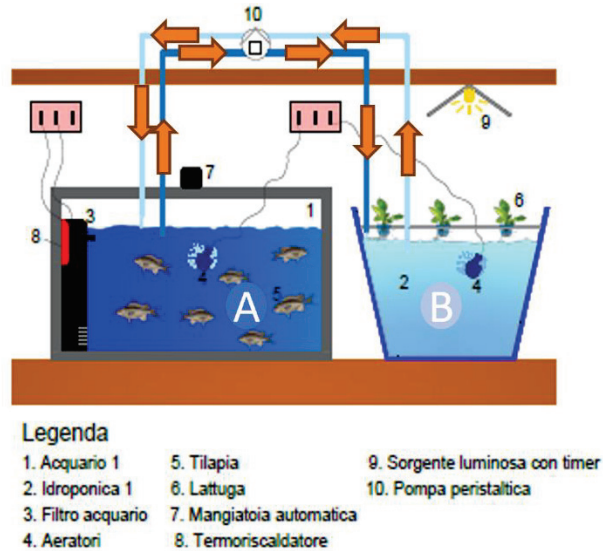


Figura 6-38 Set-up sistema acquaponico convenzionale ciclo VII-VIII(sistema 1)

6. L'attività sperimentale

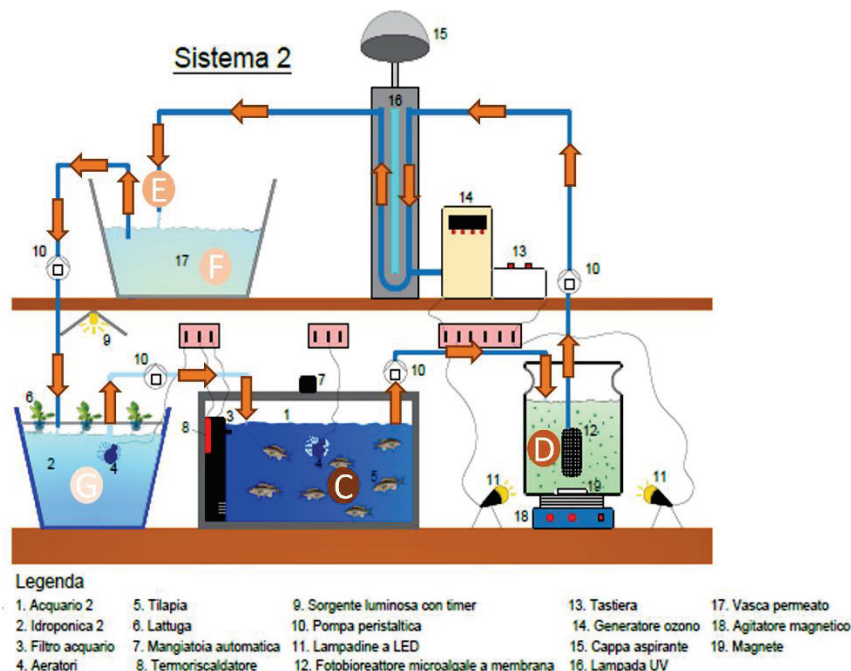


Figura 6-39 Set-up sistema acquaponico avanzato ciclo VII-VIII(sistema 2)

La portata con cui viene pompata l'acqua in entrambi i sistemi è pari a 37,50 ml/min, con un ricambio d'acqua giornaliero di 15,75 litri. I sistemi rimangono in funzione per 7 ore al giorno. Concluso il ciclo giornaliero, all'interno del fotobioreattore a membrana è stato previsto un ricircolo interno che pesca e restituisce il liquido nel fotobioreattore, poiché risulta necessario mantenere la membrana in continuo funzionamento per evitare che aumenti il fouling e si riducano le sue prestazioni. Inoltre, per garantire un'illuminazione più concentrata e uniforme possibile è stata prevista una copertura opaca di cartone intorno al fotobioreattore.

6.3.4 Set-up sperimentale cicli IX-X

Il flusso d'acqua viene pompato dall'acquario al reattore grazie all'impiego delle pompe, successivamente attraversando la membrana del reattore si ha il passaggio alla vasca idroponica. Il reattore presenta al suo interno una membrana dinamica autoformante in grado di attuare una filtrazione meccanico-biologica e la nitrificazione dei batteri grazie al materiale granulare. La peculiarità del reattore è la presenza al suo interno delle

6. L'attività sperimentale

alge. Nell'ultima parte dall'idroponica, dove per questo ciclo è stato coltivato il basilico, l'acqua fitodepurata viene rimandata all'acquario. Seguendo questo ordine in maniera ciclica il processo si ripete garantendo: nutrienti per la crescita delle piante, trattamento delle acque reflue e acqua fitodepurata per l'acquario. .

La portata con cui viene pompata l'acqua in entrambi i sistemi è pari a 5 ml/min, con un ricambio d'acqua giornaliero di 7,2 litri.

Il sistema di illuminazione in automatico è stato attivato da un timer dalle ore 9:00 alle ore 17:00. e come da figura solo nell'unità idroponica è prevista l'illuminazione in entrambi i sistemi, mentre per i reattori è stata applicata solo al reattore 1. Inoltre per garantire un'illuminazione più concentrata e uniforme possibile è stata prevista una copertura di cartone intorno al reattore 1.

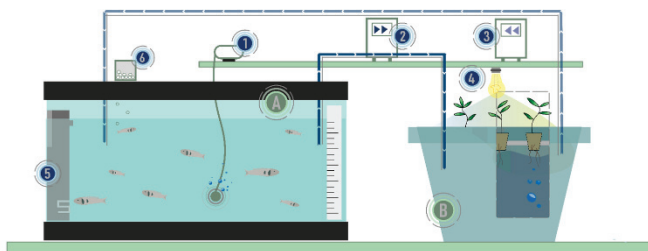


Figura 6-40 Set-up sistema acquaponico convenzionale ciclo IX-X(sistema 1)

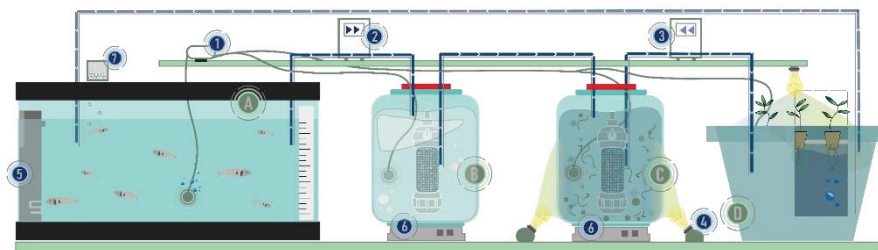


Figura 6-41 Set-up sistema acquaponico avanzato ciclo IX-X(sistema 2)

7 RISULTATI DEI CICLI SPERIMENTALI

L'attività sperimentale come descritto nel precedente capitolo è stata suddivisa in 10 cicli sperimentali. Qui di seguito ne vengono riportati i principali risultati, analizzandoli per le 3 diverse tipologie di set-up che sono stati implementati. Si ricorda infatti che, dopo aver effettuato 4 cicli sperimentali in cui sono stati implementati trattamenti avanzati, quali combinazione dei processi di difenzione con UV ed ozono, e l'applicazione di una SFDM per trattare i reflui di acquacoltura, si è passati nello sperimentare sistemi di algacquacoltura, dove all'interno del fotobioreattore microalgale è stato applicato la medesima tipologia di SFDM dei cicli sperimentali precedenti. Infine, al set-up di algacquacoltura è stato aggiunto anche un reattore contenente refluo caserario sintetico, trattato anch'esso con la SFDM, con lo scopo di recuperare nutrienti dalle acque reflue e introdurle nel sistema algacquaponico. Una considerazione conclusa va fatta sulla nomenclatura, con il numero 1 vengono denominate tutte le unità afferenti al sistema convenzionale (sistema 1), mentre con il numero 2 sono attribuite le unità afferenti al sistema avanzato (sistema 2).

7.1 RISULTATI CICLO SPERIMENTALE I-IV

L'attività di laboratorio è stata pianificata predisponendo il campionamento e l'analisi delle acque due giorni a settimana. Quindi, all'interno della macro-organizzazione dei cicli, ogni settimana sono state eseguite specifiche analisi il lunedì ed il giovedì. Le attività svolte sono le seguenti:

- Prelievo dei campioni: due volte a settimana;
- Analisi dei parametri fisico-chimici: due volte a settimana;
- Test della torbidità: due volte a settimana;
- Test dell'azoto ammoniacale: due volte a settimana;

7. Risultati dei cicli sperimentali

- Analisi degli anioni: due volte a settimana;
- Analisi del carbonio: due volte a settimana;
- Pesa della specie ittica: una volta al termine di ogni ciclo sperimentale;
- Monitoraggio della crescita della specie vegetale: uno volta al termine di ogni ciclo sperimentale.

Tabella 7-1 Tabelle riassuntiva delle analisi effettuate nei cicli I-IV

Parametri chimico-fisici	Carbonio	Anioni	Monitoraggio crescita
pH	TIC	Azoto ammoniacale	Specie ittica
Temperatura	TOC	Fluoruro	Specie vegetale
ORP	TC	Cloruro	
%DO		Nitrito	
ppmDO		Nitrato	
Conducibilità		Fosfato	
Salinità		Solfato	
Torbidità		Zolfo	

I campioni sono stati prelevati all'interno delle seguenti vasche:

- Acquario 1, nell'acquario del sistema convenzionale;
- Idroponica 1, nella vasca idroponica del sistema convenzionale;
- Acquario 2, nell'acquario del sistema avanzato;

7. Risultati dei cicli sperimentali

- Reattore, nella vasca contenente la membrana SFDM;
- Permeato, nella vasca di raccolta dopo il trattamento su membrana;
- Idroponica 2, nella vasca idroponica del sistema avanzato.

Si è scelto di riportare nei paragrafi successivi i risultati più significativi ottenuti nell'analisi del set-up relativo ai cicli sperimentali I-IV.

Si precisa che per il calcolo dell'abbattimento è stato effettuato come differenza fra il sistema di acquacoltura meno il sistema idroponico, diviso il sistema di acquacoltura.

Infine, eseguendo un confronto statistico dei dati, considerando il valore medio, il venticinquesimo ed il settantacinquesimo percentile, si sono ottenuti grafici box plot, per confrontare la variabilità dei dati.

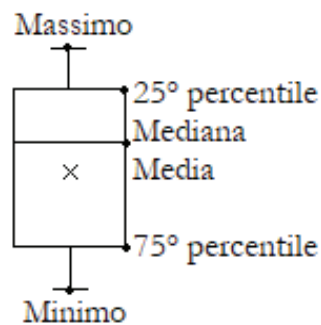


Figura 7-1 Legenda box plot

7.1.1 Torbidità

La torbidità nelle vasche idroponiche dovrebbe essere ben controllata in quanto un'acqua ad alta torbidità potrebbe causare l'intasamento delle radici, con conseguente riduzione dell'assorbimento e rimozione dei nutrienti da parte delle piante, rischiando così una minore produzione. È

7. Risultati dei cicli sperimentali

stato dimostrato che l'incorporazione della membrana filtrante ha ridotto drasticamente la torbidità dell'acqua nelle vasche di allevamento (0,6 NTU) e del permeato (0,2 NTU) (C. Y. Wang et al., 2016b). Di solito, l'utilizzo di un trattamento MBR in un sistema RAS crea un effluente con una torbidità inferiore a 0,5 NTU (Pulefou et al., 2008).

Il sistema 1 ha un abbattimento di range inferiore, dal 30% al 36% del sistema 2. Pertanto, in media, analizzando un sistema acquaponico con trattamento a membrana, si registra una riduzione della torbidità fino al 77%.

La riduzione della torbidità, come per gli altri parametri, è stata calcolata come differenza tra la concentrazione in acquario meno la concentrazione in idroponica, divisa per la concentrazione in acquario. Queste unità sono state scelte perché per rendere comparabili i due sistemi sono le uniche in comune. I risultati confermano che il trattamento di filtrazione a membrana ha efficacemente trattenuto i solidi, seppur con un abbattimento inferiore, dato dai bassi valori degli effluenti in uscita dagli acquari, quasi sempre inferiori a 2 NTU, presi come valore limite.

I risultati hanno anche indicato che il sistema 2 contenente il trattamento di filtrazione a membrana è stato in grado di fornire nutrienti alle piante in modo più efficiente e ha portato a condizioni di crescita della lattuga migliori rispetto al sistema 1, ma anche a una qualità significativamente migliore della lattuga. Come mostrato in Figura 7-3 e Figura 7-4, le foto degli acquari, come dimostrato da due foto scattate nello stesso istante di crescita e periodo dall'ultima manutenzione, indicano che il sistema 2 è molto più pulito del sistema 1

7. Risultati dei cicli sperimentali

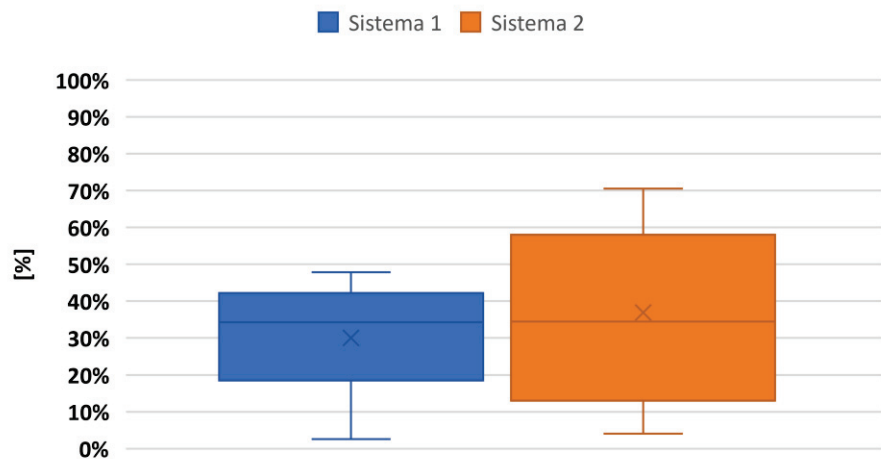


Figura 7-2 Tasso di abbattimento torbidità, cicli sperimentali I-IV



Figura 7-3 Acquario 1, ciclo IV, scatto istantanea a distante di qualche giorno dall'ultima manutenzione effettuata

7. Risultati dei cicli sperimentali



Figura 7-4 Acquario 2, ciclo IV, scatto istantanea a distante di qualche giorno dall'ultima manutenzione effettuata

7.1.2 Ammoniaca

I pesci espellono l'azoto residuo, sotto forma di ammoniaca/ammonio, direttamente nell'acqua attraverso le branchie. I batteri convertono l'ammoniaca in nitrito e poi in nitrato. L'ammoniaca e il nitrito sono tossici per i pesci, ma il nitrato è relativamente innocuo ed è la forma preferita di azoto per la coltivazione. Pertanto è essenziale garantire che vi sia un buon livello di riduzione che per il sistema 2 è stato più efficiente del sistema 1 come si può evincere dalle figure successive. Il sistema 1 ha un abbattimento medio del 26% rispetto al 33% del sistema 2.

7. Risultati dei cicli sperimentali

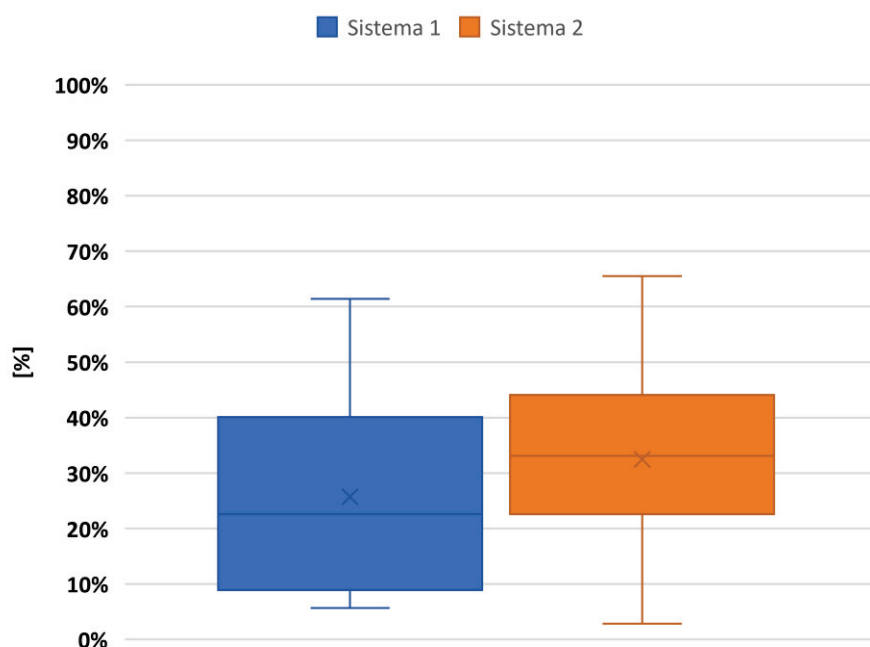


Figura 7-5 Abbattimento ammoniacca, cicli I-IV

7.1.3 Nitrati

La concentrazione ideale di nitrati per la crescita delle piante raccomandata da (Somerville et al., 2014) è di 5-150 mg/l. I valori di concentrazione di nitrati nell'acqua dipendono dalla densità alimentare del pesce (che cambia durante il ciclo di produzione annuale man mano che il pesce continua a crescere), dalla velocità del processo di nitrificazione e dall'assorbimento di azoto da parte della coltura (Wongkiew et al., 2021). Inoltre, il sistema 2 contenente il trattamento di filtrazione a membrana è stato in grado di fornire nutrienti alle piante. Infatti, per il sistema 2 è più efficiente e ha portato a una migliore condizione di crescita e a un minore intasamento delle radici rispetto al sistema convenzionale. Questo perché il nitrato è l'unico composto azotato che le piante sono in grado di assumere.

Tarre & Green, 2004 hanno concluso che le alte concentrazioni di nutrienti non sono dannose né per i pesci né per le piante. Tuttavia, dal punto di vista della produzione, l'eccesso di offerta di nutrienti aumenta il costo di produzione ma indica che il sistema non è molto efficiente dal

7. Risultati dei cicli sperimentali

punto di vista della produzione e l'accumulo di nutrienti peggiora la qualità dell'acqua. Infatti, si accumuleranno in alte concentrazioni se l'apporto di sostanza nutritiva è in eccesso rispetto al fabbisogno di crescita (Gent, 2003), come avvenuto nel sistema 1 dove la concentrazione di nitrati nei sistemi idroponici era maggiore di quella nella vasca dei pesci, restituendo quindi un abbattimento negativo dei nitrati. Come indicato nelle figura successiva, il sistema 2 ha prestazioni migliori rispetto al sistema 1 nella riduzione dei nitrati.

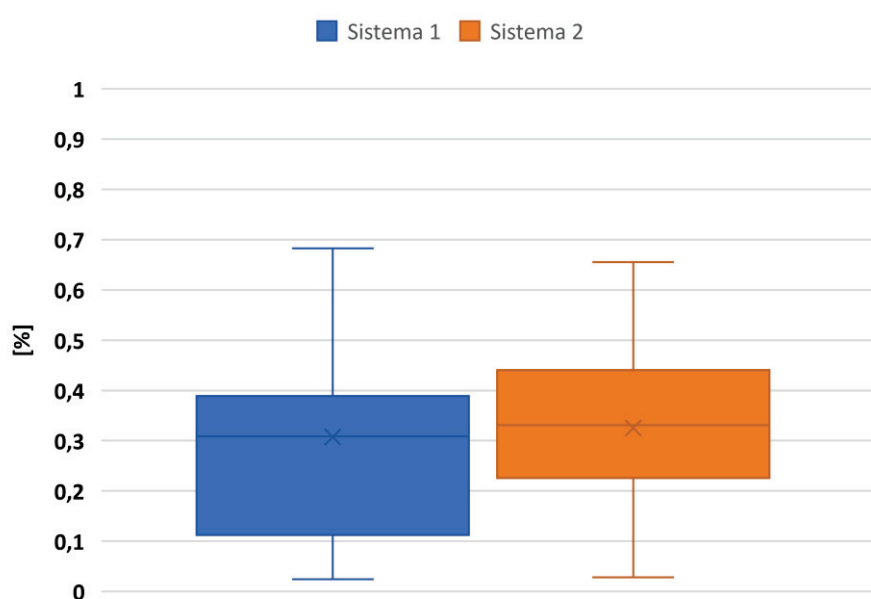


Figura 7-6 Abbattimento nitrati, cicli I-IV

7.1.4 Crescita specie ittica

I pesci sono stati etichettati e pesati all'inizio e alla fine di ogni ciclo. I risultati hanno mostrato come i trattamenti hanno influenzato la crescita delle specie ittiche; in particolare si può notare che ad ogni ciclo la specie cresce esponenzialmente nel sistema 2. La qualità dell'acqua degli acquari crea condizioni favorevoli per la loro crescita e sviluppo, come illustrato dai grafici di seguito riportati, in cui si evince chiaramente come la specie del sistema 2 si sia evoluta più in fretta e più corposa rispetto al sistema 1.

7. Risultati dei cicli sperimentali

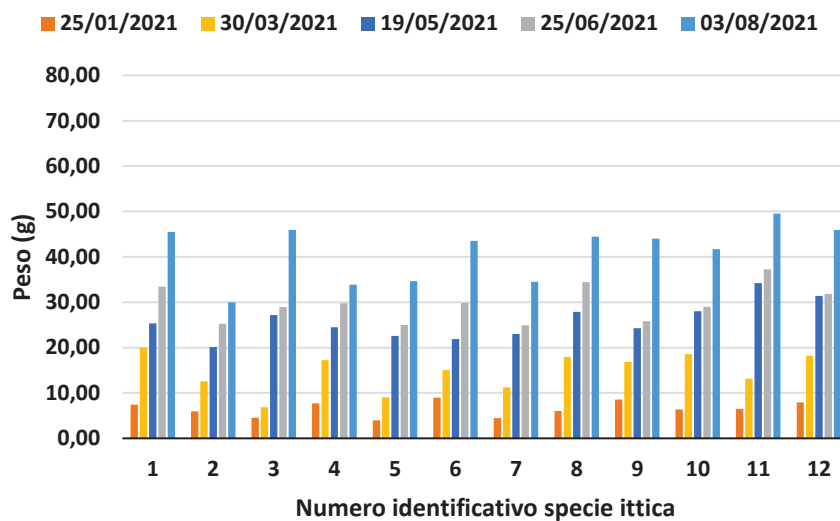


Figura 7-7 Crescita specie ittica, acquario 1, cicli I-IV

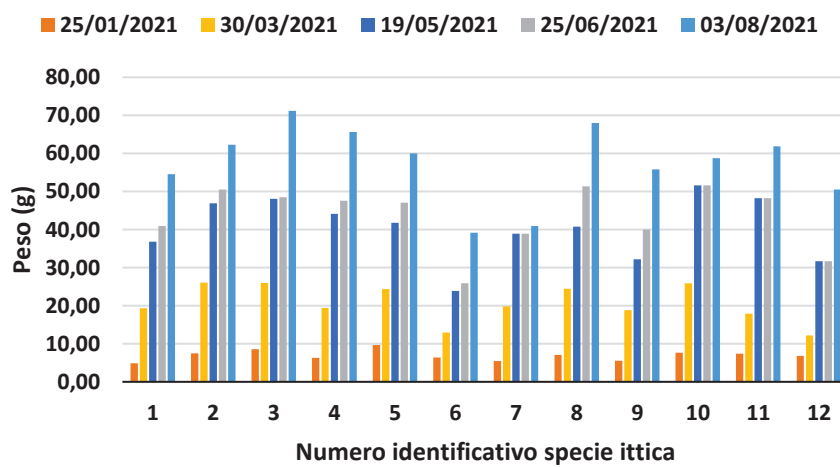


Figura 7-8 Crescita specie ittica, acquario 2, cicli I-IV

7. Risultati dei cicli sperimentali

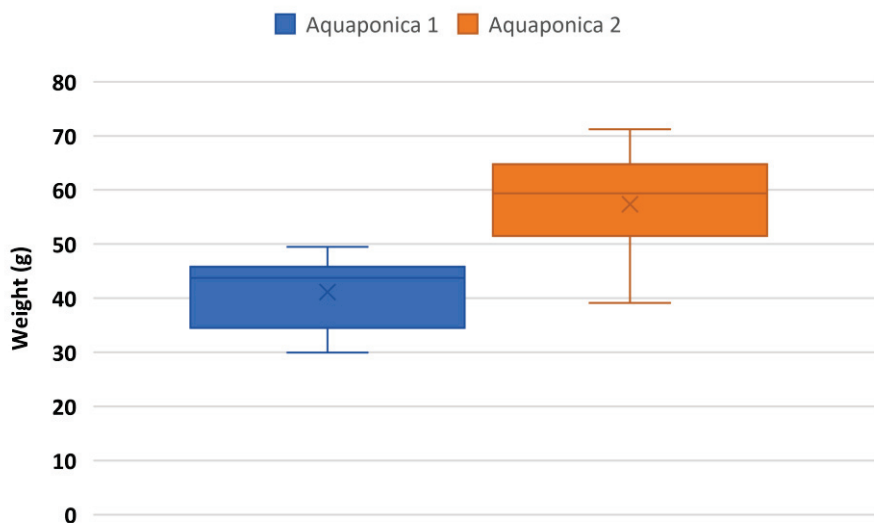


Figura 7-9 Rappresentazione mediante box plot della crescita della specie ittica

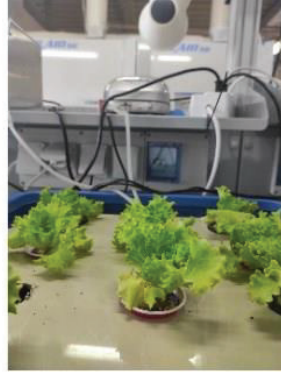
7.1.5 Crescita specie vegetale

I fotogrammi che seguono sono illustrativi al fine di dimostrare come la specie vegetale del sistema 2 sia cresciuta non solo più in fretta, ma anche in maniera più rigogliosa rispetto al sistema 1. Ciò è dovuto dal beneficio dei trattamenti in quanto hanno favorito l'assorbimento dei nutrienti della specie vegetale in maniera sicura e costante nel tempo.

7. Risultati dei cicli sperimentali



2 Luglio



5 Luglio



8 Luglio



12 Luglio



15 Luglio



22 Luglio

7. Risultati dei cicli sperimentali

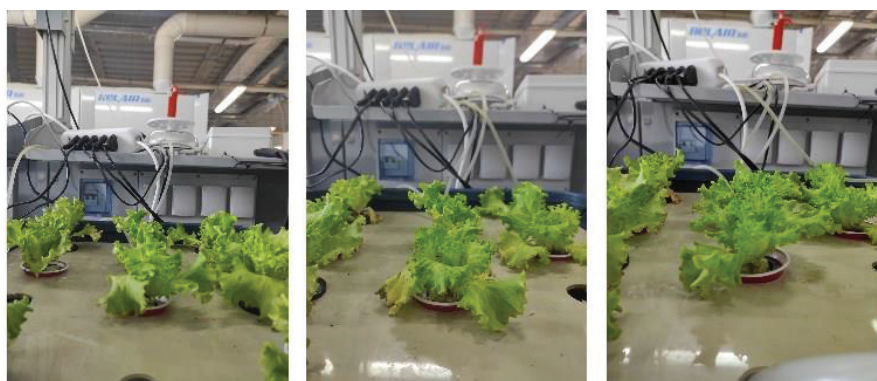


27 Luglio

29 Luglio

3 Agosto

Figura 7-10 Crescita specie vegetale, ciclo IV, sistema 1



2 Luglio

5 Luglio

8 Luglio

7. Risultati dei cicli sperimentali



12 Luglio



15 Luglio



22 Luglio



27 Luglio



29 Luglio



3 Agosto

Figura 7-11 Crescita specie vegetale, ciclo IV, sistema 2

7. Risultati dei cicli sperimentali

7.2 RISULTATI CICLO SPERIMENTALE V-VI

Il seguente ciclo sperimentale come detto è stato preparatorio per i successivi cicli. Sono state condotte le analisi di routine al fine di garantire la crescita controllata e sicura della specie ittica.

Al tempo stesso è stata valutata l'efficienza di abbattimento della torbidità e del TAN della SFDM inserita nel fotobioreattore progettato secondo i calcoli effettuati e riportati nel precedente capitolo. Il fotobioreattore così progettato è stato posto in un sistema a ricircolo chiuso con un acquario, al fine di trattare le acque reflue proveniente dagli stessi.

7.2.1 Torbidità

Sono stati effettuati campionamenti con cadenza giornaliera, al fine di monitorare il tasso di abbattimento della torbidità da parte della SFDM inserita all'interno del fotobioreattore microalgale. Ciò è stato fatto per valutare la prestazione della SFDM, campionando all'interno del reattore e all'uscita del reattore (ossia il permeato). Da tale analisi risulta chiaramente evidente come la torbidità del fotobioreattore sia notevolmente più alta rispetto ai sistemi di acquacoltura e idroponici. Inoltre la stessa torbidità all'interno dei reattori è andata sempre più aumentando, dovuto dalla maggiore presenza di microalghe che si stavano creando all'interno del fotobioreattore. I risultati come mostrato in figura successiva, dimostrano che la SFDM, ha fin da subito un abbattimento della torbidità pari al 90% in media, per poi diminuire con il tempo, di seguito vengono riportati i valori medie nelle 8 settimane relativi ai cicli V-VI.

7. Risultati dei cicli sperimentali

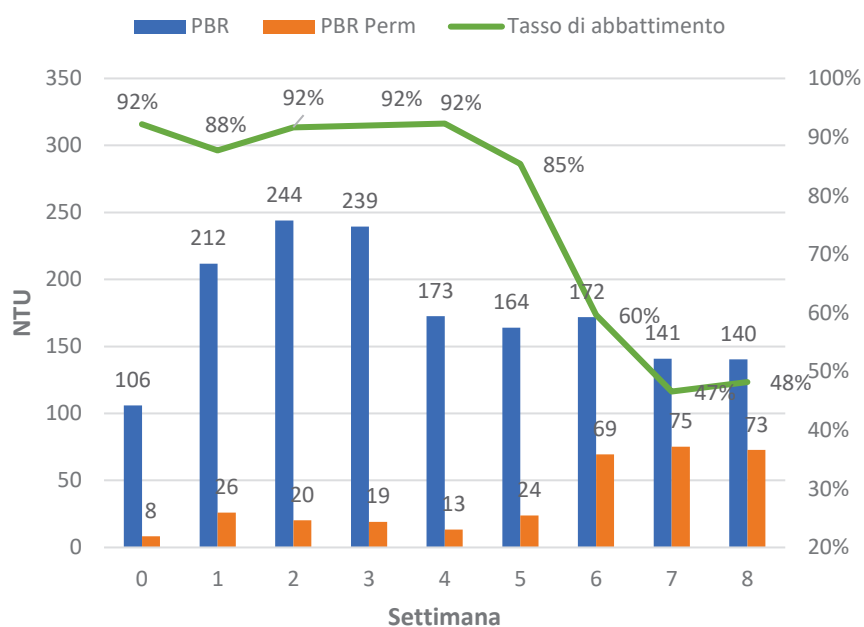


Figura 7-12 Torbidità del sistema algacquacoltura, cicli V-VI

Il minor tasso di abbattimento della SFDM è dovuto alla non pulizia della membrana, dove si ritiene sia necessario effettuare ogni 4 settimana, al fine di rimuovere anche le alghe che cresceranno su di essa. Le alghe recuperate in tale processo inoltre, posso essere utilizzate, dopo essere state trattate, come mangime per i pesci.

7.2.2 TAN

Allo stesso modo della torbidità è stata fatta una valutazione anche per il TAN. Ciò perché si voleva investigare sul tasso di abbattimento dei nutrienti da parte delle microalghe. In media si è visto come le alghe non hanno un impatto negativo sul ciclo dei nutrienti, dove hanno registrato un tasso di abbattimento medio del 15,8%.

7. Risultati dei cicli sperimentali

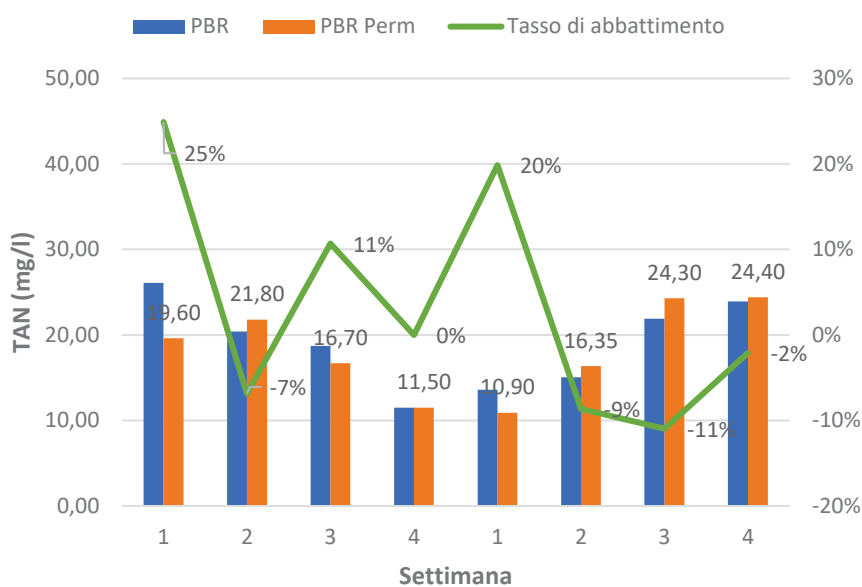


Figura 7-13 TAN del sistema algacquacoltura, cicli V-VI

7.3 RISULTATI CICLO SPERIMENTALE VII-VIII

In entrambi i cicli sono state realizzate le seguenti analisi di laboratorio:

- Analisi dei parametri chimico-fisici (pH, temperatura, ossigeno disciolto);
- Analisi della torbidità;
- Analisi dell'azoto totale;
- Analisi dei solidi sospesi totali (SST);
- Analisi microbiologiche

Le analisi sono state ripetute due volte a settimana su un totale di 7 campioni, adoperando pipette graduate. I punti di campionamento sono stati i seguenti:

7. Risultati dei cicli sperimentali

- all'interno dell'acquario 1;
- all'interno della vasca idroponica 1;
- all'interno dell'acquario 2;
- all'interno della vasca idroponica 2;
- all'interno del fotobioreattore microalgale;
- all'uscita della disinfezione;
- all'interno della vasca del permeato

Si è scelto di riportare nei paragrafi successivi i risultati più significativi ottenuti nell'analisi del set-up relativo ai cicli sperimentali VII-VIII.

Si precisa che per il calcolo dell'abbattimento è stato effettuato come differenza fra il sistema di acquacoltura meno il sistema idroponico, diviso il sistema di acquacoltura.

Infine, eseguendo un confronto statistico dei dati, considerando il valore medio, il venticinquesimo ed il settantacinquesimo percentile, si sono ottenuti grafici box plot, per confrontare la variabilità dei dati.

7.3.1 pH

I principali parametri chimico-fisici per il corretto funzionamento del sistema sono pH, temperatura e ossigeno disciolto.

Sono stati considerati i limiti minimo e massimo che costituiscono il range ottimale di crescita della Tilapia, della lattuga e della microalga *Chlorella vulgaris*.

Per quanto riguarda il pH, il range ottimale per l'allevamento della tilapia è tra 6 e 9, per la lattuga è tra 6 e 7 e per *Chlorella vulgaris* è tra 6 e 9, in base a quanto riportato nel capitolo 5.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti.

7. Risultati dei cicli sperimentali

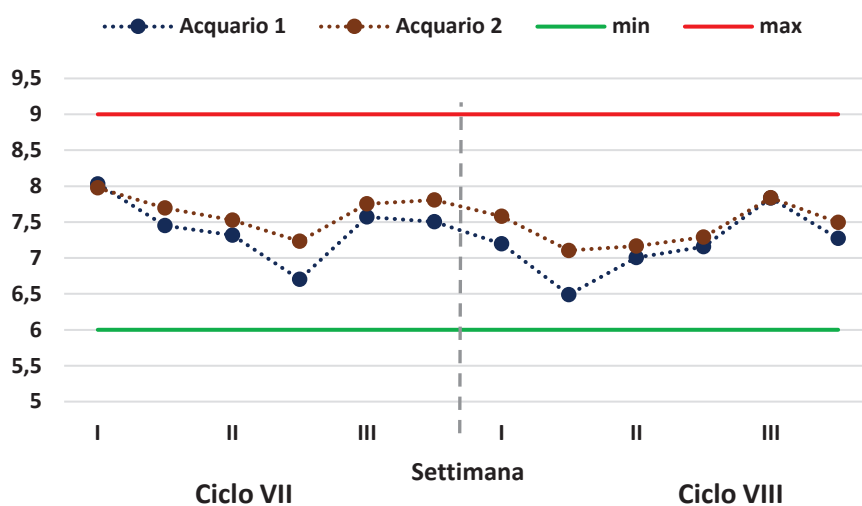


Figura 7-14: Andamento pH acquaculture, cicli VII-VIII

Dalla figura precedente si evince che il pH all'interno degli acquari si è mantenuto all'interno del range ottimale previsto per la tilapia, senza presentare grandi oscillazioni tra i due cicli o tra i due sistemi.

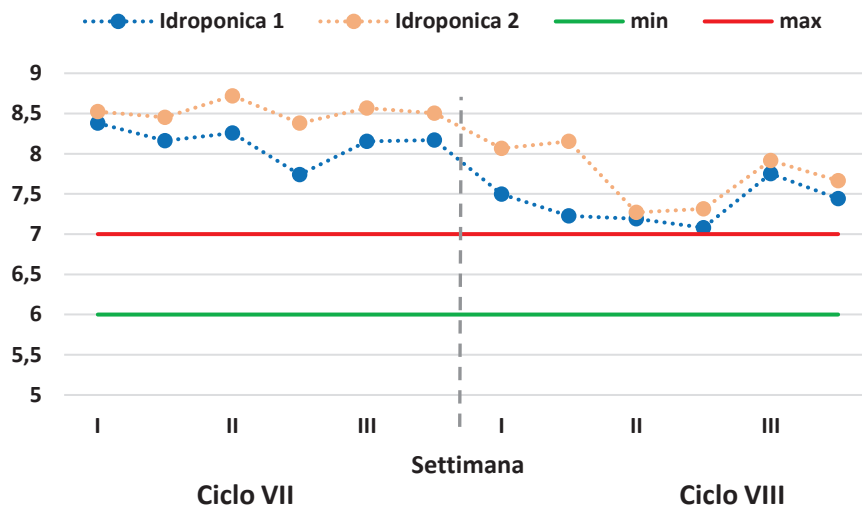


Figura 7-15 Andamento pH idroponiche, cicli VII-VIII

7. Risultati dei cicli sperimentali

Dalla Figura precedente si evince che il pH all'interno delle vasche idroponiche si è mantenuto in entrambi i cicli e per entrambi i sistemi fuori dal range ottimale previsto per la coltivazione della lattuga. Ci possono essere varie motivazioni di questo andamento del pH. Innanzitutto, bisogna considerare che le piante effettuano la fotosintesi clorofilliana durante il giorno consumando CO₂ e acido carbonico e la respirazione durante la notte rilasciando acido carbonico, pertanto il pH aumenterà di giorno e diminuirà di notte (FAO, 2014). A dimostrazione di quanto appena detto, i risultati mostrano che la presenza delle microalghe, che come le piante effettuano la fotosintesi, nel sistema 2 ha prodotto un pH maggiore nella vasca idroponica 2 rispetto alla vasca idroponica 1 in tutte le misurazioni effettuate durante i due cicli. Valori alti di pH possono dipendere, anche, da uno scarso processo di nitrificazione da parte dei batteri, che in condizioni di buon funzionamento risulta un processo acidificante (FAO, 2014). Una terza motivazione va ricercata nel fatto che in tutte le vasche è stata utilizzata acqua di rubinetto del comune di Fisciano: da una ricerca sul web si è riscontrato che il valore medio del pH dell'acqua di Fisciano è pari a 7,8, già di per sé superiore al range previsto (Gori, 2021).

Lo studio di Zou et al., 2016 ha dimostrato che un pH alto riduce la crescita delle piantine. Nonostante ciò, si è registrata una migliore crescita della specie vegetale nel sistema 2 rispetto al sistema 1.

Dalla figura successiva si evince che il pH nell'MPBR si è mantenuto all'interno del range ottimale previsto per *Chlorella vulgaris*, durante entrambi i cicli.

7. Risultati dei cicli sperimentali

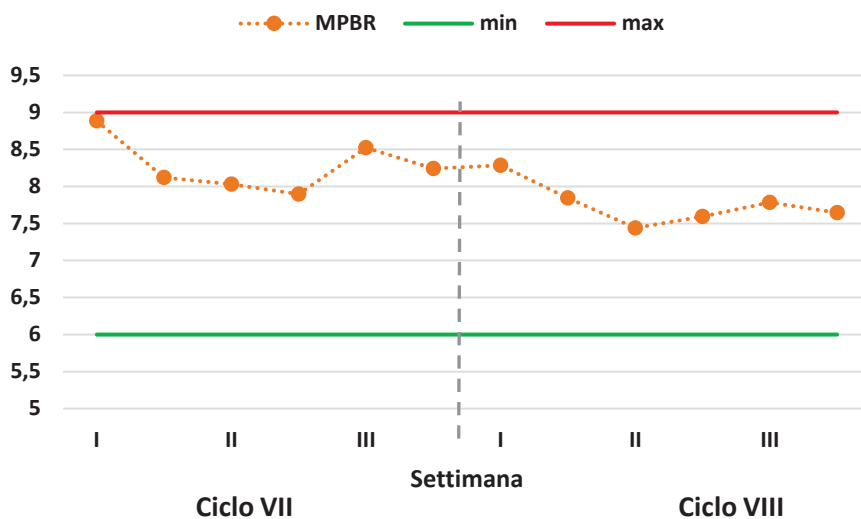


Figura 7-16 Andamento pH fotobioreattore microalgale, cicli VII-VIII

7.3.2 Ossigeno disciolto

Per quanto riguarda l'ossigeno disciolto, il range ottimale previsto per la tilapia è 4-8 mg/l, per la lattuga deve essere > 3 mg/l e per *Chlorella vulgaris* deve essere < 31 mg/l. Dalla figura successiva si evince che gli acquari mostrano valori medi quasi identici, intorno a 5,4-5,5 mg/l in linea con i risultati di letteratura (Ani et al., 2022). Lo stesso capita per le vasche idroponiche, ma con valori più alti, intorno a 7,2-7,3 mg/l. Anche per l'ossigeno disciolto l'MPBR si colloca tra gli acquari e le vasche idroponiche con un valore medio intorno a 6,8 mg/l.

7. Risultati dei cicli sperimentali

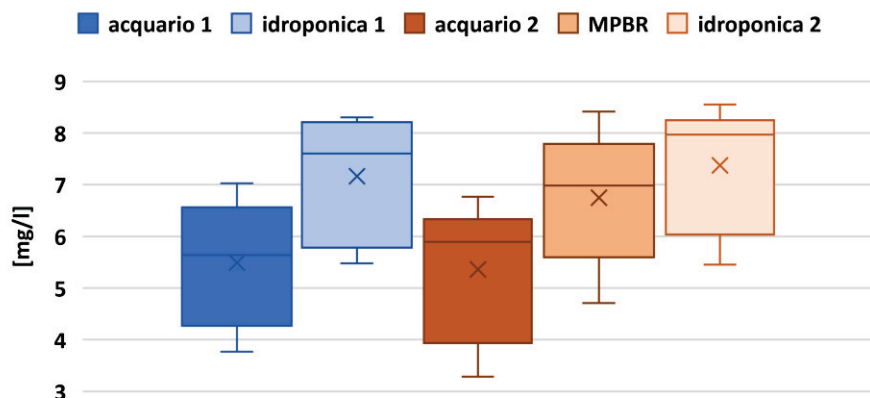
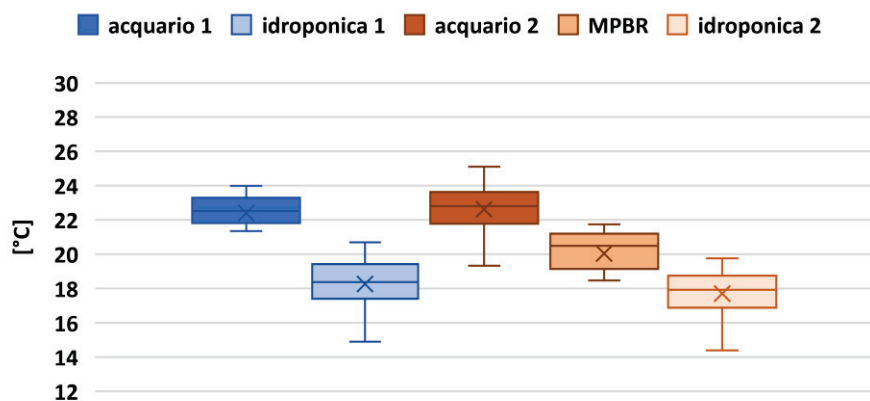


Figura 7-17 Ossigeno disciolto, cicli VII-VIII

7.3.3 Temperatura

Per quanto riguarda la temperatura, il range ottimale previsto per la tilapia è 20-35 °C, per la lattuga 15-22 °C e per *Chlorella vulgaris* 20-30 °C. Per i due cicli sperimentali effettuati tutti i range sopra descritti sono stati rispettati, soltanto per alcuni istanti la temperatura del fotobioreattore microalgale è scesa di qualche grado al di sotto del valore limite, però ciò non ha compromesso né l'efficacia del trattamento, né la crescita delle alghe



7. Risultati dei cicli sperimentali

Figura 7-18 Temperatura, cicli VII-VIII

7.3.4 TAN

Dalla figura successiva si evince che l'azoto totale segue un andamento pressoché decrescente dall'acquario alla vasca idroponica nel sistema 2 durante tutte le settimane dei due cicli. Questo aspetto si può apprezzare di meno nel sistema 1 dove in alcuni casi è presente addirittura un aumento tra l'acquario e la vasca idroponica. Bisogna, inoltre, tenere conto che l'azoto totale non fornisce alcuna informazione circa le singole specie azotate presenti (azoto ammoniacale, azoto organico, nitriti e nitrati) di cui costituisce soltanto la somma. Inoltre, va sottolineato che nell'MPBR le microalghe non assorbono molto in termini di nutrienti, consentendo di avere una concentrazione comunque elevata nella vasca idroponica. Inoltre, nella disinfezione e nel permeato i valori nella maggior parte dei casi rimangono sempre gli stessi: ciò conferma il fatto che la disinfezione è pressoché ininfluenza sulla concentrazione dei nutrienti, in linea con i risultati di letteratura.

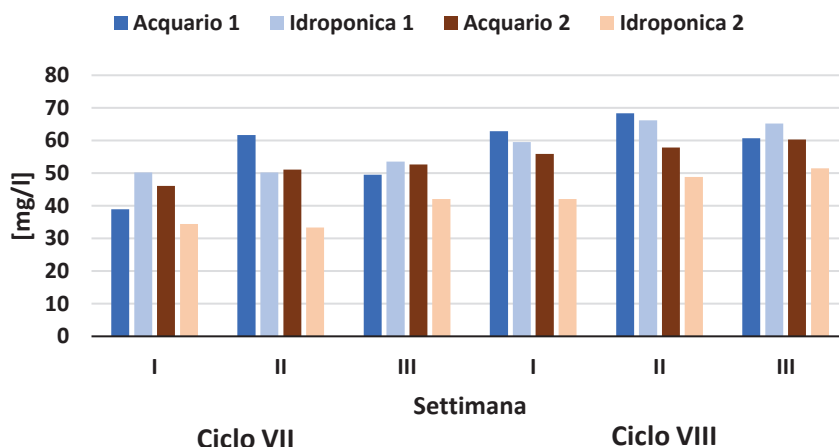


Figura 7-19 TAN, cicli VII-VIII

7. Risultati dei cicli sperimentali

7.3.5 Prove microbiologiche

Le prove microbiologiche sono state effettuate con lo scopo di individuare come descritto in precedenza, l'eventuale presenza di Enterobacteriaceae. Dalla figura successiva si evince che il sistema 2 presenta un tasso di abbattimento maggiore rispetto a quello del sistema 1. Il sistema 1 presenta comunque elevati tassi di abbattimento, nonostante non siano presenti trattamenti di disinfezione. In uno studio di Velichkova et al., 2020 sono stati raggiunti dei risultati simili nell'analisi di Enterobacteriaceae in un sistema acquaponico che produceva lenticchia d'acqua. La motivazione che è stata suggerita dagli autori in merito alla bassa carica patogena presente nell'acqua dell'unità idroponica è che questi microrganismi tendevano ad attaccarsi alle radici degli organismi vegetali. Per tale motivo essi riuscirebbero a sfuggire alla fase di campionamento. Ad ogni modo, dai risultati ottenuti si evince che il tasso di abbattimento medio dei due sistemi, considerando l'intero periodo di sperimentazione dei due cicli, è pari al 77% circa per il sistema 1, in linea con i risultati di Velichkova et al., 2020, e al 94% per il sistema 2.

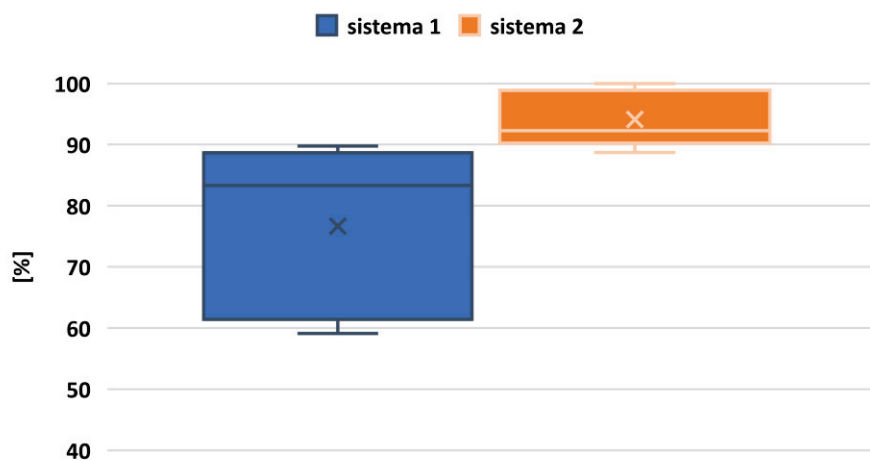


Figura 7-20 Tasso di abbattimento escherichia coli, cicli VII-VIII

7. Risultati dei cicli sperimentali

Oltre alle prove sopra descritte, si è cercato di capire come si comportavano le colonie batteriche nel tempo. Allo scopo sono state effettuate analisi a diversi tempi: $t = 0$ (istante di inizio ricircolo), $t = 15$ min (dopo 15 minuti di disinfezione), $t = 30$ min (dopo 30 minuti di disinfezione), $t = 45$ min (dopo 45 minuti di disinfezione), $t = 60$ min (dopo 60 minuti di disinfezione). Le analisi sono state eseguite per tre giorni consecutivi considerando questa volta tutti e sette i punti di campionamento dei cicli sperimentali.

I risultati hanno mostrato che il trattamento di disinfezione risultava efficace già dopo 15 minuti di trattamento, con abbattimenti che superano il 99% (<1 CFU/ml), in linea con i risultati di letteratura (Pantanella, 2012). Inoltre, si è anche notato che i valori nelle vasche idroponiche, nella vasca del permeato e nel fotobioreattore erano molto bassi. Pertanto, si è desunto che ci fossero degli abbattimenti naturali a lungo termine durante la notte che determinavano la riduzione delle colonie batteriche. Per confermare ciò sono state effettuate delle analisi durante le tre fasce del trattamento di disinfezione (9-10, 12-13, 15-16). I risultati sono stati soddisfacenti e hanno confermato l'efficacia del trattamento di disinfezione già nei primi 15 minuti, con abbattimenti che superano il 99%, così come l'abbattimento naturale a lungo termine all'interno delle vasche idroponiche e nella vasca del permeato.

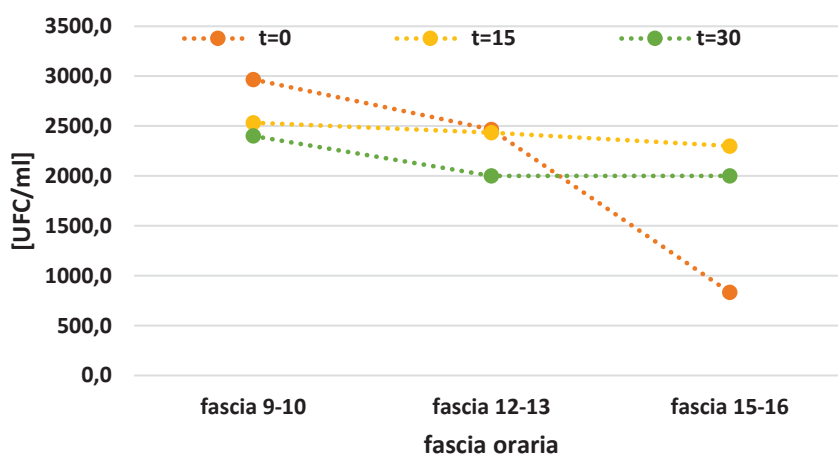


Figura 7-21 Abbattimento carica batterica, ciclo IX, sistema 1

7. Risultati dei cicli sperimentali

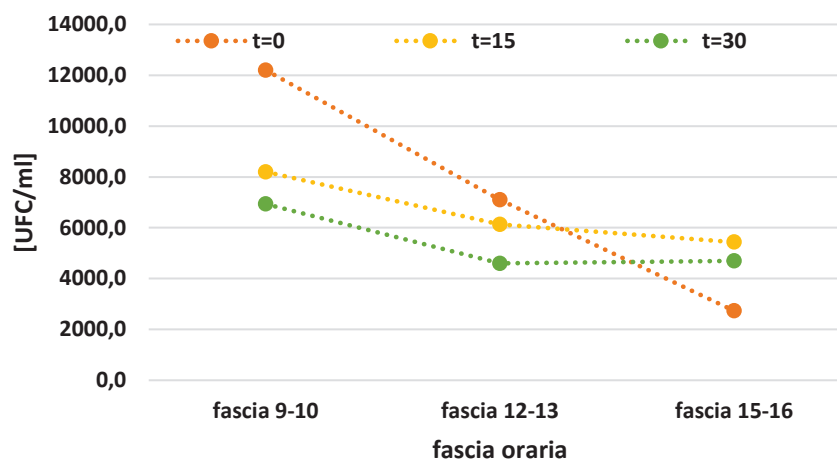


Figura 7-22 Abbattimento carica batterica, ciclo IX, sistema 1

7.4 RISULTATI CICLO SPERIMENTALE IX-X

Durante tutto il ciclo sono state eseguite delle analisi di laboratorio che hanno avuto come scopo quello di monitorare il funzionamento dei due sistemi. Le analisi svolte sono state utili per capire se fosse necessario apportare delle modifiche nel processo o meno, nello specifico sono le seguenti:

- Analisi dei parametri chimico-fisici (pH, temperatura, ossigeno disciolto);
- Analisi della torbidità;
- Analisi dell'ammonio;
- Analisi dei solidi sospesi totali (SST);
- Analisi della clorofilla;
- Analisi del COD

7. Risultati dei cicli sperimentali

I punti di campionamento sono stati i seguenti:

- all'uscita dell'acquario 1, ACQUA 1 OUT;
- all'interno dell'acquario 1, ACQUA 1 IN;
- all'uscita dell'acquario 2, ACQUA 2 OUT;
- all'interno dell'acquario 2, ACQUA 2 IN;
- all'uscita dell'idroponica 1, IDRO 1 OUT;
- all'interno dell'idroponica 1, IDRO 1 IN;
- all'uscita dell'idroponica 2, IDRO 2 OUT;
- all'interno dell'idroponica 2, IDRO 2 IN;
- all'interno del reattore 1 (MPHB), Reattore 1 IN;
- all'uscita del reattore 1 (MPHB), Reattore 1 OUT, che rappresenta anche il permeato della SFDM;
- all'interno del reattore 2 (refluo caseario), Reattore 2 IN;
- all'uscita del reattore 2 (refluo caseario), Reattore 2 OUT, che rappresenta anche il permeato della SFDM;

7.4.1 Torbidità

I risultati relative alla torbidità hanno dimostrato che la SFMD di entrambi i reattori hanno performato in maniera ottimale dopo una settimana di lavoro in continuo. Questo perché nei primi giorni di vita è necessario si formi il biofilm, in grado di raggiungere poi efficienza di filtrazione sempre più efficace nei giorni successivi. La figura successiva dimostra infatti come in una settimana si sia registrato un abbattimento considerevole, soprattutto nel reattore contenente nel microalghe.

7. Risultati dei cicli sperimentali

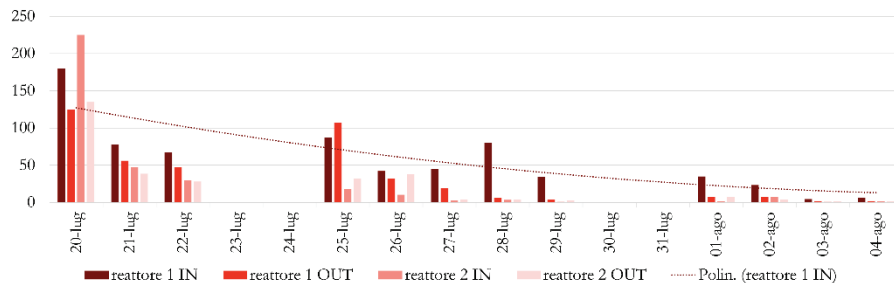


Figura 7-23 Andamento torbidità, ciclo IX

7.4.2 COD

I risultati relativamente al COD hanno dimostrato come le microalghe abbiano svolto un ruolo fondamentale per l'abbattimento. Ciò perché il refluo caseario è un refluo dall'alto carico organico e un processo biologico come quello delle microalghe, riesce a trattare in maniera costante e continua tale tipologia di refluo. Infatti, come è possibile vedere dal grafico successivo, fin dai primi giorni si è rilevato un notevole abbattimento, per poi avere valori di COD pressoché nulli, già dopo una settimana.

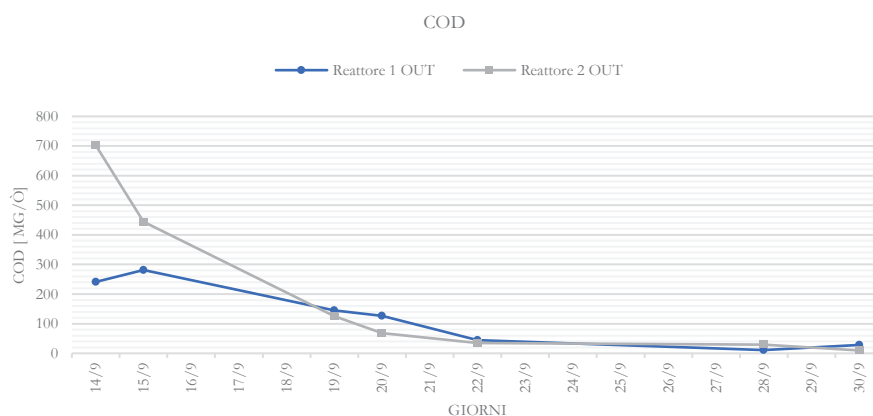


Figura 7-24 Andamento COD, ciclo IX

7. Risultati dei cicli sperimentali

7.4.3 Tasso di crescita specie vegetale

Di seguito si riportano i risultati ottenuti relativamente alla crescita delle piantine durante il IX ciclo di sperimentazione, riportando il tasso di crescita per ognuna delle specie introdotta, numerate da 1 a 8. I risultati hanno mostrato come tutte le piante del sistema 2 hanno avuto un tasso di crescita maggiore al sistema 1 ad eccezione della pianta n°4. Questo dimostra ancora nuovamente come la specie vegetale sia notevolmente influenzata dai trattamenti avente una crescita complessiva del 33% maggiore rispetto al sistema convenzionale.

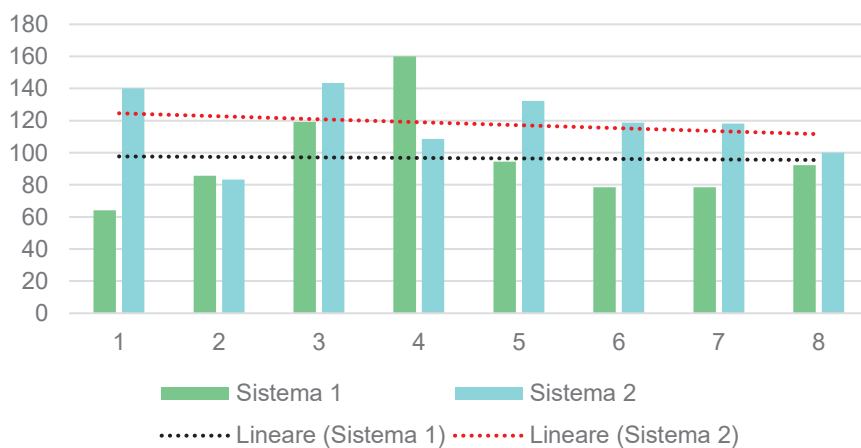


Figura 7-25 Tasso di crescita specie vegetale, ciclo IX

8 DISCUSSIONE DEI RISULTATI E SVILUPPI FUTURI

L'attività sperimentale, condotta presso il Laboratorio SEED, ha permesso la valutazione ed il confronto di un sistema acquaponico convenzionale con sistemi acquaponici avanzati. I risultati precedentemente illustrati nei diversi cicli hanno dimostrato come un sistema acquaponico avanzato apporti benefici per la crescita della specie ittica e vegetale, ma non solo. Il sistema acquaponico avanzato inoltre, permette di poter trattare anche acque reflue, recuperandone i nutrienti contenuti in essi nell'ottica dell'economia circolare. Infine, il valore aggiunto delle alghe consente di ottenere sistemi acquaponici sempre più autosufficienti, in grado di rendere i sistemi acquaponici sempre più sostenibili.

Per dimostrarne l'applicabilità dei sistemi in scala reale, sono stati dapprima effettuate delle analisi relative ai possibili scenari futuri e agli impianti pilota ad esso correlati

8.1 SVILUPPI FUTURI

Con i sistemi acquaponici avanzati, è possibile dunque produrre cibo con un valore aggiunto. Ciò si traduce anche in un maggiore profitto economico, basti pensare ad esempio a come un prodotto biologico abbia un valore di mercato nettamente maggiore ai prodotti messi in commercio con tecniche tradizionali.

Uno sviluppo futuro sarebbe quello di valutare pertanto anche dal punto di visto quantitativo il reale valore aggiunto dei prodotti coltivati nei sistemi acquaponici avanzati.

Per tale motivo durante i diversi cicli sperimentali sono stati raccolti diverse specie vegetali che sono stati opportunamente etichettate e congelate.

8. Discussione dei risultati e sviluppi futuri

Per effettuale tale tipologia di analisi però sarebbe opportuno anche il supporto di competenze trasversali nell'ambito biologico e chimico oltre che ingegneristico per fornire un quadro completo e garantire una sicurezza alimentare dei prodotti.

Un ulteriore passo avanti potrebbe essere rappresentato dall'incremento di scala dei sistemi visti in questo studio. Nella figura successiva è riportata un'illustrazione di un possibile impianto a scala pilota che potrebbe essere realizzato per valutare l'efficacia dei processi di trattamento e di produzione acquaponica ad una scala maggiore. Pertanto, viene rappresentato un sistema opportunamente dimensionato rispetto ai valori delle unità che costituiscono i cicli sperimentali di algaacquacoltura, considerando che i volumi sono stati quadruplicati.

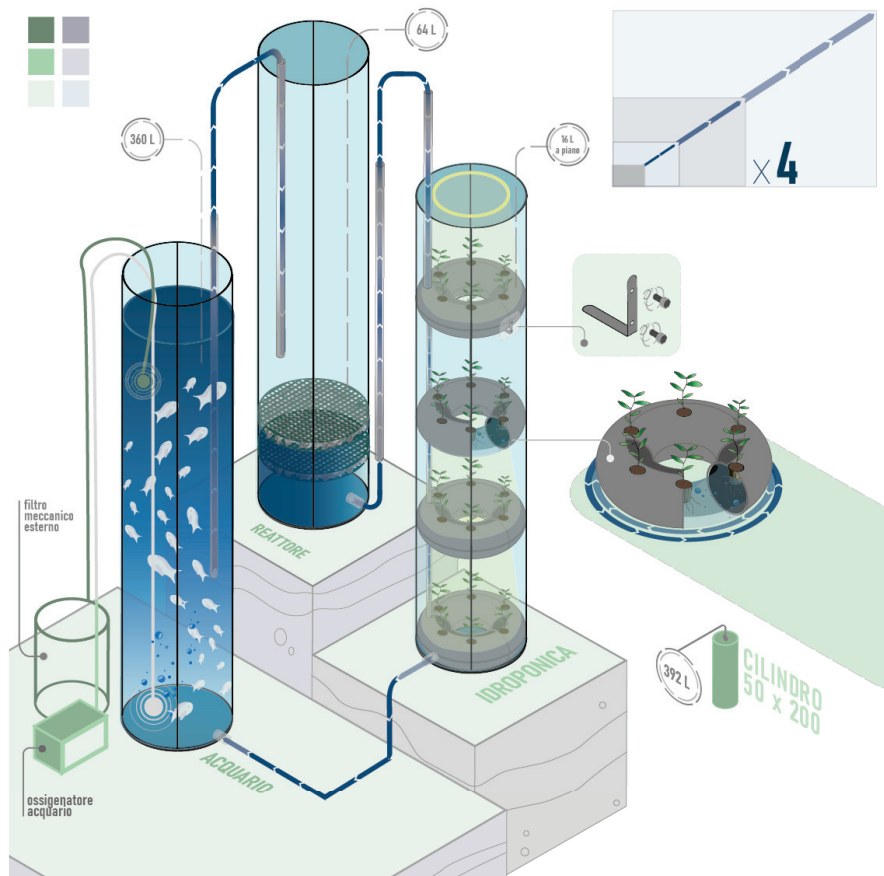


Figura 8-1 Sistema acquaponico a scala pilota

8. Discussione dei risultati e sviluppi futuri

Il sistema a scala pilota ideato, sarebbe in grado di produrre pesci, piante ad alghe dall'alto valore aggiunto, con l'utilizzo al tempo stesso di poco spazio, facilmente implementabile anche all'interno delle città, secondo i principi dell'agricoltura urbana.

Per quanto possa sembra un sistema futuristico, in Giappone ad esempio stanno riqualificando delle vecchie cabine telefoniche, utilizzandole come veri e propri sistemi di acquacoltura.



Figura 8-2 Riutilizzo di vecchie cabine telefoniche, Osaka, Giappone, 2012 (fonte:<https://www.millionaire.it/in-giappone-le-vecchie-cabine-telefoniche-diventano-acquari/>)

8. Discussione dei risultati e sviluppi futuri

9 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha avuto come scopo principale quello di valutare le prestazioni dei trattamenti avanzati sui sistemi acquaponici e sul recupero dei nutrienti.

La crescente domanda di cibo ed il conseguente consumo di risorse ha condotto la ricerca verso lo studio di sistemi produttivi alternativi. L'acquaponica rappresenta una possibile scelta per rafforzare la sicurezza alimentare, incrementare l'offerta di specie ittiche e vegetali, e riutilizzare risorse fondamentali. Con i sistemi acquaponici è possibile ottenere la produzione contemporanea sia di specie acquatiche, sia di specie vegetali utilizzando quantità ridotte di acqua, di fertilizzanti e di area di coltura. Un sistema acquaponico convenzionale è costituito da vasche idroponiche, dove si ha coltivazione senza suolo, e vasche di acquacoltura, dove si allevano le specie acquatiche. Le due unità interagiscono scambiandosi flussi di acqua, così da permettere alle specie vegetali di ricevere nutrienti e alle specie acquatiche di ottenere acqua fitodepurata. Con l'implementazione di sistemi avanzati di trattamento biologico e di disinfezione è possibile poi migliorare i parametri delle acque ed incrementare l'assorbimento dei nutrienti. Inoltre

Il recupero di nutrienti è fondamentale nell'ottica dell'economia circolare perchè, oltre a migliorare la qualità delle acque, permette il loro reimpiego in altri processi, come ad esempio il reimpiego come fertilizzanti in agricoltura. Le microalghe inoltre, possiedono un buon potenziale per essere integrate con i sistemi di acquacoltura a ricircolo perchè possono convertire i composti azotati di scarto dei pesci in nutrienti e condividere gli stessi parametri chimico fisici delle acque. La biomassa microalgale ricca di nutrienti, lipidi, carboidrati e proteine può essere poi riutilizzata per la produzione di integratori, mangime per pesci o come biocarburante.

Inoltre, la combinazione del sistema acquaponico con il fotobioreattore costituisce anche una strategia di mitigazione dell'impronta di carbonio (*carbon footprint*). L'anidride carbonica prodotta durante le attività vitali dei pesci può essere iniettata nel fotobioreattore ed utilizzata dalle microalghe

8. Discussione dei risultati e sviluppi futuri

per eseguire la fotosintesi clorofilliana, depurare il refluo e sviluppare la biomassa.

In definitiva, i sistemi acquaponici rappresentano una soluzione innovativa e sostenibile per l'urban farming, consentendo di realizzare un progresso rispettoso dell'ambiente, minimizzando i consumi di acqua, trattando anche le acque reflue, assicurando un'adeguata qualità e garantendo il riutilizzo dei nutrienti nell'ottica dell'economia circolare.

BIBLIOGRAFIA

- Ackerman, K. (2012). Urban agriculture: opportunities and constraints. In *Metropolitan Sustainability* (pp. 118–146). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096463.2.118>
- AeroFarms. (2020). *AeroFarms - An environmental champion, AeroFarms is leading the way to address our global food crisis by growing flavorful, healthy leafy greens in a sustainable and socially responsible way.* <https://aerofarms.com/>
- Agenzia delle Entrate. (2020). *Aree tematiche - Bonus verde - Agenzia delle Entrate.* <https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/web/guest/aree-tematiche/casa/agevolazioni/bonus-verde>
- Alcaraz, R., Hernández-Contreras, A., Iglesias, P., & Hernández, M. D. (2021). Effect of the inclusion of microalgae on the physical properties of extruded feed for gilthead seabream (*Sparus aurata* L.). *Algal Research*, *53*, 102167. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102167>
- Aleksandar Kolev Slavov. (n.d.). *General Characteristics and Treatment Possibilities of Dairy Wastewater – A Review.* <https://doi.org/10.17113/ft.b.55.01.17.4520>
- Al-Kodmany, K. (2018a). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. In *Buildings* (Vol. 8, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
- Al-Kodmany, K. (2018b). The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. *Buildings*, *8*(2), 24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
- Allnut, P., Bussey, W., Gedge, D., Harris, M., Henning, I., Poë, S., Ridout, N., Singleton, P., Sorrill, J., Tar, Dr. A., & Zeller, S. (2014). *The GRO Green Roof Code (Green Roof Code of Best Practice for the UK).*
- AmHydro. (2018). *AmHydro.com: The Leading Commercial Hydroponics Company For 30+ Years.* <https://amhydro.com/>

Bibliografia

- Angotti, T. (2015). Urban agriculture: long-term strategy or impossible dream?: Lessons from Prospect Farm in Brooklyn, New York. *Public Health*, 129(4), 336–341. <https://doi.org/10.1016/J.PUHE.2014.12.008>
- Aquilino, F., Paradiso, A., Trani, R., Longo, C., Pierri, C., Corriero, G., & de Pinto, M. C. (2020). *Chaetomorpha linum* in the bioremediation of aquaculture wastewater: Optimization of nutrient removal efficiency at the laboratory scale. *Aquaculture*, 523, 735133. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735133>
- Becerra-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., & Nunes, O. C. (2015). Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. In *Environment International* (Vol. 75, pp. 117–135). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.001>
- Beckers, S. (2018). *Abattoir BIGH farm - Construction21*. <https://www.construction21.org/infrastructure/be/abattoir-high-farm.html>
- Beckers, S. (2019). Aquaponics: A positive impact circular economy approach to feeding cities. *Field Actions Science Report*, 2019(Special Issue 20), 78–84.
- Bhatia, A., Mina, U., Kumar, V., Tomer, R., Kumar, A., Chakrabarti, B., Singh, R. N., & Singh, B. (2021). Effect of elevated ozone and carbon dioxide interaction on growth, yield, nutrient content and wilt disease severity in chickpea grown in Northern India. *Heliyon*, 7(1), e06049. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06049>
- BIGH. (2018). *Home - BIGH Farms - Ferme aquaponique sur les toits de Bruxelles*. <https://bigh.farm/>
- Bixio, D., Thoeve, C., de Koning, J., Joksimovic, D., Savic, D., Wintgens, T., & Melin, T. (2006). Wastewater reuse in Europe. *Desalination*, 187(1–3), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.070>
- Branco-Vieira, M., Mata, T. M., Martins, A. A., Freitas, M. A. V., & Caetano, N. S. (2020). Economic analysis of microalgae biodiesel production in a small-scale facility. *Energy Reports*, 6, 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.156>

Bibliografia

- Chanda, A., Das, S., Bhattacharyya, S., Das, I., Giri, S., Mukhopadhyay, A., Samanta, S., Dutta, D., Akhand, A., Choudhury, S. B., & Hazra, S. (2019). CO₂ fluxes from aquaculture ponds of a tropical wetland: Potential of multiple lime treatment in reduction of CO₂ emission. *Science of the Total Environment*, *655*, 1321–1333. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.332>
- Chen, Y., Dong, S., Wang, F., Gao, Q., & Tian, X. (2016). Carbon dioxide and methane fluxes from feeding and no-feeding mariculture ponds. *Environmental Pollution*, *212*, 489–497. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.039>
- Chiu, S. Y., Kao, C. Y., Chen, T. Y., Chang, Y. Bin, Kuo, C. M., & Lin, C. S. (2015). Cultivation of microalgal *Chlorella* for biomass and lipid production using wastewater as nutrient resource. In *Bioresource Technology* (Vol. 184, pp. 179–189). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.080>
- Choi, S., Sim, W., Jang, D., Yoon, Y., Ryu, J., Oh, J., Woo, J. S., Kim, Y. M., & Lee, Y. (2020). Antibiotics in coastal aquaculture waters: Occurrence and elimination efficiency in oxidative water treatment processes. *Journal of Hazardous Materials*, *396*, 122585. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122585>
- Das, P., Thaher, M. I., Hakim, M. A. Q. M. A., & Al-Jabri, H. M. S. J. (2015). Sustainable production of toxin free marine microalgae biomass as fish feed in large scale open system in the Qatari desert. *Bioresource Technology*, *192*, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.019>
- Derbigum. (2018). Una fattoria urbana sul tetto: primato mondiale per Derbigum nel settore dell'agricoltura urbana. *Edilportale*.
- Despommier, D. (2019). Vertical farms, building a viable indoor farming model for cities. *Field Actions Science Report*, 2019(Special Issue 20), 68–73.
- D'Este, M., Alvarado-Morales, M., & Angelidaki, I. (2017). *Laminaria digitata* as potential carbon source in heterotrophic microalgae cultivation for the production of fish feed supplement. *Algal Research*, *26*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.06.025>

Bibliografia

- ECF Farmsystems GmbH. (2020). *ECF Farmsystems GmbH | ECF Aquaponics Farm Systems | Producing cost-efficient and resource-friendly food of the highest quality*. <http://www.ecf-farmsystems.com/en/>
- Egloff, S., Tschudi, F., Schmutz, Z., & Refardt, D. (2018). High-density cultivation of microalgae continuously fed with unfiltered water from a recirculating aquaculture system. *Algal Research*, *34*, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.07.004>
- Elgallal, M., Fletcher, L., & Evans, B. (2016). Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. In *Agricultural Water Management* (Vol. 177, pp. 419–431). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.027>
- ENEA. (2020). *Ambiente: edifici abbandonati diventano serre verticali grazie a progetto con ENEA — it*. <https://www.enea.it/it/Stampa/comunicati/ambiente-edifici-abbandonati-diventano-serre-verticali-grazie-a-progetto-con-enea>
- European Commission. (2015). *Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities. Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on “Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities” (full version)*. <https://doi.org/10.2777/765301>
- European Commission. (2020). *Nature-Based Solutions | Environment - Research and Innovation - European Commission*. <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs>
- Fangmeier, A., De Temmerman, L., Black, C., Persson, K., & Vorne, V. (2002). Effects of elevated CO₂ and/or ozone on nutrient concentrations and nutrient uptake of potatoes. *European Journal of Agronomy*, *17*(4), 353–368. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00071-0)
- Fatta-Kassinos, D., Kalavrouziotis, I. K., Koukoulakis, P. H., & Vasquez, M. I. (2011). The risks associated with wastewater reuse and xenobiotics in the agroecological environment. *Science of The Total Environment*, *409*(19), 3555–3563. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2010.03.036>

Bibliografía

- Fernández, F. G. A., Reis, A., Wijffels, R. H., Barbosa, M., Verdelho, V., & Llamas, B. (2021). The role of microalgae in the bioeconomy. *New Biotechnology*, *61*, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.011>
- Galli, F., & Brunori, G. (2017). Sustainability Performance of Food Chains: Linking Biodiversity and Nutritional Value in Italian Wheat-to-Bread Chains. *Advances in Food Security and Sustainability*, *2*, 137–163. <https://doi.org/10.1016/BS.AF2S.2017.09.003>
- Gent, M. P. N. (2003). Solution electrical conductivity and ratio of nitrate to other nutrients affect accumulation of nitrate in hydroponic lettuce. *HortScience*, *38*(2), 222–227. <https://doi.org/10.21273/hortsci.38.2.222>
- Goli, A., Shamiri, A., Khosroyar, S., Talaiekhosani, A., Sanaye, R., & Azizi, K. (2019). A Review on Different Aerobic and Anaerobic Treatment Methods in Dairy Industry Wastewater. In *Journal of Environmental Treatment Techniques* (Vol. 7, Issue 1). <http://www.jett.dormaj.com>
- Gonçalves, A. A., & Gagnon, G. A. (2011). Ozone application in recirculating aquaculture system: An overview. *Ozone: Science and Engineering*, *33*(5), 345–367. <https://doi.org/10.1080/01919512.2011.604595>
- González-Camejo, J., Barat, R., Aguado, D., & Ferrer, J. (2020). Continuous 3-year outdoor operation of a flat-panel membrane photobioreactor to treat effluent from an anaerobic membrane bioreactor. *Water Research*, *169*, 115238. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115238>
- Goodman, W., & Minner, J. (2019). Will the urban agricultural revolution be vertical and soilless? A case study of controlled environment agriculture in New York City. *Land Use Policy*, *83*(February), 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.038>
- Gotham Greens. (2011). *Final Report for NYSERDA* (Issue Xxx).
- Gotham Greens. (2020). *Gotham Greens*. <https://www.gothamgreens.com/>
- Gould, D., & Caplow, T. (2012). Building-integrated agriculture: a new approach to food production. In *Metropolitan Sustainability* (pp. 147–170). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096463.2.147>

Bibliografia

- Greenpoint Manufacturing and Design Center. (2017). *810 Humboldt Street*.
https://gmdconline.org/gmdc_buildings/810-humboldt-street/
- Guo, Z., Liu, Y., Guo, H., Yan, S., & Mu, J. (2013). Microalgae cultivation using an aquaculture wastewater as growth medium for biomass and biofuel production. *Journal of Environmental Sciences (China)*, *25*(S1), S85–S88. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(14\)60632-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(14)60632-X)
- Harpo verdepensile. (2020). *Verdepensile | Harpo spa*.
<http://www.harpogroup.it/verdepensile/home>
- Harwood, E., & Hayashi, E. (2020). Selected PFALs in the United States, the Netherlands, and China. In *Plant Factory* (pp. 419–436). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00029-7>
- He, S., Fang, S., Xie, W., Zhang, P., Li, Z., Zhou, D., Zhang, Z., Guo, J., Du, C., Du, J., & Wang, D. (2018). Assessment of physiological responses and growth phases of different microalgae under environmental changes by Raman spectroscopy with chemometrics. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *204*, 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.06.060>
- Hinrichs, C. C. (2000). Embeddedness and local food systems: notes on two types of direct agricultural market. *Journal of Rural Studies*, *16*(3), 295–303. [https://doi.org/10.1016/S0743-0167\(99\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0743-0167(99)00063-7)
- Holan, A. B., Wold, P. A., & Leiknes, T. O. (2014a). Intensive rearing of cod larvae (*Gadus morhua*) in recirculating aquaculture systems (RAS) implementing a membrane bioreactor (MBR) for enhanced colloidal particle and fine suspended solids removal. *Aquacultural Engineering*, *58*, 52–58.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.10.001>
- Holan, A. B., Wold, P. A., & Leiknes, T. O. (2014b). Intensive rearing of cod larvae (*Gadus morhua*) in recirculating aquaculture systems (RAS) implementing a membrane bioreactor (MBR) for enhanced colloidal particle and fine suspended solids removal. *Aquacultural Engineering*, *58*, 52–58.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.10.001>
- Hopp, S. L., & Gussow, J. D. (2009). Comment on “Food-Miles and the Relative Climate Impacts of Food Choices in the United States.” In

Bibliografia

- Environmental Science and Technology* (Vol. 43, Issue 10, pp. 3982–3983).
<https://doi.org/10.1021/es900749q>
- Hou, F., Chen, X., Chen, X., Yang, F., Ma, Z., Zhang, S., Liu, C., Zhao, Y., & Guo, F. (2020). Comprehensive analysis method of determining global long-term GHG mitigation potential of passenger battery electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125137>
- Huang, J. Bin, Wang, S. W., Luo, Y., Zhao, Z. C., & Wen, X. Y. (2012). Debates on the causes of global warming. *Advances in Climate Change Research*, 3(1), 38–44. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1248.2012.00038>
- Huijbregts, M. A. J., Rombouts, L. J. A., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hendriks, A. J., van de Meent, D., Ragas, A. M. J., Reijnders, L., & Struijs, J. (2006). Is Cumulative Fossil Energy Demand a Useful Indicator for the Environmental Performance of Products? *Environmental Science & Technology*, 40(3), 641–648. <https://doi.org/10.1021/es051689g>
- Hussain, F., Shah, S. Z., Ahmad, H., Abubshait, S. A., Abubshait, H. A., Laref, A., Manikandan, A., Kusuma, H. S., & Iqbal, M. (2021). Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 137, p. 110603). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110603>
- Intizar Hussain, L. R. M. A. H. F. M. W. van der H. (2002). *Wastewater use in agriculture: Review of impacts and methodological issues ...* https://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=oJkkBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=GXcFgwVFL0&sig=w9ypZpVQhZ_JmCGyt7Wo-KtNd0w&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Jaramillo, M. F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability* 2017, Vol. 9, Page 1734, 9(10), 1734. <https://doi.org/10.3390/SU9101734>
- Jung, J. Y., Damusaru, J. H., Park, Y., Kim, K., Seong, M., Je, H. W., Kim, S., & Bai, S. C. (2017). Autotrophic biofloc technology system (ABFT) using *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* positively affects performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Algal Research*, 27, 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.09.021>

Bibliografia

- Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2018). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. *Journal of Landscape Ecology(Czech Republic)*, 11(1), 35–60. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0016>
- Kao, C. Y., Chen, T. Y., Chang, Y. Bin, Chiu, T. W., Lin, H. Y., Chen, C. Da, Chang, J. S., & Lin, C. S. (2014). Utilization of carbon dioxide in industrial flue gases for the cultivation of microalga *Chlorella* sp. *Bioresource Technology*, 166, 485–493. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.094>
- Kemper, N. (2008). Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment. In *Ecological Indicators* (Vol. 8, Issue 1, pp. 1–13). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.06.002>
- Khalid, S., Shahid, M., Natasha, Bibi, I., Sarwar, T., Shah, A. H., & Niazi, N. K. (2018). A Review of Environmental Contamination and Health Risk Assessment of Wastewater Use for Crop Irrigation with a Focus on Low and High-Income Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2018, Vol. 15, Page 895, 15(5), 895. <https://doi.org/10.3390/IJERPH15050895>
- Khan, M. M., Akram, M. T., Janke, R., Qadri, R. W. K., Al-Sadi, A. M., & Farooque, A. A. (2020). Urban horticulture for food secure cities through and beyond covid-19. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 22, pp. 1–21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su12229592>
- Kosten, S., Almeida, R. M., Barbosa, I., Mendonça, R., Santos Muzitano, I., Sobreira Oliveira-Junior, E., Vroom, R. J. E., Wang, H. J., & Barros, N. (2020). Better assessments of greenhouse gas emissions from global fish ponds needed to adequately evaluate aquaculture footprint. In *Science of the Total Environment* (Vol. 748, p. 141247). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141247>
- Kozai, T., Fang, W., Chun, C., Tong, Y., Yang, Q., Chintakovid, W., & Kubota, C. (2020). PFAL business and R&D in Asia and North America. In *Plant Factory* (pp. 35–76). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816691-8.00003-0>
- Kozai, T., & Niu, G. (2020). Introduction. In *Plant Factory* (pp. 3–6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816691-8.00001-7>

Bibliografia

- Kozlova, T. A., Hardy, B. P., & Levin, D. B. (2020). Effect of fish steroids 17 β -estradiol and 17,20 β -dihydroxy-4-pregnen-3-one on growth, accumulation of pigments, and fatty acid profiles in the microalgae *Scenedesmus quadricauda* (CPCC-158). *Renewable Energy*, 148, 798–806. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.165>
- Kundu, D., Dutta, D., Samanta, P., Dey, S., Sherpa, K. C., Kumar, S., & Dubey, B. K. (2022). Valorization of wastewater: A paradigm shift towards circular bioeconomy and sustainability. In *Science of the Total Environment* (Vol. 848). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157709>
- Kuo, C. M., Chen, T. Y., Lin, T. H., Kao, C. Y., Lai, J. T., Chang, J. S., & Lin, C. S. (2015). Cultivation of *Chlorella* sp. GD using piggy wastewater for biomass and lipid production. *Bioresource Technology*, 194, 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.026>
- Kuo, C. M., Jian, J. F., Lin, T. H., Chang, Y. B., Wan, X. H., Lai, J. T., Chang, J. S., & Lin, C. S. (2016). Simultaneous microalgal biomass production and CO₂ fixation by cultivating *Chlorella* sp. GD with aquaculture wastewater and boiler flue gas. *Bioresource Technology*, 221, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.014>
- Kusmayadi, A., Leong, Y. K., Yen, H.-W., Huang, C.-Y., & Chang, J.-S. (2021). Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans – Biotechnological and environmental aspects. *Chemosphere*, 271, 129800. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129800>
- Lafarga, T., Rodríguez-Bermúdez, R., Morillas-España, A., Villaró, S., García-Vaquero, M., Morán, L., Sánchez-Zurano, A., González-López, C. V., & Acién-Fernández, F. G. (2021). Consumer knowledge and attitudes towards microalgae as food: The case of Spain. *Algal Research*, 54, 102174. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102174>
- Lal, R. (n.d.). *Home gardening and urban agriculture for advancing food and nutritional security in response to the COVID-19 pandemic*. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01058-3/Published>
- Laura Ervoli, Enrico Bonari, Francesca Barresi. (n.d.).

Bibliografia

- Lei, Y. J., Tian, Y., Zhang, J., Sun, L., Kong, X. W., Zuo, W., & Kong, L. C. (2018). Microalgae cultivation and nutrients removal from sewage sludge after ozonizing in algal-bacteria system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *165*, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.096>
- Li, G., Tao, L., Li, X. li, Peng, L., Song, C. feng, Dai, L. li, Wu, Y. zi, & Xie, L. (2018). Design and performance of a novel rice hydroponic biofilter in a pond-scale aquaponic recirculating system. *Ecological Engineering*, *125*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.10.001>
- Li, X., Zhang, K., Gu, P., Feng, H., Yin, Y., Chen, W., & Cheng, B. (2021). Changes in precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960–2019 and the association with global warming, ENSO, and local effects. *Science of the Total Environment*, *760*, 144244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144244>
- Liu, C. C. K., Xia, W., & Park, J. W. (2007). A wind-driven reverse osmosis system for aquaculture wastewater reuse and nutrient recovery. *Desalination*, *202*(1–3), 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.034>
- Liu, D., Behrens, S., Pedersen, L. F., Straus, D. L., & Meinelt, T. (2016). Peracetic acid is a suitable disinfectant for recirculating fish-microalgae integrated multi-trophic aquaculture systems. *Aquaculture Reports*, *4*, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2016.09.002>
- Lopes, I. G., Braos, L. B., Cruz, M. C. P., & Vidotti, R. M. (2021). Valorization of animal waste from aquaculture through composting: Nutrient recovery and nitrogen mineralization. *Aquaculture*, *531*, 735859. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735859>
- Manan, H., Zhong, J. M. H., Kasan, N. A., Suratman, S., & Ikhwanuddin, M. (2019). Carbon dioxide flux from intensive aquaculture shrimp farming applying biofloc system of Setiu Terengganu, Malaysia. *Aquaculture*, *509*, 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.05.026>
- Masi, M., di Pasquale, J., Vecchio, Y., Pauselli, G., Tribilustova, E., & Adinolfi, F. (2022). A cross-sectional study in Mediterranean European countries to support stakeholders in addressing future market demands: Consumption of farmed fish products. *Aquaculture*

Bibliografia

- Reports*, 24, 101133.
<https://doi.org/10.1016/J.AQREP.2022.101133>
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 1, pp. 217–232). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Meesschaert, B., Ghyselbrecht, K., Monballiu, A., & Pinoy, L. (2021). Pilot scale anion selectrodialysis for water reclamation and nutrient recovery from UASB effluent after nitrification, ultrafiltration and UV C treatment. *Environmental Technology and Innovation*, 22, 101449. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101449>
- Michael, I., Rizzo, L., McArdell, C. S., Manaia, C. M., Merlin, C., Schwartz, T., Dagot, C., & Fatta-Kassinos, D. (2013). Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: A review. In *Water Research* (Vol. 47, Issue 3, pp. 957–995). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.027>
- Milhazes-Cunha, H., & Otero, A. (2017). Valorisation of aquaculture effluents with microalgae: The Integrated Multi-Trophic Aquaculture concept. *Algal Research*, 24, 416–424. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.12.011>
- Misila, P., Winyuchakrit, P., & Limmeechokchai, B. (2020). Thailand's long-term GHG emission reduction in 2050: the achievement of renewable energy and energy efficiency beyond the NDC. *Heliyon*, 6(12), e05720. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05720>
- Mohapatra, B. C., Chandan, N. K., Panda, S. K., Majhi, D., & Pillai, B. R. (2020). Design and development of a portable and streamlined nutrient film technique (NFT) aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 90, 102100. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102100>
- Munday, P. L., Jarrold, M. D., & Nagelkerken, I. (2019). Ecological effects of elevated CO₂ on marine and freshwater fishes: From individual to community effects. In *Fish Physiology* (Vol. 37, pp. 323–368). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.fp.2019.07.005>
- Nexus Corporation. (2020). *Nexus Greenhouse Systems :: Welcome to Nexus Corporation!* <http://www.nexuscorp.com/>

Bibliografia

- Nhan, H. T., Tai, N. T., Liem, P. T., Ut, V. N., & Ako, H. (2019). Effects of different stocking densities on growth performance of Asian swamp eel *Monopterus albus*, water quality and plant growth of watercress *Nasturtium officinale* in an aquaponic recirculating system. *Aquaculture*, 503, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.067>
- Nie, X., Mubashar, M., Zhang, S., Qin, Y., & Zhang, X. (2020). Current progress, challenges and perspectives in microalgae-based nutrient removal for aquaculture waste: A comprehensive review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 277, p. 124209). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124209>
- North-West Europe. (2020). GROOF | Interreg NWE. <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/groof/>
- NYSERDA. (2020). *Controlled Environment Agriculture - NYSERDA*. <https://www.nyserderda.ny.gov/Business-and-Industry/Agriculture/Controlled-Environmental-Agriculture>
- Ofori, S., Puškáčová, A., Růžičková, I., & Wanner, J. (2021a). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. In *Science of the Total Environment* (Vol. 760). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>
- Ofori, S., Puškáčová, A., Růžičková, I., & Wanner, J. (2021b). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. In *Science of the Total Environment* (Vol. 760). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>
- Ogner, G. (1993). No general effect of ozone on foliar nutrient concentrations in mature scions of grafted *Picea abies* trees. *Environmental Pollution*, 82(2), 197–200. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(93\)90117-7](https://doi.org/10.1016/0269-7491(93)90117-7)
- Oladoja, N. A., Adelagun, R. O. A., Ahmad, A. L., & Ololade, I. A. (2015). Phosphorus recovery from aquaculture wastewater using thermally treated gastropod shell. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.09.006>
- OrtiAlti. (2017). *Casa Ozanam Community Hub. Proposta di collaborazione CO-CITY*.

Bibliografia

- OrtiAlti. (2020a). *ORTI ALTI | FARM YOUR ROOFTOP*. <http://www.ortialti.com/>
- OrtiAlti. (2020b). *ORTI ALTI | Incentivi per gli orti sui tetti. La natura è all'ultimo piano*. <http://www.ortialti.com/2016/03/16/incentivi-per-gli-orti-sui-tetti-la-natura-e-allultimo-piano/>
- OrtoAlto Le Fonderie Ozanam. (2020). *Casa Ozanam* |. <http://www.ozanam.ortialti.com/>
- Pahija, E., & Hui, C. W. (2021). A practical approach for modelling the growth of microalgae with population balance equation. *New Biotechnology*, 62, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2021.01.001>
- Planet Farms. (2019). *Planet Farms*. <http://planetfarms.ag/>
- Proksch, G., Ianchenko, A., & Kotzen, B. (2019). Aquaponics in the Built Environment. In *Aquaponics Food Production Systems* (pp. 523–558). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Pulefou, T., Jegatheesan, V., Steicke, C., & Kim, S. H. (2008). Application of submerged membrane bioreactor for aquaculture effluent reuse. *Desalination*, 221(1–3), 534–542. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2007.01.114>
- Rabensteiner S.r.l. (2020a). *Progetti di riferimento » Rabensteiner: La serra*. <https://www.rabensteiner.eu/it/referenze/referenze-rabensteiner/pro/detail/abattoir-urban-farm.html>
- Rabensteiner S.r.l. (2020b). *Rabensteiner » Costruzione di garden center e serre | Bressanone, Alto Adige*. <https://www.rabensteiner.eu/it.html>
- Rana, S., Bag, S. K., Golder, D., Mukherjee Roy, S., Pradhan, C., & Jana, B. B. (2011). Reclamation of municipal domestic wastewater by aquaponics of tomato plants. *Ecological Engineering*, 37(6), 981–988. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.01.009>
- Ren, Q., Zhang, L., Wei, Y., Li, D., Wei, Y., & Li, D. (2018). A method for predicting dissolved oxygen in aquaculture water in an aquaponics system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 384–391. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.013>
- RIVM. (2011). *LCIA: the ReCiPe model* | RIVM. <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>

Bibliografia

RIVM. (2017). *ReCiPe 2016 v1.1*.

Saliu, T. D., & Oladoja, N. A. (2021a). Nutrient recovery from wastewater and reuse in agriculture: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 3, pp. 2299–2316). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01159-7>

Saliu, T. D., & Oladoja, N. A. (2021b). Nutrient recovery from wastewater and reuse in agriculture: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 3, pp. 2299–2316). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01159-7>

Samuelsen, T. A., Oterhals, & Kousoulaki, K. (2018). High lipid microalgae (*Schizochytrium* sp.) inclusion as a sustainable source of n-3 long-chain PUFA in fish feed—Effects on the extrusion process and physical pellet quality. *Animal Feed Science and Technology*, *236*, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.11.020>

Sanni, S., & Forsberg, O. I. (1996). Modelling pH and carbon dioxide in single-pass sea-water aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, *15*(2), 91–110. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(95\)00003-8](https://doi.org/10.1016/0144-8609(95)00003-8)

Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., & Rieradevall, J. (2015). An environmental and economic life cycle assessment of rooftop greenhouse (RTG) implementation in Barcelona, Spain. Assessing new forms of urban agriculture from the greenhouse structure to the final product level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *20*(3), 350–366. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0836-9>

Saranya, G., & Ramachandra, T. V. (2020). Life cycle assessment of biodiesel from estuarine microalgae. *Energy Conversion and Management: X*, *8*, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100065>

Sasaki Associates. (2020). *Sunqiao Urban Agricultural District – Sasaki*. <https://www.sasaki.com/projects/sunqiao-urban-agricultural-district/>

Schmautz, Z., Espinal, C. A., Smits, T. H. M., Frossard, E., & Junge, R. (2021). Nitrogen transformations across compartments of an aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, *92*, 102145. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102145>

Bibliografia

- Singh, P. K., Deshbhratar, P. B., & Ramteke, D. S. (2012). Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. *Agricultural Water Management*, *103*, 100–104. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.10.022>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. In *FAO Fisheries and Aquaculture*.
- Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, D., Walk, H., & Dierich, A. (2014). Urban agriculture of the future: An overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agriculture and Human Values*, *31*(1), 33–51. <https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4>
- Specht, K., Weith, T., Swoboda, K., & Siebert, R. (2016). Socially acceptable urban agriculture businesses. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0355-0>
- Su, H., Xu, W., Hu, X., Xu, Y., Wen, G., & Cao, Y. (2021). Spatiotemporal variations and source tracking of antibiotics in an ecological aquaculture farm in Southern China. *Science of the Total Environment*, *763*, 143022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143022>
- Tang, Y. H., Luan, X. B., Sun, J. X., Zhao, J. F., Yin, Y. L., Wang, Y. B., & Sun, S. K. (2021a). Impact assessment of climate change and human activities on GHG emissions and agricultural water use. *Agricultural and Forest Meteorology*, *296*, 108218. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108218>
- Tang, Y. H., Luan, X. B., Sun, J. X., Zhao, J. F., Yin, Y. L., Wang, Y. B., & Sun, S. K. (2021b). Impact assessment of climate change and human activities on GHG emissions and agricultural water use. *Agricultural and Forest Meteorology*, *296*, 108218. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108218>
- Tarre, S., & Green, M. (2004). High-rate nitrification at low pH in suspended- and attached-biomass reactors. *Applied and Environmental Microbiology*, *70*(11), 6481–6487. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.11.6481-6487.2004>

Bibliografía

- Tejada Carbajal, E. M., Martínez Hernández, E., Fernández Linares, L., Novelo Maldonado, E., & Limas Ballesteros, R. (2020). Techno-economic analysis of *Scenedesmus dimorphus* microalgae biorefinery scenarios for biodiesel production and glycerol valorization. *Bioresource Technology Reports*, *12*, 100605. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100605>
- Tejido-Nuñez, Y., Aymerich, E., Sancho, L., & Refardt, D. (2019). Treatment of aquaculture effluent with *Chlorella vulgaris* and *Tetradesmus obliquus*: The effect of pretreatment on microalgae growth and nutrient removal efficiency. *Ecological Engineering*, *136*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.05.021>
- Tejido-Nuñez, Y., Aymerich, E., Sancho, L., & Refardt, D. (2020). Co-cultivation of microalgae in aquaculture water: Interactions, growth and nutrient removal efficiency at laboratory- and pilot-scale. *Algal Research*, *49*, 101940. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101940>
- Thomaier, S., Specht, K., Henckel, D., Dierich, A., Siebert, R., Freisinger, U. B., & Sawicka, M. (2015). Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of zero-acreage farming (ZFarming). *Renewable Agriculture and Food Systems*, *30*(1), 43–54. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000143>
- Tran, N. H., Reinhard, M., & Gin, K. Y. H. (2018). Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions—a review. In *Water Research* (Vol. 133, pp. 182–207). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.029>
- Valente, L. M. P., Cabrita, A. R. J., Maia, M. R. G., Valente, I. M., Engrola, S., Fonseca, A. J. M., Ribeiro, D. M., Lordelo, M., Martins, C. F., Falcão e Cunha, L., de Almeida, A. M., & Freire, J. P. B. (2021). Microalgae as feed ingredients for livestock production and aquaculture. In *Microalgae* (pp. 239–312). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821218-9.00009-8>
- van Os, E. A., Gieling, Th. H., & Lieth, J. H. (2019). Technical Equipment in Soilless Production Systems. In *Soilless Culture* (pp. 587–635). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00013-X>
- Ventura, D., Consoli, S., Barbagallo, S., Marzo, A., Vanella, D., Licciardello, F., & Cirelli, G. L. (2019). How to overcome barriers for

Bibliografia

- wastewater agricultural reuse in Sicily (Italy)? *Water (Switzerland)*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/w11020335>
- Vertical Harvest. (2020). *VERTICAL HARVEST | United States | Vertical Harvest of Jackson Hole*. <https://www.verticalharvestjackson.com/>
- Villar-Navarro, E., Garrido-Pérez, C., & Perales, J. A. (2021). Recycling “waste” nutrients back into RAS and FTS marine aquaculture facilities from the perspective of the circular economy. *Science of the Total Environment*, 762, 143057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143057>
- Wang, C. Y., Chang, C. Y., Chien, Y. H., & Lai, H. T. (2016a). The performance of coupling membrane filtration in recirculating aquaponic system for tilapia culture. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 107, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.016>
- Wang, C. Y., Chang, C. Y., Chien, Y. H., & Lai, H. T. (2016b). The performance of coupling membrane filtration in recirculating aquaponic system for tilapia culture. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 107, 21–30. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2015.10.016>
- Wang, K., Li, K., Liu, L., Tanase, C., Mols, R., & van der Meer, M. (2020). Effects of light intensity and photoperiod on the growth and stress response of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture and Fisheries*. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.03.001>
- Wängberg, S. Å., Selmer, J. S., & Gustavson, K. (1998). Effects of UV-B radiation on carbon and nutrient dynamics in marine plankton communities. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 45(1), 19–24. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(98\)00154-7](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(98)00154-7)
- Wongkiew, S., Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Nhan, H. T., Marcelino, K. R., & Khanal, S. K. (2021). Nitrogen Recovery via Aquaponics–Bioponics: Engineering Considerations and Perspectives. *ACS ES&T Engineering*, 1(3), 326–339. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.0c00196>

Bibliografia

- Xin, C., Addy, M. M., Zhao, J., Cheng, Y., Cheng, S., Mu, D., Liu, Y., Ding, R., Chen, P., & Ruan, R. (2016). Comprehensive techno-economic analysis of wastewater-based algal biofuel production: A case study. *Bioresource Technology*, 211, 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.102>
- Yadav, G., Meena, D. K., Sahoo, A. K., Das, B. K., & Sen, R. (2020). Effective valorization of microalgal biomass for the production of nutritional fish-feed supplements. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118697>
- Yang, L., Wang, R., Lu, Q., & Liu, H. (2020). “Algaquaculture” integrating algae-culture with aquaculture for sustainable development. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 244, p. 118765). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118765>
- Yang, Z., Huang, X., Wang, H., Pan, H., Wang, X., Teng, M., Ren, Q., & Bao, Z. (2021). Effects of microalgae diets and stocking density on larval growth, survival and metamorphosis of dwarf surfclam, *Mulinia lateralis*. *Aquaculture*, 536, 736440. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736440>
- Yarnold, J., Karan, H., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Microalgal Aquafeeds As Part of a Circular Bioeconomy. In *Trends in Plant Science* (Vol. 24, Issue 10, pp. 959–970). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.06.005>
- Yi, L., Jiao, W., Chen, X., & Chen, W. (2011). An overview of reclaimed water reuse in China. *Journal of Environmental Sciences*, 23(10), 1585–1593. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60627-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60627-4)
- Yogev, U., Vogler, M., Nir, O., Londong, J., & Gross, A. (2020). Phosphorous recovery from a novel recirculating aquaculture system followed by its sustainable reuse as a fertilizer. *Science of the Total Environment*, 722, 137949. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137949>
- Zaibel, I., Dagan, G., Arnon, S., Schwartsburd, F., Britzi, M., Snyder, S. A., & Zilberg, D. (2020). Tertiary-treated wastewater as a potential water source for sustainable aquaculture: A laboratory-scale experiment with *Cyprinus carpio*. *Aquaculture*, 522. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735161>

Bibliografia

- Zhang, H., Gao, Y., Shi, H., Lee, C. T., Hashim, H., Zhang, Z., Wu, W. M., & Li, C. (2020). Recovery of nutrients from fish sludge in an aquaponic system using biological aerated filters with ceramsite plus lignocellulosic material media. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120886. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120886>
- Zhou, M., Yu, S., Hong, B., Li, J., Han, H., & Qie, G. (2021). Antibiotics control in aquaculture requires more than antibiotic-free feeds: A tilapia farming case. *Environmental Pollution*, 268, 115854. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115854>

Sitografia

- <https://growrillahydroponics.com/category/deep-water-culture/#gref>
- https://www.idroponica.it/vantaggi-della-coltivazione-idroponica_28-162.html
- <https://akuadulza.it/manuali/progettazione-impianti-acquaponici>
- <https://miglioracquario.com/ciclo-dellazoto/>
- <https://it.wikipedia.org/wiki/Fotobioreattore>
- <https://webthesis.biblio.polito.it/6915/1/tesi.pdf>
- <https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/byname?name=fotobioreattori-microalghe.pdf>
- <https://core.ac.uk/download/pdf/11670101.pdf>
- <https://www.focus.it/ambiente/natura/anidride-carbonica-la-co2-e-le-alghe>
- <https://webthesis.biblio.polito.it/14798/1/tesi.pdf>
- <https://www.microbiologiaitalia.it/didattica/fotosintesi-clorofilliana/>
- <https://www.green.it/trasformare-co2-mangime-pesci-vero-secondo-startup-californiana/>
- https://acquacoltura.progettoager.it/images/articoli/UNIUD/AQUAF_ARM_Tibaldi.pdf
- <https://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/pdf-eai/marzo-aprile->

Bibliografia

[2012/14-s-r-microalghe.pdf](#)

[http://www.iat.unina.it/pdf/tesi/abstract_Carmen D'Orsi e Clelia Lo_Sapio.pdf](http://www.iat.unina.it/pdf/tesi/abstract_Carmen_D'Orsi_e_Clelia_Lo_Sapio.pdf)

<https://www.natural1.it/risorse-marine/item/download/1919>

<https://www.pesceinrete.com/tilapia-la-nuova-frontiera-dell-acquacoltura/>

<https://www.idroponica.it/blog/10-18/come-coltivare-lattuga-idroponica.html>

https://www.isprambiente.gov.it/files2020/pubblicazioni/stato-ambiente/annuario-2020/2_Pesca_Finale_2019.pdf

http://www.smart-plant.eu/images/publications/resource-recovery-products/65_BioMAC2019.pdf

<https://www.cooperazione.net/>

<http://www.associazioneleaf.it/>