



# RAPPORTI ISTISAN 16|12

ISSN: 1123-3117 (cartaceo) • 2384-8936 (online)

## **Elementi di analisi del rischio correlati all'utilizzo e riutilizzo di acque in produzione primaria e alimentare**

L. Lucentini, L. Achene, L. La Sala, P. Stacchini,  
L. Bonadonna, G. La Rosa, E. Veschetti, M. Gianfranceschi,  
M. Cerroni, E. Beccaloni, M. Carere, M. Fiori



AMBIENTE  
E SALUTE



# ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ

## **Elementi di analisi del rischio correlati all'utilizzo e riutilizzo di acque in produzione primaria e alimentare**

Luca Lucentini (a), Laura Achene (a), Liliana La Sala (b),  
Paolo Stacchini (c), Lucia Bonadonna (a), Giuseppina La Rosa (a),  
Enrico Veschetti (a), Monica Gianfranceschi (c), Mario Cerroni (a),  
Eleonora Beccaloni (a), Mario Carere (a), Maurizio Fiori (c)

*(a) Dipartimento di Ambiente e Connessa Prevenzione Primaria,  
Istituto Superiore di Sanità, Roma*

*(b) Direzione Generale Prevenzione Sanitaria,  
Sicurezza ambientale e prevenzione primaria, Ministero della Salute, Roma*

*(c) Dipartimento di Sanità Pubblica Veterinaria e Sicurezza Alimentare,  
Istituto Superiore di Sanità, Roma*

ISSN: 1123-3117 (cartaceo) • 2384-8936 (online)

**Rapporti ISTISAN  
16/12**

Istituto Superiore di Sanità

**Elementi di analisi del rischio correlati all'utilizzo e riutilizzo di acque in produzione primaria e alimentare.**

Luca Lucentini, Laura Achene, Liliana La Sala, Paolo Stacchini, Lucia Bonadonna, Giuseppina La Rosa, Enrico Veschetti, Monica Gianfranceschi, Mario Cerroni, Eleonora Beccaloni, Mario Carere, Maurizio Fiori  
2016, v, 75 p. Rapporti ISTISAN 16/12

La produzione primaria e alimentare si connotano da sempre come maggiormente gravose in termini quantitativi e qualitativi di fabbisogno idrico. Lo sviluppo sostenibile di tali settori è legato a un utilizzo consapevole da parte degli operatori delle risorse idriche prelevate dall'ambiente e al riuso sicuro di acque reflue depurate. La gestione delle acque dovrà, in ogni caso, essere correlata a un'analisi di rischio basata sulla *facies* chimica e microbiologica delle risorse di origine, pericoli di contaminazione, eventuali trattamenti e modalità d'uso delle acque, specifiche delle produzioni alimentari e loro trasformazione e utilizzo, in contesti sito-specifici. In questo rapporto sono forniti alcuni elementi di analisi di rischio igienico-sanitario che presidono all'impiego delle acque in produzione primaria, sulla base della letteratura tecnico-scientifica di settore, del *corpus* delle linee guida internazionali e dell'esperienza del gruppo multidisciplinare "Acque irrigue", costituito presso l'Istituto Superiore di Sanità, e di altri esperti della materia.

*Parole chiave:* Riuso; Acque Irrigue; Piani di sicurezza igienico-sanitaria

Istituto Superiore di Sanità

**Elements of risk analysis associated by primary and food production water use and reuse.**

Luca Lucentini, Laura Achene, Liliana La Sala, Paolo Stacchini, Lucia Bonadonna, Giuseppina La Rosa, Enrico Veschetti, Monica Gianfranceschi, Mario Cerroni, Eleonora Beccaloni, Mario Carere, Maurizio Fiori  
2016, v, 75 p. Rapporti ISTISAN 16/12 (in Italian)

Primary and food production have the most water requirement in qualitative and quantitative terms. Related-areas sustainable development is strictly connected with an aware use of environmental water sources and safe reclaimed water reuse by field workers. However, water management will have to be related by a risk analysis based on chemical and microbiological composition of the upstream water sources, contamination hazards, potential water treatment and operational procedures, food-processing and their specifications and use, in site-specific contexts. This report provides some elements of risk analysis and sanitation security procedures in order to accomplish safe reuse of reclaimed water for irrigation practices, based on scientific field-based literature, international guidelines, experience of multidisciplinary workgroup "Irrigation waters" of the Istituto Superiore di Sanità (the national Institute of Health in Italy) and by collaboration of several experts on field.

*Key words:* Reclaimed waters; Irrigation waters; Sanitation safety plans

Si ringraziano per l'accurata revisione del documento: Rossella Colagrossi e Aldo Di Benedetto della Direzione Generale Prevenzione Sanitaria, Sicurezza ambientale e prevenzione primaria, Ministero della Salute; Stefano Polesello e Sara Valsecchi del CNR-IRSA; Giuseppe Di Vittorio della Regione Puglia; Matteo Cannarozzi De Grazia, Bernardino Frascolla e Raffaele Prencipe dell'ASL Foggia.

Per informazioni su questo documento scrivere a: [luca.lucentini@iss.it](mailto:luca.lucentini@iss.it).

Il rapporto è accessibile online dal sito di questo Istituto: [www.iss.it](http://www.iss.it).

Citare questo documento come segue:

Lucentini L, Achene L, La Sala L, Stacchini P, Bonadonna L, La Rosa G, Veschetti E, Gianfranceschi M, Cerroni M, Beccaloni E, Carere M, Fiori M. *Elementi di analisi del rischio correlati all'utilizzo e riutilizzo di acque in produzione primaria e alimentare*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2016. (Rapporti ISTISAN 16/12).

Legale rappresentante dell'Istituto Superiore di Sanità: *Gualtiero Ricciardi*  
Registro della Stampa - Tribunale di Roma n. 114 (cartaceo) e n. 115 (online) del 16 maggio 2014

Direttore responsabile della serie: *Paola De Castro*

Redazione: *Paola De Castro e Sandra Salinetti*

La responsabilità dei dati scientifici e tecnici è dei singoli autori, che dichiarano di non avere conflitti di interesse.



# INDICE

<b>Acronimi</b> .....	iii
<b>Premessa</b> .....	v
<b>1. Produttività e consumo idrico dell'attività agricola e zootecnica in Italia</b> .....	1
1.1. Consumo idrico a livello nazionale e regionale per tipologia di prelievo.....	1
1.2. Consumo idrico a livello nazionale e regionale per sistema d'irrigazione.....	3
1.3. Produttività e consumo idrico a livello nazionale e regionale .....	3
<b>2. Acque di riuso</b> .....	7
2.1. Introduzione.....	7
2.2. Sistemi di depurazione e caratterizzazione delle acque reflue depurate .....	8
2.2.1. Requisiti consigliati .....	8
2.2.2. Armonizzazione dei requisiti di qualità delle acque con i processi di depurazione.....	8
2.2.3. Requisiti di qualità microbiologica delle acque .....	8
2.2.4. Indicatori di disinfezione .....	10
2.2.5. Requisiti di qualità delle acque relativamente al particolato disperso nel mezzo acquoso .....	10
2.2.6. Requisiti di qualità delle acque in termini di materiale organica .....	10
2.2.7. Sostanze chimiche nelle acque reflue .....	12
2.2.8. Sostanze organiche .....	13
2.2.9. Costituenti in tracce .....	14
2.2.10. Rimozione di costituenti in tracce.....	14
2.2.11. Trattamento delle acque reflue destinate al riuso.....	15
2.2.12. Sistemi di depurazione naturali.....	24
2.3. Impiego irriguo e zootecnico .....	28
2.3.1. Elementi in traccia e nutrienti .....	28
2.3.2. Considerazioni operative .....	29
2.3.3. Irrigazione delle coltivazioni destinate alla produzione alimentare.....	30
2.3.4. Irrigazione di coltivazioni di alimenti destinati alla trasformazione e di coltivazioni non alimentari.....	30
2.3.5. Qualità dell'acqua destinata all'attività zootecnica.....	32
2.3.6. Qualità delle acque destinate all'impiego in acquacoltura.....	34
2.3.7. Esperienza mondiale nel riuso delle acque reflue depurate .....	36
<b>3. Quadro normativo</b> .....	37
3.1. Legislazione di riferimento per risorse idriche impiegate in produzione primaria .....	37
3.2. Norme e linee guida applicabili a risorse idriche impiegate in produzione primaria.....	39
3.2.1. Commissione Europea e indicazioni sul riuso delle acque .....	41
3.3. Legislazione di riferimento per i prodotti alimentari .....	42

<b>4. Effetti avversi associati all'impiego di acque non adeguate alla destinazione d'uso</b> .....	45
4.1. Rischi correlati all'impiego delle acque reflue depurate in produzione primaria .....	45
4.1.1. Effetti riconducibili alla presenza di sodio e cloro.....	51
4.1.2. Elementi in traccia e nutrienti .....	51
4.1.3. Potenziali impatti dei residui dei costituenti chimici in traccia.....	55
4.1.4. Potenziale contaminazione chimica degli alimenti .....	56
<b>5. Misure di mitigazione del rischio e analisi di rischio mediante approcci olistici</b> .....	58
5.1. Piani di sicurezza igienico-sanitaria della WHO .....	58
5.1.1. Piani di sicurezza igienico-sanitaria, punti critici di controllo e piani di sicurezza dell'acqua .....	58
5.1.2. Applicazioni dei piani di sicurezza igienico-sanitaria al riuso agricolo.....	59
5.2. Osservazioni di carattere generale .....	59
5.2.1. Elementi di gestione del rischio microbiologico.....	59
5.2.2. Elementi di gestione del rischio dei costituenti chimici in traccia .....	60
5.3. Distanze di <i>setback</i> .....	60
5.4. Controllo delle sorgenti .....	61
5.5. Monitoraggio delle performance dei trattamenti .....	61
5.5.1. Misura degli organismi indicatori .....	61
5.5.2. Considerazioni specifiche rispetto al rischio chimico.....	62
<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b> .....	63
<b>Bibliografia</b> .....	66

## ACRONIMI

<b>ADI</b>	<i>Admittable Daily Intake</i>
<b>AOP</b>	<i>Advanced Oxydation Processes</i>
<b>ASR</b>	<i>Acquifer Storage Recovery</i>
<b>BOD<sub>5</sub></b>	<i>Biological Oxygen Demand</i>
<b>CAS</b>	<i>Conventional Activated Sludge</i>
<b>CE</b>	<i>Comunità europea</i>
<b>CEC</b>	<i>Contaminants of Emergent Concern</i>
<b>DALY</b>	<i>Disable-Adjusted Life Years</i>
<b>DBP</b>	<i>Disinfection By-Products</i>
<b>DG-ENV</b>	<i>Directorate General for Environment</i>
<b>DO</b>	<i>Dissolved Oxygen</i>
<b>DOC</b>	<i>Dissolved Organic Carbon</i>
<b>EDC</b>	<i>Endocrinal Disruptor Contaminant</i>
<b>EFSA</b>	<i>European Food Safety Agency</i>
<b>EPA</b>	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i>
<b>FAO</b>	<i>Food and Agriculture Organization</i>
<b>GAC</b>	<i>Granulated Active Carbon</i>
<b>HAA</b>	<i>HaloAcetic Acids</i>
<b>IFAS</b>	<i>Integrates film activated sludge</i>
<b>DG-JRC</b>	<i>Directorate General for Joint Research Centre</i>
<b>MBR</b>	<i>Membrane BioReactor</i>
<b>MF</b>	<i>Microfiltrazione</i>
<b>MPN</b>	<i>Most Probable Number</i>
<b>NDMA</b>	<i>N-Nitrosodimetilammina</i>
<b>NF</b>	<i>Nanofiltrazione</i>
<b>NOM</b>	<i>Natural Organic Matter</i>
<b>NTU</b>	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
<b>OSA</b>	<i>Operatore del Settore Alimentare</i>
<b>PAA</b>	<i>Peracetic acid</i>
<b>PAC</b>	<i>Powdered Activated Carbon</i>
<b>PCB</b>	<i>Policlorobifenili</i>
<b>PPCP</b>	<i>Pharmaceuticals and Personal-Care Products</i>
<b>RO</b>	<i>Reverse Osmosis</i>
<b>SAR</b>	<i>Sodium Absorption Ratio</i>
<b>SAT</b>	<i>Soil-to-Acquifer Treatment</i>
<b>SMP</b>	<i>Soluble Microbial Products</i>
<b>SSP</b>	<i>Sanitation Safety Plan</i>
<b>TDS</b>	<i>Total Dissolved Solid</i>
<b>THM</b>	<i>TriHaloMethane</i>
<b>TOC</b>	<i>Total Organic Carbon</i>
<b>TSS</b>	<i>Total Suspended Solid</i>
<b>UE</b>	<i>Unione Europea</i>
<b>UF</b>	<i>Ultrafiltrazione</i>
<b>UFC</b>	<i>Unità Formanti Colonia</i>
<b>UNEP</b>	<i>United Nations Environment Programme</i>
<b>WHO</b>	<i>World Health Organization (Organizzazione Mondiale della Sanità)</i>



## PREMESSA

La produzione primaria – e in particolare le attività agricole e zootecniche – è da sempre il settore a maggiore consumo di risorse idriche; stime recenti indicano, infatti, che complessivamente circa il 55% delle acque impiegate in Europa sono destinate ad uso irriguo.

La necessità di ridurre l’approvvigionamento idrico da corpi idrici sotterranei, unita agli stress idrici accentuati dai cambiamenti climatici, ha indotto la Commissione Europea a considerare l’emanazione di norme volte al risparmio delle risorse idriche, mediante il riuso delle acque reflue, con particolare attenzione alle attività legate agli usi irrigui.

Il controllo dei pericoli sanitari e ambientali correlati all’utilizzo delle acque in produzione primaria deve essere presieduto da un quadro complessivo di misure di valutazione e gestione dei rischi, che includa criteri di trattamento e controlli dei processi, criteri di riferimento e monitoraggio per la qualità dei suoli e dell’acqua, al fine di aumentare il livello di sicurezza alimentare e nel contempo salvaguardare bacini idrografici eccessivamente sfruttati.

Il settore agro-alimentare ravvisa alcune carenze sull’adeguatezza e armonizzazione delle informazioni tecniche di utilizzo in sicurezza delle acque irrigue e delle “acque pulite” da utilizzare in produzione alimentare e questo ostacola lo sviluppo di adeguati strumenti di prevenzione e analisi del rischio associato all’impiego e al reimpiego delle acque a supporto di molte produzioni locali o industriali, anche di pregio.

In tale contesto, con l’elaborazione di questo rapporto, si intende fornire elementi di analisi di rischio e norme di sicurezza igienico-sanitaria che presiedano all’impiego delle acque in produzione primaria, sulla base dell’esperienza del gruppo multidisciplinare “Acque irrigue” dell’Istituto Superiore di Sanità (Doc. ISS/prot. PRE 254/14) Le indicazioni contenute nel rapporto trovano il loro fondamento nell’esperienza internazionale in questo settore, unitamente alla normativa nazionale e al *corpus* delle linee guida ad oggi emesse da organismi di riferimento europei e mondiali.



# 1. PRODUTTIVITÀ E CONSUMO IDRICO DELL'ATTIVITÀ AGRICOLA E ZOOTECNICA IN ITALIA

## 1.1. Consumo idrico a livello nazionale e regionale per tipologia di prelievo

Da informazioni aggregate sulla base di dati dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) (vedi *Siti di Approfondimento*) (Tabella 1) l'approvvigionamento idrico per le produzioni agricole in Italia è principalmente operato, per più del 60%, attraverso enti di servizi, acquedotti e consorzi di bonifica: d'altra parte il prelievo di acque destinate all'agricoltura da fonti interne o vicinali alle aziende interessa acque sotterranee o superficiali, in proporzione non molto differente, rispettivamente del 18% e 16% circa.

**Tabella 1. Cubatura e percentuali di ripartizione della tipologia di prelievo delle acque sul totale delle acque irrigue (dati relativi all'intera nazione)**

Fonte di approvvigionamento	m <sup>3</sup>	% ripartizione*
Acquedotto, consorzio di irrigazione e bonifica o altro ente irriguo con consegna a turno	3.795.872.904	34,2
Acquedotto, consorzio di irrigazione e bonifica o altro ente irriguo con consegna a domanda	3.194.877.657	28,8
Acque sotterranee all'interno o nelle vicinanze dell'azienda	1.991.078.953	17,9
Acque superficiali al di fuori dell'azienda (laghi, fiumi o corsi d'acqua)	1.217.909.407	11,0
Acque superficiali all'interno dell'azienda (bacini naturali e artificiali)	519.067.341	4,7
Altra fonte	379.949.644	3,4

\* m<sup>3</sup> totali pari a 11.098.755.906

I dati nazionali non sono tuttavia particolarmente indicativi nella descrizione del territorio, in quanto mediano una situazione regionale particolarmente disomogenea: si osserva, infatti una netta differenza tra le aree peninsulari e insulari, per le quali il prelievo di acque sotterranee è la prima risorsa irrigua (32-48% del totale), e l'area continentale per la quale il prelievo di acque sotterranee rappresenta una fonte d'approvvigionamento piuttosto modesta (7-18% del totale), risultando il prelievo da acquedotti e consorzi d'irrigazione la prima fonte d'approvvigionamento (30-44% del totale) (Figura 1). Ai fini della caratterizzazione del territorio, è da considerare che in talune aree, dove è consistente il prelievo di acque sotterranee a fini agricoli, sono presenti elementi chimici di natura geogenica – quali arsenico, boro, fluoro, vanadio – o sostanze di origine antropica, in particolare solventi organo-clorurati, soprattutto tetracloroetilene e tricloroetilene, derivanti da inquinamenti ambientali più o meno estesi e remoti nel tempo, e, ove si siano verificati smaltimenti illeciti di rifiuti industriali, fenomeni di cessione di metalli e/o composti chimici tossici nel terreno e in falda. Inoltre, l'utilizzo irriguo di acque di origine superficiale, soprattutto nelle circostanze in cui sussista contaminazione da acque reflue inadeguatamente trattate – fenomeno diffuso in Italia che lamenta carenze nei trattamenti per ca. il 36% delle acque reflue – può pregiudicare la sicurezza microbiologica della produzione agricola in misura diversa a seconda della natura delle risorse di origine, modalità di irrigazione, destino dei prodotti primari con un maggior rischio per i prodotti freschi consumati crudi.

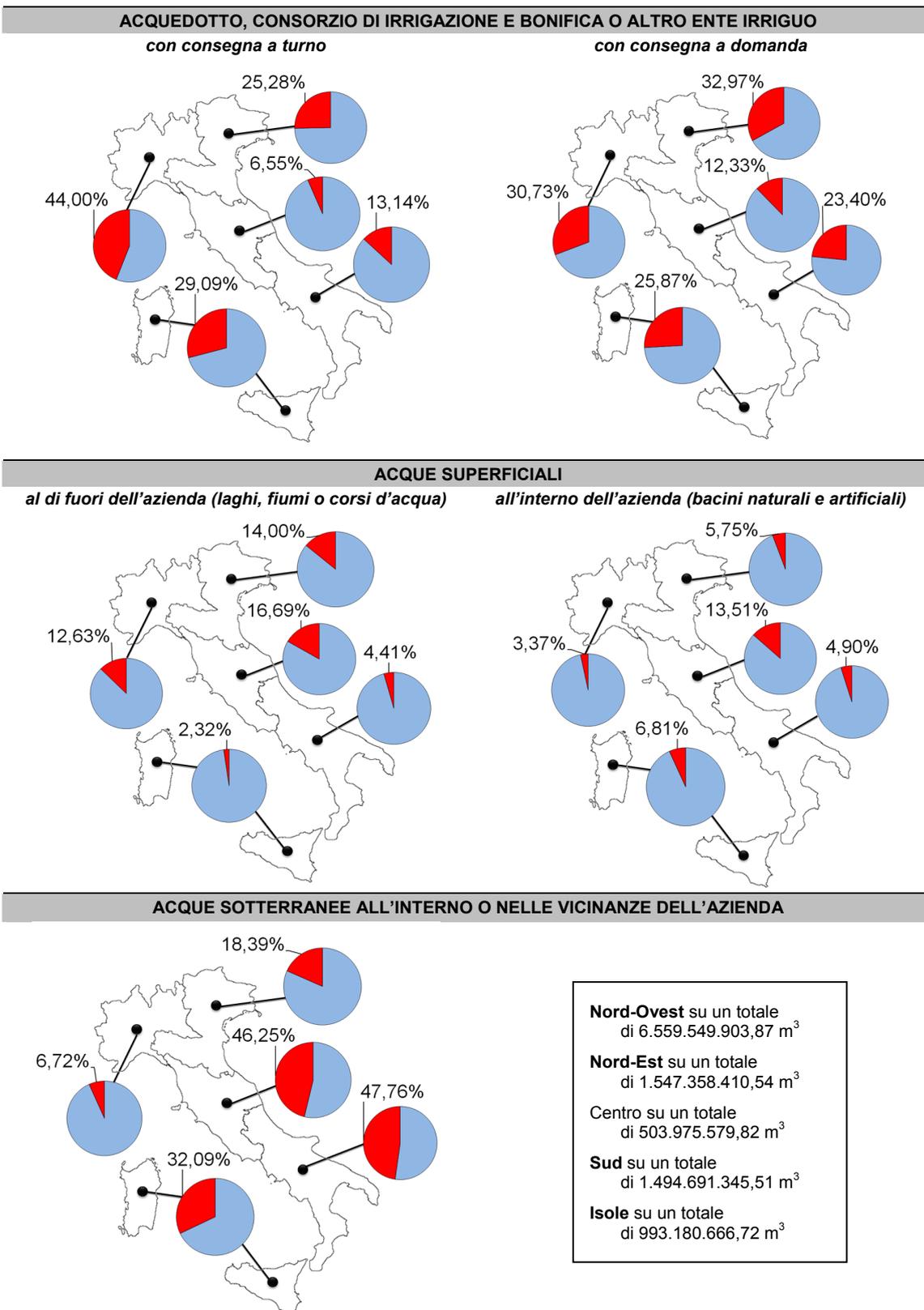


Figura 1. Ripartizione territoriale delle tipologie di prelievo delle acque sul totale nazionale

## 1.2. Consumo idrico a livello nazionale e regionale per sistema d'irrigazione

Oltre a fornire informazioni specifiche sulla tipologia di captazione delle acque ad uso irriguo, i dati ISTAT forniscono informazioni dettagliate in riferimento al sistema d'irrigazione impiegato per l'immissione di tali acque nell'ambiente agricolo. A livello nazionale il sistema di irrigazione per sommersione risulta essere il più utilizzato (34,83%) insieme ai sistemi a scorrimento superficiale e ad aspersione (27,20-26,82%). I dati elaborati in base alla percentuale di ripartizione di questi sistemi a livello nazionale presenti in Tabella 2 non forniscono un quadro omogeneo delle situazioni regionali, in quanto mediano situazioni piuttosto differenti tra loro.

**Tabella 2. Cubatura e percentuali di ripartizione della tipologia di sistema d'irrigazione sul totale delle acque irrigue (dati relativi all'intera nazione)**

Sistema d'irrigazione	m <sup>3</sup>	% ripartizione*
Scorrimento superficiale e infiltrazione laterale	3.019.270.680,30	27,20
Sommersione	3.866.199.703,89	34,83
Aspersione (a pioggia)	2.976.916.869,39	26,82
Microirrigazione	1.068.369.332,15	9,63
Altro sistema	167.999.320,73	1,51

\* m<sup>3</sup> totali pari a 11.098.755.906

In Figura 2 si osserva come il dato dell'irrigazione per sommersione e per scorrimento superficiale sia prevalente nelle regioni del nord-ovest, mentre risulta più diffuso nelle altre zone il sistema d'irrigazione a pioggia. Sistemi irrigui basati sullo scorrimento superficiale e infiltrazione laterale sono presenti maggiormente nelle aree settentrionali e relativamente meno diffuse nella zona centrale e meridionale del Paese. Piuttosto interessanti sono i dati relativi alla microirrigazione che, con percentuali del 18-34%, si configura come la seconda tipologia di sistema irriguo per le zone in cui viene attivato.

## 1.3. Produttività e consumo idrico a livello nazionale e regionale

La rilevanza dell'utilizzo delle acque irrigue sulla produttività alimentare nazionale può essere evidenziata esaminando 9 categorie di prodotti agricoli destinati al consumo umano, come rappresentative della produzione nazionale, e i volumi di acque irrigue utilizzate in produzione. In Tabella 3 e Figura 3 sono riportati i metri cubi di acque irrigue per quintale di genere alimentare prodotto in relazione alle macroaree già descritte in precedenza.

Si può osservare come il dato medio nazionale non sia un indice particolarmente adeguato per descrivere la situazione territoriale, in quanto la richiesta di acqua irrigua per quintale di genere alimentare prodotto varia notevolmente in base soprattutto alla macroarea considerata. La domanda varia dagli 0,08 m<sup>3</sup>/q impiegati per la coltivazione della vite nel nord-ovest ai circa 77 m<sup>3</sup>/q impiegati per la coltivazione del mais nelle isole. Al calcolo di questi valori concorrono una serie di variabili relative soprattutto alle diverse condizioni climatiche (e quindi ai diversi tassi di precipitazioni e di evaporazione), alla diversa quantità di superficie impiegata per le colture e alla diversa tipologia di pianta coltivata.

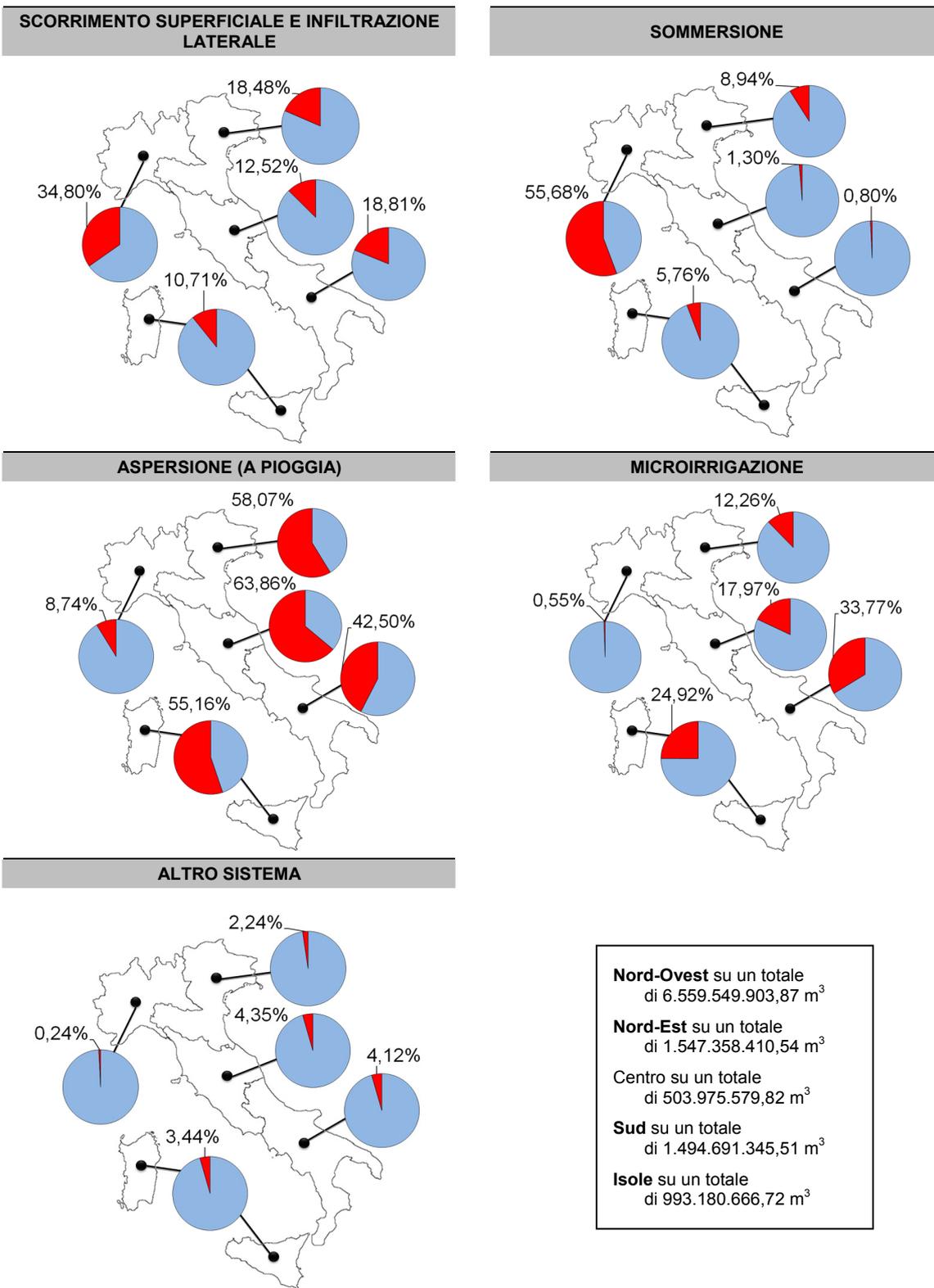
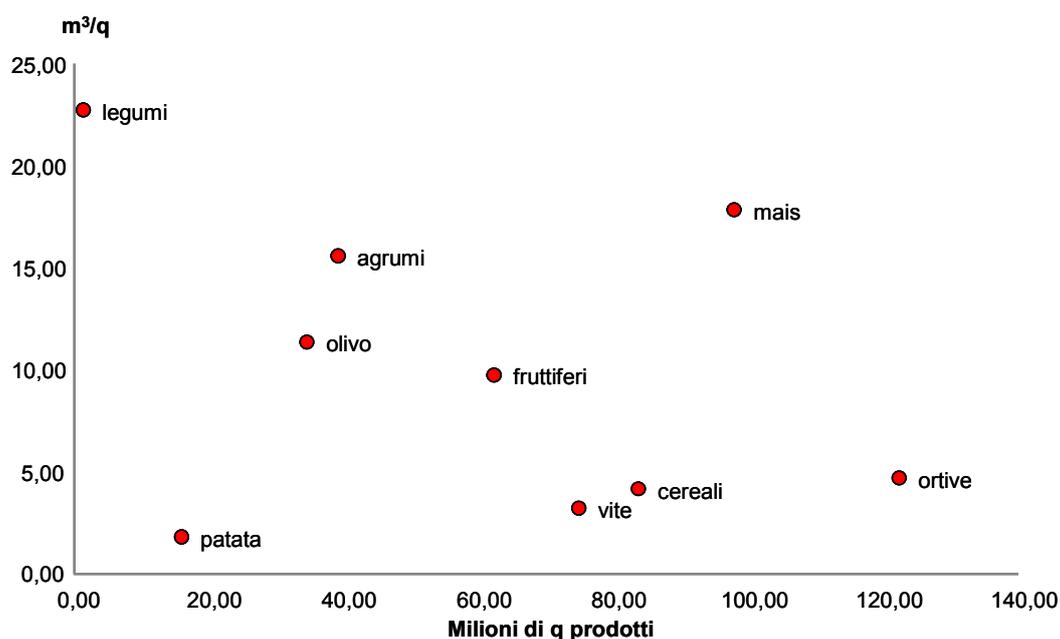


Figura 2. Ripartizione territoriale delle tipologie di prelievo delle acque sul totale nazionale

**Tabella 3. Ripartizione territoriale della domanda idrica per quintale ( $m^3/q$ ) di genere alimentare prodotto (dati nazionali, ISTAT)**

Fonte di approvvigionamento	Nord-Ovest	Nord-Est	Centro	Sud	Isole	Italia
Mais	26,05	10,00	15,04	25,32	76,95	17,86
Cereali per granella (tranne mais e riso)	2,59	3,07	1,74	4,44	3,23	4,17
Legumi secchi	0,26	46,41	10,66	15,38	9,60	22,74
Patata	0,10	4,24	0,62	0,69	0,84	1,80
Ortive in piena aria	1,10	3,91	5,07	4,65	5,91	4,69
Vite	0,08	2,38	1,12	4,17	5,45	3,21
Olivo per olio e per olive da tavola	0,09	10,06	3,42	11,04	20,65	11,37
Agrumi	-	-	22,55	9,41	21,86	15,59
Fruttiferi	1,12	6,30	19,49	14,57	15,23	9,75



**Figura 3. Domanda idrica nazionale ( $m^3/q$ ) e dati di produzione di genere alimentare (dati nazionali, ISTAT)**

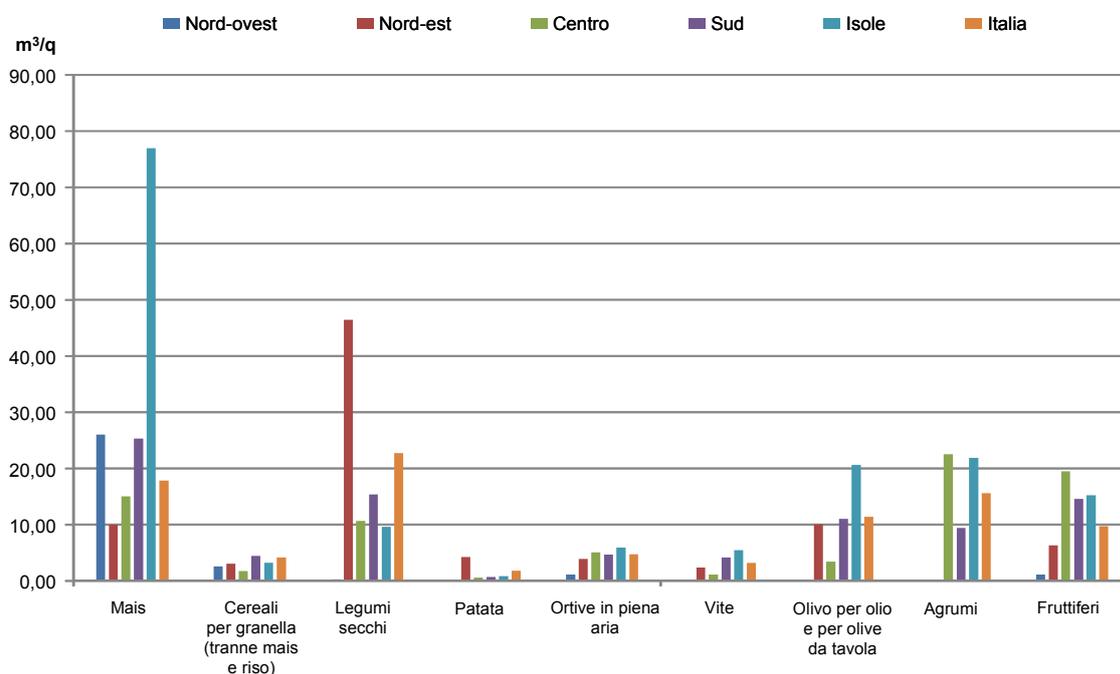
In Figura 4 (dati nazionali) si evidenzia come il valore della domanda di acqua irrigua non sia discriminante per colture aventi valori di produttività assai diversi. È necessario dunque introdurre un altro parametro in grado di definire in prima approssimazione l'effettivo assorbimento idrico del prodotto agricolo, e quindi ottenere un dato indicativo dei possibili impatti sanitari dell'impiego delle acque in agricoltura per il consumatore.

I valori di tale parametro (dati ISTAT e CREA<sup>1</sup>) sono riportati in Figura 5 e variano tra lo 0,01 e il 13% del totale delle acque impiegate nella coltivazione della specie.

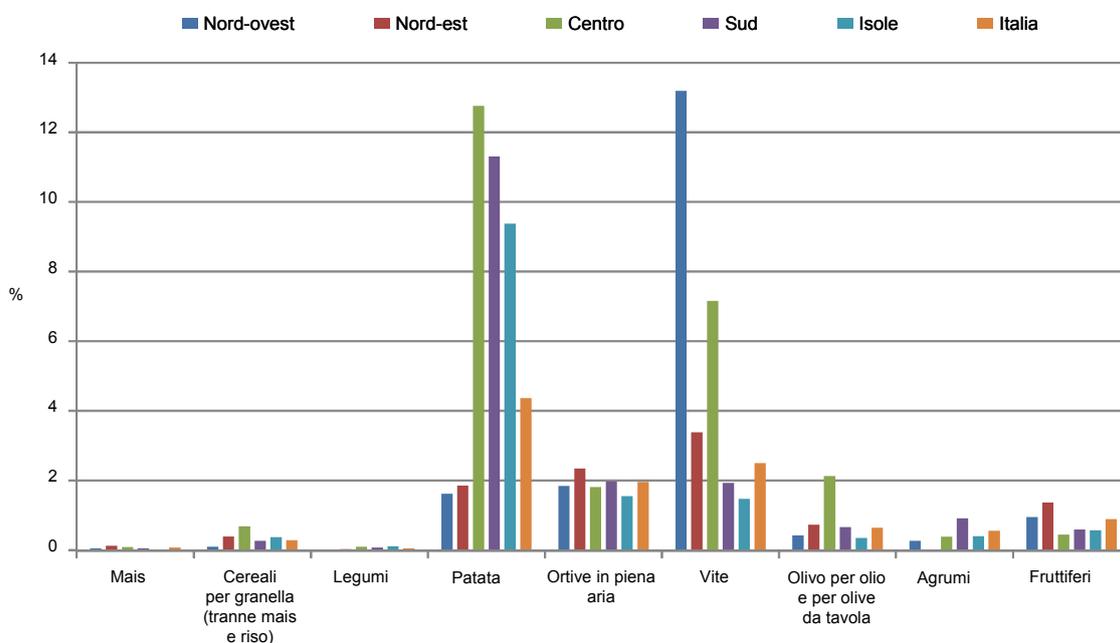
Si può osservare sia l'ampia variabilità – sia tra le diverse colture che tra le macroaree – che la notevole difformità di tali valori con quelli precedentemente esposti circa la domanda di acqua irrigua per quintale di genere alimentare prodotto.

<sup>1</sup> *Consiglio per la Ricerca in agricoltura e l'analisi dell'Economia Agraria*, istituito il 25 giugno 2015, ingloba le competenze, le attività di ricerca e il personale dell'ex-INRAN dalla cui banda dati sono desunti i dati relativi all'umidità relativa delle categorie di alimenti considerati (2009, vedere *siti d'interesse*)

Tutto ciò sottolinea la necessità di un'adeguata descrizione del problema connesso all'impiego di acque irrigue nella produzione alimentare anche attraverso lo sviluppo della rappresentatività offerta dai parametri indicatori.



**Figura 4. Ripartizione territoriale della domanda idrica per quintale (m³/q) di genere alimentare prodotto (dati nazionali, ISTAT)**



**Figura 5. Percentuale di assorbimento idrico in relazione alla cubatura di acqua irrigua (dati ISTAT e CREA)**

## 2. ACQUE DI RIUSO

### 2.1. Introduzione

Il continuo incremento della domanda di acqua da destinare all'agricoltura insieme alla necessità di diminuire lo sfruttamento degli acquiferi, in linea con i programmi di risparmio idrico adottati in vari Paesi, sottolinea l'importanza del riuso delle acque in vari ambiti, tra cui, in via prioritaria, quello della produzione agricola e zootecnica. La gamma di tecnologie utilizzabili in depurazione, la flessibilità dei processi di trattamento delle acque reflue e il diverso livello di qualità necessario alle molteplici destinazioni d'uso dell'acqua trattata permette in linea di principio un maggiore controllo per tutti gli aspetti concernenti la sostenibilità ambientale ed economica del riuso di acque depurate.

In Tabella 4 è presente un riepilogo dei processi di trattamento in funzione delle destinazioni d'uso finali e dei trend di qualità e di sostenibilità.

**Tabella 4. Sinossi dei processi di trattamento delle acque reflue e loro destinazione d'uso**

Trattamento	Processi	Impiego finale	
Primario	Sedimentazione	Nessun impiego raccomandato	
Secondario	Ossidazione biologica e disinfezione	Irrigazione superficiale di colture arboree e vigne	
		Irrigazione di colture non destinate alla produzione alimentare	
		Corpi idrici Paesaggistici (con restrizioni)	
		Ricarica di acquiferi non destinati alla potabilizzazione	
		Zone umide artificiali, oasi naturalistiche, aumento della portata fluviale	
Filtrazione e disinfezione	Coagulazione chimica, rimozione chimica o biologica dei nutrienti, filtrazione e disinfezione	Processi di raffreddamento industriali	
		Irrigazione di Paesaggi e campi da golf	
		Scarico del WC	
		Lavaggio degli autoveicoli	
		Irrigazione di colture destinate alla produzione alimentare	
Avanzato	Carboni attivi, osmosi inversa, processi avanzati di ossidazione, ecc.	Corpi idrici artificiali a scopi ricreazionali (senza restrizioni)	
		Sistemi industriali	
		Impiego potabile indiretto attraverso la ricarica di acquiferi sotterranei e delle riserve superficiali di acquiferi destinati alla potabilizzazione	

La buona conduzione di tali tecniche di trattamento può permettere la definizione di parametri indicatori di processo, con evidenti progressi nell'ambito della semplificazione delle operazioni di monitoraggio, e positivi risvolti economici nel campo della applicabilità della futura normativa.

## 2.2. Sistemi di depurazione e caratterizzazione delle acque reflue depurate

### 2.2.1. Requisiti consigliati

In Tabella 5 sono illustrati alcuni processi di depurazione, la qualità dell'acqua depurata, la frequenza di monitoraggio e le distanze di *setback* in substrati porosi<sup>2</sup> (EPA, 2012). Le matrici considerate sono acque reflue urbane o acque reflue non eccessivamente contaminate da scarichi industriali. I valori corrispondenti alle voci mostrate in tabella trovano il loro fondamento scientifico nello studio dei dati prodotti dall'attività di impianti-pilota, nell'esperienza maturata in diverse nazioni nel campo del riuso di acque reflue depurate e nella letteratura scientifica dedicata. I processi di depurazione rivestono particolare importanza per l'abbattimento e il controllo dei microrganismi patogeni e dei contaminanti chimici; sono, infatti, noti, e piuttosto diffusi, casi di contaminazione riconducibili all'impiego di acque reflue grezze o non adeguatamente depurate.

### 2.2.2. Armonizzazione dei requisiti di qualità delle acque con i processi di depurazione

La valutazione dell'efficienza di un processo di trattamento può essere definita attraverso valutazione di parametri "indicatori" dello stesso processo, anche detti parametri di processo, cioè parametri per lo più di semplice misura cui siano associabili, con più o meno elevata approssimazione, altri parametri ambientali, sanitari o di livello di prestazione del trattamento, o altre particolari condizioni legate al processo di trattamento e alla sua efficienza. In linea generale è opportuno valutare in maniera combinata i parametri di processo relativi al trattamento delle acque reflue con i parametri di qualità delle acque reflue a valle dei processi di depurazione per i seguenti motivi:

- i parametri di processo singolarmente potrebbero non essere indicativi per la caratterizzazione della qualità delle acque reflue depurate (molti sono *aspecifici*, ovvero sono associati ad una serie di caratteristiche osservabili ma non del tutto *rappresentative* della composizione delle acque);
- di contro, è noto che la combinazione dei parametri di processo con i parametri di qualità delle acque reflue depurate garantisce un'acqua di qualità adeguata agli scopi indicati, vicariando in molti casi la necessità di monitoraggi di routine su specifici costituenti;
- la semplicità, la rapidità e l'economicità del controllo dei parametri di processo ne permette il monitoraggio in tempo reale, assicurando un controllo della qualità dell'acqua prodotta attraverso valutazioni di affidabilità dei trattamenti di depurazione.

### 2.2.3. Requisiti di qualità microbiologica delle acque

Per quanto riguarda le destinazioni d'uso per le quali è possibile il contatto con acque reflue depurate, e per linee specializzate di distribuzione per le quali si potrebbe configurare il rischio di contaminazione crociata con le linee dell'acqua potabile, è raccomandabile un livello minimo di disinfezione delle acque reflue depurate tale da non permettere il rilevamento di coliformi fecali in 100 mL; generalmente ottenibile attraverso processi di filtrazione. Per ulteriori approfondimenti di tali processi e delle loro peculiarità si rimanda al paragrafo 2.2.11.

<sup>2</sup> Per *setback* si intende la distanza della fonte di acqua reflua depurata da zone sensibili.

Tabella 5. Requisiti di qualità per le acque reflue avviate al riuso agricolo

Coltivazioni	Trattamento	Qualità dell'acqua reflua depurata <sup>1</sup>		Distanza di setback	Commenti
		parametro (valore)	monitoraggio		
Alimenti destinati al consumo crudo (irrigazione per scorrimento o a pioggia)	Secondario <sup>2</sup> Filtrazione Disinfezione	pH (6-9)	settimanale	15 m	Potrebbe rendersi necessaria l'aggiunta di coagulanti chimici a monte della filtrazione. Le acque reflue depurate non devono contenere livelli misurabili di agenti patogeni. <sup>7</sup> Possono risultare necessari livelli più alti di residui di Cl <sub>2</sub> e/o tempi di contatto maggiori al fine di assicurare l'effettiva disinfezione da virus e parassiti. Un alto livello di nutrienti può avere un effetto negativo per certe coltivazioni durante specifiche fasi di crescita.
		BOD <sub>5</sub> (≤ 10 mg/L)	settimanale	da riserve di acqua potabile; 30 m	
		Torbidità <sup>3</sup> (≤ 2 NTU)	in continuo	se presenti in terreni porosi	
		CF (non rilevabili/100 mL) <sup>4</sup>	giornaliero		
		Cl <sub>2</sub> residuo (min 1 mg/L) <sup>5</sup>	in continuo		
Alimenti destinati alla trasformazione <sup>8</sup> prima del consumo <sup>8</sup> (irrigazione in superficie)	Secondario <sup>2</sup> Filtrazione	pH (6-9)	settimanale	90 m	Se l'irrigazione avviene a pioggia, il TSS deve essere < 30 mg/L per evitare l'intasamento degli spruzzatori. Un alto livello di nutrienti può avere un effetto negativo per certe coltivazioni durante specifiche fasi di crescita. Agli animali da mungitura deve essere proibito il pascolo nelle aree irrigate fino a 15 giorni dopo il termine delle operazioni. Se si vuole evitare tale periodo di latenza è necessario procedere ad un livello di disinfezione delle acque più alto (es. < 14 CF/100 mL).
		BOD <sub>5</sub> (≤ 30 mg/L)	settimanale	da riserve di acqua potabile 30 m	
		TSS (≤ 30 mg/L)	giornaliero	da aree accessibili al pubblico (se l'irrigazione è condotta a pioggia)	
		CF (≤ 200/100 mL) <sup>6,7</sup>	giornaliero		
		Cl <sub>2</sub> residuo (min 1 mg/L) <sup>5</sup>	in continuo		

**BOD<sub>5</sub>**: Biochemical Oxygen Demand testato in 5 giorni; **NTU**: Nephelometric Turbidity Unit; **CF**: Coliformi Fecali; **TSS**: Total Suspended Solids

- 1 In assenza di definizioni proprie, i limiti di qualità raccomandati per le acque reflue depurate devono intendersi soddisfatti al punto di scarico dall'impianto di trattamento.
- 2 Prevede il processo ai fanghi attivi, ai letti percolatori, ai contattori biologici rotativi e anche, preferibilmente, sistemi di stabilizzazione in laguna o stagno. Il trattamento dovrebbe produrre effluenti i cui valori di BOD e TSS non superino i 30 mg/L.
- 3 Il valore raccomandato dovrebbe essere raggiunto prima della disinfezione. Il valore medio è ponderato sulle 24 h, e non dovrebbe mai superare i 5 NTU. Se in alternativa viene valutato il TSS, il suo valore medio non dovrebbe eccedere i 5 mg/L.
- 4 In mancanza di requisiti specifici, i limiti raccomandati sono valori mediani determinati dai risultati della conta batteriologica degli ultimi 7 giorni. Le tecniche di rilevamento dovrebbe eccedere il valore di 14/100 mL per ogni campione.
- 5 Solo quando il cloro viene impiegato come disinfettante primario. Il Cl<sub>2</sub> residuo dovrebbe essere soddisfatto per un tempo di contatto di 90 min, a meno di una comprovata efficacia anche per tempi minori. In nessun caso il tempo di contatto dovrebbe essere inferiore ai 30 min.
- 6 Tale conta non dovrebbe eccedere gli 800/100 mL in ogni campione.
- 7 Alcuni sistemi di stabilizzazione in laguna possono essere efficaci nel soddisfare i limiti previsti per i coliformi fecali senza dover ricorrere alla disinfezione.
- 8 Alimenti che sono stati sottoposti a una serie di trattamenti chimico-fisici sufficienti alla distruzione degli agenti patogeni prima della loro vendita.

#### **2.2.4. Indicatori di disinfezione**

L'impossibilità di monitorare ogni specie patogena potenzialmente presente nelle acque reflue depurate ha indotto la comunità scientifica ad adottare una serie di indicatori biologici destinati a definire con la maggiore rappresentatività possibile la contaminazione microbiologica delle acque reflue depurate. Sono stati quindi selezionati gruppi di batteri in grado di "predire" la presenza di patogeni, primi tra tutti i batteri *coliformi* in grado di segnalare la presenza potenziale di patogeni batterici ma poco rappresentativi della presenza di virus e parassiti. L'altro gruppo di batteri indicatori è quello rappresentato dai *coliformi fecali*, più specifici rispetto ai coliformi totali di contaminazione fecale. In aggiunta al controllo dei *coliformi totali e fecali*, vengono impiegati come organismi indicatori anche l'*Escherichia coli* (*E.coli*), gli *enterococchi* e i *colifagi*. I limiti derivanti dall'uso di organismi indicatori sono principalmente dovuti alla rappresentatività offerta e ai metodi di determinazione attraverso metodi di coltura causa di ritardo nell'ottenimento di dati utili di almeno 24 ore. Inoltre, i batteri *coliformi* sono molto più suscettibili di altri microorganismi alla disinfezione, risultando impossibile correlare la loro presenza con quella dei protozoi come *Cryptosporidium* e con gli *enterovirus* (Bonadonna, *et al.*, 2002; Havelaar *et al.*, 1993). Sono stati suggeriti indicatori microbiologici alternativi tra cui le specie *Enterococcus*, *Clostridium* e *colifagi* per l'analisi di acque reflue, ambientali e destinate al consumo umano; pur risultando limitati gli studi dedicati (Harwood *et al.*, 2005). Per ciò che concerne la contaminazione virale, è largamente documentato come un'appropriata disinfezione delle acque reflue riduca o inattivi gli Enterovirus a livelli inferiori ai limiti di rivelazione delle tecniche analitiche disponibili; mentre per il contenimento/abbattimento della contaminazione da Adenovirus occorrono ulteriori misure in grado di ovviare al problema della resistenza alla disinfezione per irraggiamento UV propria di questa specie. Altre criticità legate all'attività di monitoraggio degli agenti patogeni di natura virale sono rappresentate dalla difficoltà di identificazione e di enumerazione dei virus a causa del limitato numero di laboratori adeguatamente equipaggiati a tal fine.

#### **2.2.5. Requisiti di qualità delle acque relativamente al particolato disperso nel mezzo acquoso**

La massiccia presenza di microrganismi potenzialmente patogeni sulla superficie del particolato disperso – unitamente alla capacità propria di quest'ultimo di diffondere la radiazione UV diminuendone l'efficacia biocida – sottolinea la necessità di un'adeguata rimozione di tale substrato quale vincolo propedeutico ad una corretta ed efficace disinfezione. Inoltre, il particolato sospeso di natura organica interferisce con la disinfezione operata per clorazione (o attraverso l'impiego di altri ossidanti chimici) reagendo con il disinfettante sinergicamente alla carica microbica e quindi riducendone la disponibilità a completare la disinfezione. Il monitoraggio è in genere condotto attraverso la misura giornaliera del totale dei solidi sospesi (*Total Suspended Solid*, TSS) oppure la misura in continuo della torbidità. Quest'ultima, tuttavia, oltre a fornire misure maggiormente affidabili rispetto alla misura del TSS, provvede alla possibilità di ottenere risultati immediati da subito disponibili per attivare eventuali manovre correttive.

#### **2.2.6. Requisiti di qualità delle acque in termini di materiale organica**

Il grado di rimozione della sostanza organica dispersa è legato alla destinazione finale del riuso. La sostanza organica in acqua concorre attivamente alla proliferazione microbica

fornendo *nutrimento* necessario alla riproduzione, e indirettamente interferendo con la disinfezione; comporta inoltre il peggioramento delle qualità organolettiche conferendo alle acque un pessimo odore e una pessima colorazione. Il monitoraggio si basa principalmente sulla misura del parametro richiesta biologica di ossigeno (*Biological Oxygen Demand*, BOD), che consiste nella determinazione della quantità di ossigeno disciolto consumato dalla carica microbica per l'abbattimento della sostanza organica presente, generalmente dopo 5 giorni di incubazione (BOD<sub>5</sub>). Il valore limite di BOD raccomandato è da intendersi come il valore per il quale la materia organica risulti *stabilizzata*, ovvero non possa più dare luogo a processi putrefattivi, e la sua presenza ridotta al livello richiesto dalla tipologia di riuso prevista.

### 2.2.6.1. Protozoi ed elminti

I parassiti (generalmente *protozoi* ed *elminti*) sono in genere veicolati nelle acque reflue per via fecale. La loro presenza nel corpo idrico è riconducibile a forme vegetative quali individui adulti e larve, e a forme quiescenti quali cisti, oocisti e uova. Le forme quiescenti sono particolarmente resistenti agli stress ambientali come l'esposizione a forti variazioni di temperatura, di umidità e all'irraggiamento solare. La rimozione di tali agenti patogeni durante i processi di depurazione è generalmente condotta attraverso la separazione fisica per *sedimentazione e filtrazione*, in quanto si tratta di specie microbiologiche di dimensioni relativamente elevate (1-60 µm per le spore, le cisti, le oocisti e le uova; 10-100 µm per le larve e gli organismi adulti). Per la disinfezione delle acque contaminate è inoltre consigliato l'irraggiamento UV, in quanto in grado di indurre mutazioni genetiche fatali per la riproduzione e per l'attività vegetativa, a differenza del trattamento *per clorazione* o con altri disinfettanti chimici che può risultare non del tutto efficace (WRRF, 2012a).

### 2.2.6.2. Batteri

I batteri sono organismi visibili al microscopio di dimensioni variabili approssimativamente da 0,2 a 10 µm di lunghezza. Alcuni tipi di batteri fanno parte della flora autoctona del microbioma intestinale degli individui sani e vengono escreti routinariamente con le feci, che tuttavia possono anche contenere specie batteriche patogene, in individui infetti. I batteri possono essere presenti in acqua come singola cellula (*free living*), ma è attraverso l'adesione su particelle di particolato in sospensione che è favorita la loro proliferazione. È stato quindi osservato come processi di sedimentazione, filtrazione e coagulazione possano ridurre significativamente i livelli microbici nelle acque reflue, permettendo a valle di tale processi un'efficace processo di disinfezione.

### 2.2.6.3. Virus

I virus sono agenti infettivi di piccole dimensioni (20-400 nm) e di struttura relativamente semplice. Sono responsabili di un'ampia gamma di patologie nell'uomo, che includono gastroenteriti, sindromi delle alte e basse vie respiratorie, congiuntiviti, epatiti, infezioni del sistema nervoso centrale, infezioni del sistema cardio-circolatorio, e malattie croniche. I virus enterici infettano il tratto gastrointestinale e sono trasmessi per via fecale-orale. Eliminati con le feci a concentrazioni elevate, sono presenti in grande quantità nei reflui urbani dai quali possono raggiungere corpi idrici recettori e giungere nuovamente all'uomo utilizzando come veicoli l'acqua e gli alimenti. I virus enterici rappresentano un gruppo eterogeneo di virus, appartenenti a diverse famiglie e generi. Importanti agenti virali di infezioni a trasmissione idrica includono: enterovirus e virus dell'epatite A (Picornaviridae), norovirus (Caliciviridae), adenovirus (Adenoviridae) e virus dell'epatite E (Hepeviridae) (La Rosa *et al.*, 2012). Il virus sono parassiti endocellulari obbligati e pertanto incapaci di moltiplicarsi al di fuori dell'ospite; pur non

potendosi replicare sono, tuttavia, in grado di sopravvivere nell'ambiente per lunghi tempi. In genere i virus presentano maggiore resistenza agli stress ambientali e ai normali trattamenti chimici e fisici delle acque rispetto ai batteri.

## **2.2.7. Sostanze chimiche nelle acque reflue**

### **2.2.7.1. Sostanze inorganiche**

La composizione della frazione inorganica delle acque reflue dipende dalla loro origine, mentre i valori di concentrazione dei vari costituenti dal livello di trattamento applicato. Nel novero dei contaminanti ascrivibili a questa categoria appartengono i *metalli pesanti*, le sostanze *nutrienti*, gli *ossialogenuri*, e i *nanomateriali ingegnerizzati*. Alla loro presenza nelle acque sono associati molti rischi per la salute, la cui valutazione si traduce in un diverso grado di accettabilità dell'acqua trattata per le diverse destinazioni d'uso. I processi di trattamento ad oggi normalmente applicati sono in grado di ridurre molti componenti di questo gruppo di contaminanti al di sotto dei livelli massimi consigliati per l'impiego irriguo e il consumo umano. Il monitoraggio della maggior parte di tali costituenti in acqua concerne misure di TDS (*Total Dissolved Solids*, solidi totali disciolti) e di conducibilità, tecniche tuttavia affette dall'interferenza di alcune sostanze organiche.

### **2.2.7.2. Metalli e sali**

La presenza nelle acque reflue di *metalli pesanti* è una problematica piuttosto comune, in quanto direttamente imputabile all'inquinamento causato dall'attività antropica. I loro livelli di concentrazione sono in genere contenuti, e i processi di trattamento adeguati alla loro rimozione. I sali (misurati come TDS) presenti nelle acque reflue depurate in genere non superano le concentrazioni considerate sicure per la salute umana, pur potendo tuttavia influenzare le colture in termini di sviluppo e maturazione della pianta. La salinità, ad esempio, può causare ustioni chimiche alle foglie, o ridurre la permeabilità di alcuni tipi di suoli, influenzandone così la *tessitura*. La salinità può essere ridotta durante le operazioni di trattamento, ma le tecniche tendono ad essere costose, e lo smaltimento dei rifiuti liquidi derivati (le *salamoie*) pone una serie di criticità di carattere logistico, ambientale ed economico.

### **2.2.7.3. Ossialogenuri**

Con il termine di *ossialogenuri* si fa riferimento a composti chimici derivati dalla dissociazione in acqua di *ossiacidi* e loro sali, come ad esempio le specie *bromato*, *clorato* e *perclorato*. La loro presenza nelle acque può essere ricondotta alla contaminazione industriale o può derivare da specifici processi di trattamento delle acque (il *bromato*, ad esempio, si può formare a seguito del trattamento a ozono di acque reflue ricche in *bromuro*). Gli impianti di trattamento per il riutilizzo delle acque devono essere progettati e controllati al fine di ridurre al minimo la formazione di tali composti dannosi durante tutte le fasi del trattamento. L'impiego casalingo della candeggina (*ipoclorito di sodio*) può provocare la formazione di bromato, clorato e perclorato; quest'ultimo, per le acque destinate all'impiego agricolo, si configura come un composto di particolare interesse in quanto subisce bioaccumulo nelle piante.

### **2.2.7.4. Nutrienti**

La presenza di azoto e fosforo nei reflui è imputabile sia alla normale attività metabolica umana sia, in particolar modo per quanto riguarda il fosforo, all'utilizzo di detersivi sintetici, e possono porre problemi ambientali e sanitari pur risultando utili in alcune pratiche irrigue, in

quanto *nutrienti* delle piante. Pertanto, la necessità di rimuovere le sostanze nutrienti durante il trattamento per il riutilizzo dipende dalla destinazione d'uso delle acque prodotte.

#### 2.2.7.5. Nanomateriali ingegnerizzati

Per *nanomateriali* si fa riferimento a materiali su scala nanometrica ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), dalle cui dimensioni derivano morfologia e proprietà peculiari. I nanomateriali presentano una o più dimensioni che spaziano nell'intervallo compreso tra 1 e 100 nm: *nanofilm* (una dimensione), *nanotubi* (due dimensioni), e *nanoparticelle* (tre dimensioni). Entità più grandi, come ad esempio le *zeoliti* (da 1.000 a 10.000 nm, o da 1 a 10 micron), possono essere considerate *nanomateriali* in quanto caratterizzate da porosità nanometriche (da 0,4 a 1 nm). La natura chimica dei nanomateriali è sia organica che inorganica, relativamente all'impiego previsto. L'applicazione di tali entità a livello industriale è da ricercarsi soprattutto nella produzione cosmetica e nei prodotti per l'igiene domestica e la cura della persona: l'esposizione diretta nel nucleo familiare è quindi probabilmente superiore rispetto alla potenziale esposizione attraverso riutilizzo delle acque reflue depurate. Studi preliminari per determinare gli effetti sulla salute causati dall'esposizione ai nanomateriali e, più in generale, del loro destino ambientale, non hanno finora fornito risultati soddisfacenti, rendendo necessari ulteriori approfondimenti (WEF, 2008). Ad oggi, tuttavia, il livello in tracce di nanoparticelle ingegnerizzate rinvenuto nelle acque di scarico non è risultato legato ad alcun effetto negativo sulla salute umana (O'Brien & Cummins, 2010). Tuttavia, il potenziale rischio ecotossicologico rappresentato dal rilascio di nanoparticelle nelle acque superficiali evidenzia la necessità di un'appropriate valutazione e gestione del rischio di tale contaminante emergente (O'Brien & Cummins, 2010). A questo proposito, è stato condotto uno studio sommario sul loro destino nel trattamento delle acque reflue, nel quale sembra probabile che le nanoparticelle ingegnerizzate possano essere adsorbite nel particolato di natura biologica o rimanere nel filtrato, a seconda della loro dimensione e della superficie esposta all'azione chimica, così come il tipo di processo di trattamento impiegato (Kaegi *et al.*, 2011; Kiser *et al.*, 2009; WEF, 2008). L'applicabilità di materiali *nanoadsorbenti*, di *nanocatalizzatori*, di *nanoparticelle bioattive*, di membrane catalitiche *nanostrutturate* e di filtri potenziati a nanoparticelle al trattamento delle acque sottolinea la possibilità di impiego di nuove promettenti nanotecnologie anche nell'ambito della depurazione delle acque (Savage & Diallo, 2005).

#### 2.2.8. Sostanze organiche

La composizione organica delle acque reflue consiste in un ampio spettro di sostanze sia naturali che di sintesi, tra le quali si distinguono con maggior rilievo sostanze umiche, materia fecale, rifiuti alimentari, detersivi liquidi, oli, grassi, prodotti di consumo e rifiuti industriali. Il livello di trattamento per questi componenti è legato anche in questo caso alla destinazione d'uso finale. Alcuni degli effetti avversi associati alla presenza di sostanze organiche sono di seguito riportati:

- *Effetti estetici/organolettici*  
Le sostanze organiche possono impartire odori sgradevoli e alterare il colore dell'acqua.
- *Fenomeni di accumulo e intasamento*  
Il particolato può intasare irrigatori o accumularsi nel suolo e influenzare la permeabilità.
- *Proliferazione di microrganismi*  
Le sostanze organiche forniscono materiale biologico utile alla riproduzione e alla colonizzazione di microrganismi.

- *Consumo di ossigeno*  
Durante la loro decomposizione le sostanze organiche riducono il contenuto di ossigeno disciolto (DO) nei corpi idrici. Questo impatta negativamente sulla vita acquatica che necessita di ossigeno per la sopravvivenza.
- *Limitazioni d'uso*  
Molte applicazioni industriali non possono impiegare acqua ad alto contenuto di materia organica.
- *Effetti sulla disinfezione*  
La materia organica in sospensione può interferire con cloro, con ozono, e con raggi UV, rendendoli meno disponibili per la disinfezione. Inoltre, la clorazione può causare la formazione dei *sottoprodotti di disinfezione (Disinfection ByProducts, DBP)* clorurati potenzialmente dannosi.

### 2.2.9. Costituenti in tracce

La produzione e il largo impiego di nuovi prodotti di sintesi sono caratteristiche peculiari del progresso tecnologico delle comunità umane. La presenza di *residui* di tali sostanze nelle acque reflue è piuttosto variabile soprattutto a livello qualitativo: possono, infatti, essere riscontrati residui di prodotti farmaceutici, cosmetici, detergenti, biocidi, così come di numerosi altri prodotti chimici disponibili al consumo di massa. La presenza di tali residui nelle acque reflue è *in traccia*, non ponendo in questo senso un allarme immediato per il loro trattamento; comunque non trascurabile alla luce della loro natura chimica: molte di queste sostanze sono infatti causa di possibili effetti avversi per la salute umana e per gli equilibri ambientali, essendo potenzialmente in grado di generare alterazioni a livello *ormonale e/o interferenti* del sistema endocrino. I contaminanti emergenti che possono essere classificati come *costituenti in traccia* non sono in genere disciplinati da una normativa adeguata.

Una strumentazione analitica sofisticata consente di identificare e quantificare livelli estremamente bassi di singoli costituenti inorganici e organici in acqua. Gascromatografia / spettrometria di massa-tandem (GC/MS/MS) e cromatografia liquida ad alte prestazioni/ spettrometria di massa (HPLC/MS) sono esempi di tecnologie in grado di eseguire indagini di questo tipo. Tali tecniche analitiche richiedono apparecchiature costose e possono richiedere una lunga e difficile preparazione del campione, in particolare per quanto riguarda le sostanze organiche volatili.

### 2.2.10. Rimozione di costituenti in tracce

A causa della notevole variabilità della natura chimica dei costituenti in traccia, non è ad oggi disponibile un trattamento in grado di abbattere simultaneamente tali contaminanti. Le misure di contenimento di tali sostanze in sede di trattamento trovano dunque compimento attraverso la conduzione di un'opportuna sequenza di processi in grado di competere con l'ampio spettro di proprietà chimico-fisiche dei contaminati-bersaglio (Drewes & Khan, 2010).

Diversi studi hanno dimostrato che ciò può essere concretizzato attraverso l'implementazione di diversi trattamenti, tra cui processi biologici accoppiati con ossidazione chimica o adsorbimento su carbone attivo, separazione fisica seguita da ossidazione chimica, oppure dalla combinazione di processi naturali e di ossidazione chimica. Una recente indagine sul destino dei prodotti farmaceutici e per la cura personale (PPCP) in impianti di depurazione ha rivelato che molti composti interferenti del sistema endocrino (EDC) sono presenti a

concentrazioni di mg/L e non vengono significativamente rimossi secondo i processi di trattamento convenzionali delle acque reflue (Miège *et al.*, 2008). Processi di ossidazione comunemente utilizzati in sede di disinfezione (ed in generale, a tale fine) comprendono trattamenti di disinfezione con cloro, biossido di cloro e ozono; quest'ultimo particolarmente indicato nei confronti di molti costituenti organici in traccia (Alum *et al.*, 2004; Huber *et al.*, 2005). L'adsorbimento su carbone attivo può facilmente rimuovere molti composti organici dall'acqua, ad eccezione di alcuni composti *idrosolubili e polari*, come gli *agenti di contrasto iodati* e alcuni antibiotici (*sulfametossazolo*) (Adams *et al.*, 2002; Westerhoff *et al.*, 2005). I processi di trattamento condotti attraverso l'impiego di forti ossidanti chimici (*processi avanzati di ossidazione, Advanced Oxidation Processes AOP*) sono piuttosto efficaci, pur ponendo una serie di criticità essenzialmente legate allo sviluppo di sottoprodotti a seguito reazioni chimiche *crociate* con un gran numero delle molecole del *carbonio organico totale* (TOC), indubbiamente presenti nei reflui a concentrazioni più elevate rispetto ai costituenti in traccia. È quindi consigliabile l'impiego di tale trattamento avanzato solo a seguito di un trattamento preliminare con ozono, ottenendo comunque una rimozione piuttosto modesta (Dickenson *et al.*, 2009). L'impiego di membrane per *osmosi inversa* (RO) e per *nanofiltrazione* (NF) è decisamente più efficace nella di rimozione di tali contaminanti emergenti, in conseguenza dell'appropriata dimensionalità dei pori (Bellona *et al.*, 2008).

In Tabella 6 è illustrata una sintesi dei valori indicativi di abbattimento delle sostanze organiche presenti in traccia (Ternes & Joss, 2006; Snyder *et al.*, 2010).

**Tabella 6. Abbattimento (%) delle sostanze organiche in traccia**

Trattamento	B(a)p	ANT <sup>1</sup>	Composti farmaceutici					Ormoni		E	NDMA
			DZP	CBZ	DCF	IBP	PCT	STE <sup>2</sup>	ANA <sup>3</sup>		
Secondario (fanghi attivi)	nd	10-50	nd	–	10-50	>90	nd	>90	nd	50-90	–
Suolo-acquiferi	nd	nd	nd	25-50	>90	>90	>90	>90	nd	>90	>90
Lagunaggio	nd	50-90	10-50	–	50-90	50-90	nd	>90	nd	–	–
Microfiltrazione	nd	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	nd	<20	–
Ultrafiltrazione/PAC	nd	>90	>90	>90	>90	>90	nd	>90	nd	>90	>90
Nanofiltrazione	>80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	–
Osmosi inversa	>80	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	25-50
PAC	>80	20-80	50-80	50-80	20-50	<20	50-80	50-80	50-80	50-80	–
GAC		>90	>90	>90	>90	>90		>90		>90	>90
Ozonizzazione	>80	>95	50-80	50-80	>95	50-80	>95	>95	>80	50-90	50-90
Ossidazione avanzata		50-80	50-80	>80	>80	>80	>80	>80	>80	50-80	>90
UV intenso		20-80	<20	20-50	>80	20-50	>80	>80	20-50	nd	>90
Clorazione	>80	>80	20-50	<20	>80	<20	>80	>80	<20	20->80	–
Cloramminazione	50-80	<20	<20	<20	50-80	<20	>80	>80	<20	<20	–

**B(a)p:** benzo(a)pirene; **CBZ:** carbamazepina, **DBP:** Disinfection By-Products; **DCF:** diclofenac;

**DZP:** diazepam; **IBP:** ibuprofene; **PAC:** Powdered Activated Carbon; **PCT:** paracetamolo. **ANT:** Antibiotici e battericidi;

**STE:** Steroidi; **ANA:** Anabolizzanti; **E:** Essenze **NDMA:** N-nitrosodimetilammina; **PAC:** Polvere di Carbone Attivo;

**GAC:** Granular Activated Carbon

**nd** = nessun dato; **1** eritromicina, sulfametossazolo, trimetoprim, triclosan; **2** etinilestradiolo; estrone, estradiolo ed estriolo; **3** progesterone, testosterone

## 2.2.11. Trattamento delle acque reflue destinate al riuso

Il livello di trattamento delle acque reflue è subordinato alla destinazione d'uso o ai requisiti necessari per lo scarico nell'ambiente. Il trattamento secondario è stato progettato per ottenere la rimozione della sostanza organica degradabile e i solidi sospesi attraverso processi di

ossidazione biologica e successiva sedimentazione. Tale trattamento può essere integrato attraverso processi di *filtrazione* e *disinfezione* al fine di promuovere una rimozione aggiuntiva di agenti patogeni e di sostanze nutritive. Su tali basi si può considerare raggiunto un livello di qualità dell'acqua adeguato alla maggior parte delle destinazioni d'uso che non comportino l'esposizione umana diretta o l'ingestione o la veicolazione con gli alimenti. Nel novero dei processi che intervengono in sede di trattamento delle acque reflue si evidenziano i processi di *filtrazione*, di *disinfezione* e i *processi avanzati di ossidazione*. L'obiettivo di questa sezione è quello di descrivere tali processi e relativi recenti progressi, nonché di evidenziare il ruolo sempre più significativo dei sistemi di trattamento naturale, come le *zone umide artificiali* e i sistemi di SAT (*Soil Acquirer Treatment*).

#### **2.2.11.1. Filtrazione**

I processi di *filtrazione* hanno come effetto la rimozione del particolato, dei solidi sospesi, e di alcuni costituenti disciolti, in base al tipo di filtro impiegato. Come integrazione al trattamento secondario, tali processi permettono una disinfezione più efficiente rimuovendo il particolato residuo. Infatti, a differenza dell'azione *distruttiva* e/o *inattivante* esercitata dai disinfettanti chimici sugli agenti patogeni, la rimozione dei microrganismi attraverso tecniche di filtrazione avviene per *adsorbimento fisico* o per *intrappolamento* dei microrganismi nella matrice del mezzo filtrante. L'efficacia qualitativa dei filtri è subordinata alla relativa dimensione dei pori e del microrganismo-bersaglio. In tabella 7 è riportato un prospetto delle tipologie di filtri/membrane ad oggi disponibili e i relativi contaminanti soggetti a rimozione. Independentemente dalle significative variazioni delle configurazioni e delle caratteristiche dei filtri, esistono ad oggi tre tipologie di processi di filtrazione: *filtrazione profonda*, *filtrazione di superficie* e *filtrazione a membrana*.

#### **2.2.11.2. Filtrazione profonda**

I filtri impiegati per questa tecnica sono costituiti da una base di supporto *non comprimibile* (come sabbia, antracite o granato) o *comprimibile*. In base alla tipologia impiegata (*mono*, *dual*, o *mixed-media*), la dimensione effettiva del setto filtrante per un sistema sequenziale di filtri non comprimibili (sistema *multistadio*) varia generalmente tra 0,4 e 2,0 mm di diametro medio. I filtri a supporto non comprimibile consistono in colonne impaccate con diversi metri di matrice, e, in base alla configurazione del filtro all'interno del sistema filtrante, può impiegare un sistema di *controlavaggio continuo*, *discontinuo* o *in serie*. Negli ultimi anni, tuttavia, sono stati sviluppati e immessi sul mercato filtri a supporto comprimibile in materiale sintetico (circa 32 mm di spessore): durante il processo di filtrazione, il setto subisce una compressione che va dal 15 al 40%, valori per i quali l'operazione di filtrazione può essere condotta in maniera proficua. Il successivo *controlavaggio* viene normalmente condotto in *discontinuo*, secondo due fasi per le quali il setto è dapprima pulito con aria compressa e solo in seguito sottoposto all'effettivo lavaggio. L'elevata porosità del setto comprimibile (circa l'88% supporto) permette un carico idraulico più elevato rispetto ad altri filtri di profondità, mentre le operazioni di *controlavaggio* ricaricano continuamente la superficie del mezzo in preparazione ad un altro ciclo di filtrazione senza che la sua efficienza ne risulti compromessa.

#### **2.2.11.3. Filtrazione di superficie**

I filtri impiegati per questa tecnica non sono in genere impiegati in sistemi di filtrazione *modulare*, distinguendosi dai filtri applicati alla *filtrazione profonda* anche da un maggiore spessore del setto (generalmente, da una frazione di millimetro a qualche millimetro). I filtri di superficie sono costituiti da *vagli* o maglie realizzate in nylon, poliestere, acrilico e fibre di

acciaio inossidabile, ed esplicano la loro attività filtrando *per gravità* piuttosto che sottoposti a gradienti di pressione. Le operazioni di controlavaggio vengono normalmente condotte in *discontinuo*; fatta salva la modalità *in continuo* limitatamente a brevi periodi.

#### 2.2.11.4. Filtrazione a membrana

Una membrana può essere definita come una sottile pellicola di fase solida che separa due fasi fluide, agendo come una barriera selettiva per il trasporto di materia. Affinché l'acqua fluisca attraverso una membrana deve essere applicato un certo tipo di forza motrice, e per le applicazioni riguardanti il riutilizzo delle acque reflue depurate, i processi a membrana sono in genere condotti per mezzo dell'applicazione di un opportuno gradiente di pressione. Alcune nuove tecniche di *desalinizzazione*, largamente applicate nella bonifica di acque salmastre, impiegano il *gradiente osmotico* come forza motrice. In Tabella 7 è presente una sintesi della forza motrice e della dimensione nominale dei pori per i principali processi di filtrazione disponibili in commercio. Ci sono notevoli differenze nelle dimensioni dei pori di vari tipi di filtri disponibili (CDPH, 2012; Metcalf & Eddy, 2003).

**Tabella 7. Sinossi dei processi di filtrazione e della loro azione sui vettori di contaminazione**

Tipo di filtro	Tipologia di funzionamento	Porosità nominale (µm)	Contaminanti bersaglio
<b>Filtrazione profonda</b>			
Mezzo incompressibile	Gravità/gradiente di pressione	60-300	TSS, torbidità, alcune cisti e oocisti protozoiche
Mezzo comprimibile			
<b>Filtrazione di superficie</b>			
Filtro di superficie	Gravità	5-20	TSS, torbidità, alcune cisti e oocisti protozoiche
<b>Filtrazione a membrana<sup>1</sup></b>			
Microfiltrazione	Gradiente di pressione	0,05	TSS, torbidità, alcune cisti e oocisti protozoiche, batteri e virus
Ultrafiltrazione	Gradiente di pressione	0,002-0,050	Macromolecole, colloidali, la maggior parte dei batteri, alcuni virus, proteine
Nanofiltrazione	Gradiente di pressione	<0,002	Molecole a medio peso molecolare, durezza, virus
Osmosi inversa	Gradiente di pressione	<0,002	Molecole a basso peso molecolare, colore, durezza, solfati, nitrati, sodio, e altri ioni

(1) Informazioni desunte da *Water Treatment Membrane Processes* (AWWA, 1996)

L'uso di filtri del tipo a membrana produce un effluente di qualità superiore rispetto ad un effluente prodotto con filtri di tipo superficiale o di profondità; tuttavia, la qualità superiore dell'acqua filtrata con membrane *microfiltranti* o *ultrafiltranti* (MF o UF) ha un costo più elevato (da 1,5 a 2 volte) rispetto a quella prodotta dai sistemi di filtrazione di profondità o di superficie a causa dell'impiego energetico e della maggiore complessità del sistema filtrante. Allo stesso modo, i costi relativi ai processi di *Nanofiltrazione* (NF) e di *Osmosi inversa* (RO) sono sostanzialmente piuttosto elevati. Sono tuttavia in costante sviluppo nuove tecnologie sia nell'ambito di nuovi sistemi che nel miglioramento/ottimizzazione di tecniche già consolidate al fine di migliorare le prestazioni offerte da tali sistemi, con evidenti riscontri economici nel rapporto costi-benefici.

#### **2.2.11.5. Biofiltrazione**

La filtrazione biologica o *biofiltrazione* consiste nell'impiego di un *letto filtrante granulare* e biologicamente attivo al fine di rimuovere componenti biodegradabili (parte del TOC). I filtri appartenenti a questa tipologia sono in grado di sostenere la proliferazione microbica, necessitando tuttavia di un'acqua destinata alla filtrazione priva di residui di disinfettante. L'attività biologica migliora efficacemente il trattamento di rimozione del particolato di una vasta molteplicità di costituenti in tracce, compresi fitofarmaci, interferenti endocrini (EDC) e prodotti farmaceutici, anche se il grado di attività biologica del trattamento – e quindi la sua efficienza – risulta piuttosto variabile (Bonne *et al.*, 2006; Wunder *et al.*, 2008; Van der Aa *et al.*, 2003). Le tipologie di *letto filtrante* tipicamente in uso per varie applicazioni sono generalmente riconducibili alle tecniche di *filtrazione lenta a sabbia*, e di *filtrazione a carbone attivo granulare* (*Granulated Active Carbon*, GAC) (Evans, 2010). L'interesse verso questa tecnologia è dunque da attribuirsi al suo impiego come *step* di un processo di trattamento multi-stadio in luogo di tecniche più onerose in termini energetici ed economici come l'osmosi inversa (RO).

#### **2.2.11.6. Filtrazione lenta a sabbia**

La filtrazione lenta a sabbia, insieme a processi di filtrazione naturali, come il trattamento suolo-falda o SAT e la filtrazione ad argine, è in realtà uno dei più antichi processi di trattamento dell'acqua potabile in uso ancora oggi. Questa tecnica utilizza sabbia con granelli di piccolo diametro, il cui basso sviluppo superficiale non provoca coagulazione chimica. Durante la filtrazione, sulla superficie superiore dei granelli di sabbia si forma un sottile *film* biologicamente attivo chiamato *biofouling*, che viene periodicamente rimosso al fine di rigenerare la capacità idraulica del sistema. Questa tecnologia opera dunque attraverso due meccanismi sinergici: uno fisico, capace di trattenere i solidi sospesi e uno biologico, più attivo nell'abbattimento dei contaminanti organici e solubili.

#### **2.2.11.7. Filtrazione rapida**

Le tecniche di filtrazione rapida impiegano supporti granulari con efficienza circa 100 volte superiore rispetto al sistema di filtrazione lenta a sabbia. La tecnica prevede l'aggiunta preliminare di un *coagulante*, come *cloruro ferrico* o *allume*, per rimuovere la maggior parte della torbidità e della materia organica e richiede un periodico lavaggio in controcorrente del filtro con acqua clorata o non clorata. Se necessario, può essere associato un processo di *preossidazione*, che impieghi l'ozono, il cloro, il biossido di cloro o il permanganato, al fine di migliorare l'attività biologica mediante ossidazione della materia organica complessa in piccoli composti organici più biodegradabili, rapidamente rimossi dal sistema. Tale processo integrativo deve tuttavia osservare rigorosamente opportuni dosaggi dei composti chimici ossidanti, in modo tale da evitare l'azione nociva dei loro residui sulle colonie microbiche attive sulla superficie del filtro.

#### **2.2.11.8. Filtrazione GAC**

A differenza dei supporti a sabbia o in antracite, i filtri GAC hanno la proprietà aggiuntiva di fornire una grande capacità di adsorbimento, potendo inoltre accumulare una maggiore biomassa microbica (o *biofilm*). La rigenerazione dei filtri GAC può essere condotta attraverso processi biologici, che ne aumentano in questo modo la durata d'impiego. In base al tempo di contatto del filtro con l'acqua da trattare per rimuovere i contaminanti-bersaglio, la filtrazione GAC può essere modulata come un mezzo a filtrazione rapida, oppure a filtrazione profonda, o come filtro preliminare ad un letto filtrante a sabbia o antracite.

### 2.2.11.9. Processi di depurazione mediante tecnologie a membrane e biofilm

Diverse applicazioni riguardo le tecnologie *a membrana* hanno recentemente conseguito importanti successi in termini di efficacia di trattamento e di risparmio energetico associato.

Di queste, primeggiano quelle riconducibili ai sistemi IFAS (*Integrates film activated sludge*), in quanto permettono un trattamento dei reflui attraverso processi di natura microbiologica in ambienti aerobici, anaerobici e anossici<sup>3</sup> debitamente *zonati* in un unico modulo, al cui interno sono alloggiati i supporti ospitanti le colonie batteriche (Brentwood, 2009). In questo modo intervengono nel trattamento di depurazione entrambe le tecnologie dei *fanghi attivi* e dei *bioreattori a membrana* all'interno di un'unica struttura, come illustrato nella Figura 6 (Aqwise, 2010).

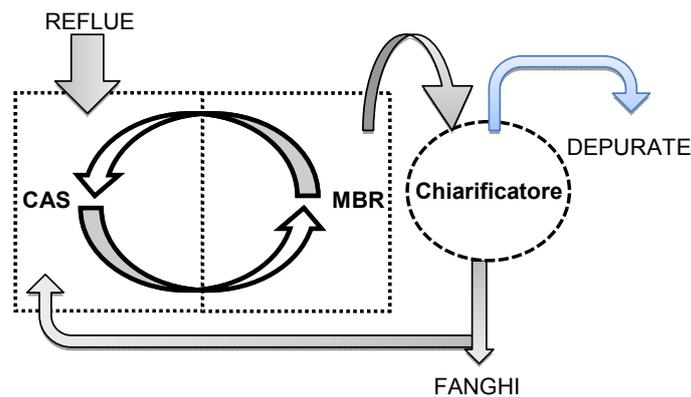
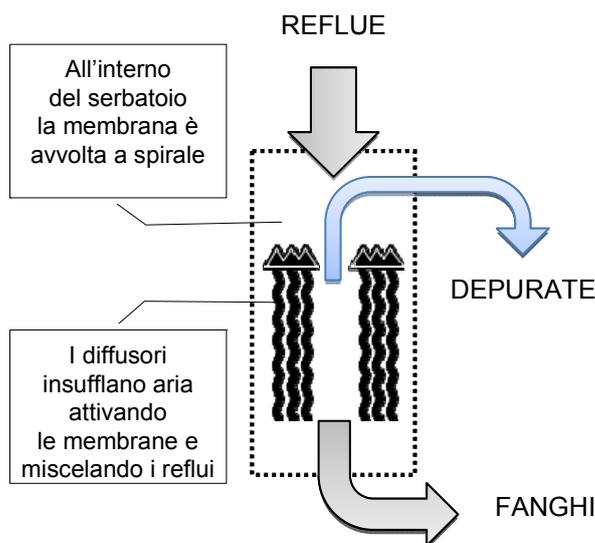


Figura 6. Schema base di funzionamento di un sistema IFAS

L'azione di trasformazione biologica è sinergica, in quanto alla riduzione del valore del BOD<sub>5</sub> tipico della tecnologia dei *fanghi attivi*, si aggiunge l'intensa *nitrificazione* (trasformazione dell'ammoniaca e dei Sali di ammonio in *nitriti e nitrati*) caratteristica dei *bioreattori a membrana* (Aqwise, 2010). I vantaggi di questa tecnologia trovano il loro fondamento nella riduzione della cubatura dell'impianto (permettendo inoltre interventi di *retrofit* dei sistemi a *fanghi attivi*), dei costi operativi e della produzione di fanghi, oltre a non richiedere la presenza costante di operatori (Brentwood, 2009). La maggiore criticità associata ai sistemi IFAS, tuttavia, riguarda la necessità della corretta e continua aerazione del dispositivo, a cui è imputabile la percentuale maggiore dei consumi energetici. Al fine di risolvere tale criticità, la recente attività sperimentale ha provveduto all'elaborazione di una soluzione ingegneristica fondata sullo sviluppo di un sistema compatto in cui la membrana è avvolta a spirale, come illustrato in Figura 7 (Shechter, 2015).

Questo tipo di architettura permette un'efficace circolazione delle acque reflue all'interno del sistema, la cui aerazione è garantita dalla presenza di appositi diffusori posti alla base del serbatoio; e le cui adeguate proprietà reologiche sono in grado di mantenere un efficace equilibrio nella composizione della popolazione microbica (Shechter, 2015).

<sup>3</sup> Si riportano per completezza d'informazione le seguenti definizioni: per *ambiente aerobico* si intende un corpo d'acqua contenente ossigeno disciolto, per *ambiente anossico* il medesimo contenente solo ossigeno chimicamente legato (sostanze ossidanti come la specie *nitrato*, in grado di fornire ossigeno ad alcune specie batteriche) e per *ambiente anaerobico* il medesimo privo delle precedenti.



**Figura 7. Esploso di un sistema IFAS con membrana a spirale**

Il sistema fornisce la completa aerazione dell'acqua contenuta nel serbatoio attraverso il funzionamento intermittente dei diffusori, generalmente attivi per un tempo di 10 secondi ad intervalli di 5 minuti (Shechter, 2015). Le dimensioni contenute e la natura *modulare* di tale sistema ne permettono l'impiego *in serie*, non potendo tuttavia prescindere da un'adeguata valutazione dei volumi di acqua grezza e della qualità finale dell'acqua depurata in relazione alla destinazione d'uso. In generale, l'efficacia dei sistemi IFAS nell'abbattimento del contenuto in azoto totale dei reflui trattati è stata sperimentalmente dimostrata, risultando l'efficienza del sistema particolarmente affidabile anche in giorni in cui la concentrazione di azoto totale nelle acque in ingresso raggiunga dei valori di picco (Shechter, 2015). Sono stati inoltre registrati ulteriori vantaggi relativi all'impiego di tale tecnologia nell'osservazione di una diminuzione dell'impianto acustico del depuratore, in quanto i minori quantitativi d'aria richiesti per l'ossigenazione delle colonie batteriche limitano la potenza e l'impiego di pompe di alimentazione. L'abbattimento pressochè totale degli odori sgradevoli, tipici degli impianti di depurazione consente il possibile impiego di tali sistemi anche in prossimità di centri abitati, permettendone la depurazione *in loco* con evidenti positivi risvolti economici. Alla luce di quanto esposto, le nuove tecnologie suggeriscono la possibilità futura di decentralizzare il sistema di depurazione e riuso delle acque attraverso l'attivazione di piccoli impianti di depurazione, che consentirebbe il riuso dell'acqua depurata localmente, con indubbi vantaggi in termini di opere civili e costi di gestione.

#### **2.2.11.10. Processi di disinfezione**

La riduzione dei valori di concentrazione degli indicatori di contaminazione microbica nelle varie fasi di trattamento è riportata nella Tabella 8 (Bitton, 1999; EPHC *et al.*, 2008; Mara & Horan, 2003; NRC, 1998; NRC, 2012; Rose *et al.*, 1996; Rose *et al.*, 2001; EPA, 1999, 2003, 2004; WHO, 1989).

Tabella 8. Log Reductions indicativa in vari livelli di trattamento delle acque reflue<sup>1</sup>

Tipologia	Indicatore			Patogeno				
	batterico	batterico	virale	Entero- batteri	Entero- virus	Protozoi		Elminti
	<i>E. coli</i>	<i>C. perfringens</i>	Colifagi			<i>Giardia lamblia</i>	<i>Cryptosporidium parvum</i>	
Trattamento secondario	1-3	0,5-1	0,5-2,5	1-3	0,5-2	0,5-1,5	0,5-1	0-2
Filtrazione a due stadi <sup>2</sup>	0-1	0-1	1-4	0-1	0,5-3	1-3	1,5-2,5	2-3
Filtrazione a membrana <sup>3</sup>	4-(>6)	(>6)	2-(>6)	(>6)	2-(>6)	(>6)	4-(>6)	(>6)
Lagunaggio	1-5	nd	1-4	1-5	1-4	3-4	1-3,5	1,5-(>3)
Ozonizzazione	2-6	0-0,5	2-6	2-6	3-6	2-4	1-2	nd
Disinfezione UV	2-(>6)	nd	3-(>6)	2-(>6)	1-(>6)	3-(>6)	3-(>6)	nd
Ossidazione Avanzata	(>6)	nd	(>6)	(>6)	(>6)	(>6)	(>6)	nd
Clorazione	2-(>6)	1-2	0-2,5	2-(>6)	1-3	0,5-1,5	0-0,5	0-1

(1) i tassi di rimozione dipendono da specifiche condizioni operative, quali i tempi di ritenzione, i tempi di contatto e le concentrazioni di sostanze chimiche usate, la dimensione dei pori, la profondità del mezzo filtrante, i pretrattamenti, e altri fattori. Gli intervalli forniti non devono essere considerati base normativa, hanno il solo fine comparativo.

(2) è compresa la *coagulazione*.

(3) UF, NF, e RO; i tassi di rimozione variano notevolmente in base all'installazione e alla manutenzione delle membrane. nd: non disponibile

Al fine di fornire acqua rigenerata che soddisfi l'uso previsto, le operazioni di *disinfezione* si configurano quale fase decisiva per il livello di qualità dell'acqua in uscita. Il metodo più comune di disinfezione dell'acqua è la *clorazione*, nonostante la disinfezione UV sia un'alternativa piuttosto efficiente. Tuttavia, a differenza della disinfezione condotta per mezzo di disinfettanti chimici, che *residuando* permettono il mantenimento di una disinfezione *effettiva* per un discreto periodo successivo al trattamento, l'impiego dell'irraggiamento UV non permette il controllo della disinfezione dal termine dell'irraggiamento all'effettivo utilizzo della risorsa idrica. Altre alternative all'impiego del cloro e dei suoi composti riguardano l'impiego di acido *peracetico* di ozono, la *pastorizzazione*, e la reazione con *ferrato* (WERF, 2008). I parametri operativi richiesti per la clorazione, la disinfezione UV, la disinfezione a ozono, e la pastorizzazione sono riportati in Tabella 9.

Tabella 9. Sinossi dei valori dei parametri operativi di conduzione dei processi di disinfezione (normativa vigente in California)

Processo di disinfezione	Valori operativi
Clorazione	CrT <sup>(1)</sup> =450 mg/L * min)
Ozono	CT <sup>(1)</sup> = 1 mg/L * min
Pastorizzazione	10 secondi di tempo di contatto a 82 °C
UV	100 mJ/cm <sup>2</sup> a seguito di filtrazione a sabbia o a setto; 80 mJ/cm <sup>2</sup> a seguito di MF o UF; 50 mJ/cm <sup>2</sup> a seguito di RO

(1) i parametri CrT e CT indicano rispettivamente i valori di cloro residuo e disinfettante residuo per il loro tempo di contatto con il refluo da depurare

#### 2.2.11.10.1. Clorazione

La disinfezione per clorazione può essere condotta attraverso l'impiego di *cloro* o dei suoi composti. Indipendentemente dalla modalità di conduzione del processo, l'efficienza dipende dalla temperatura dell'acqua, dal pH, dal grado di miscelazione, dal tempo di contatto, dalla presenza di sostanze interferenti, dalla concentrazione e forma chimica della specie cloro impiegata e dalla natura e concentrazione dei microorganismi. In generale, la sensibilità al cloro è maggiore per i batteri, mentre diminuisce progressivamente per i virus, le uova, le cisti e le oocisti dei nematodi. Il monitoraggio della clorazione viene effettuata mediante le misure del *cloro totale residuo* (che include il cloro residuo unitamente ai relativi sottoprodotti di disinfezione) nell'acqua trattata dopo un preciso tempo di contatto. La presenza di ammoniaca nelle acque reflue provoca la formazione di *clorammine* (tipicamente *monoclorammine*), meno efficaci del cloro libero di circa un ordine di grandezza (WEF, 2010). Inoltre, il cloro reagisce con altri costituenti organici che permangono nelle acque reflue trattate formando composti potenzialmente nocivi, quali *trialometani* (THM) e *acidi acetici alogenati* (HAA) (Black & Veatch Corporation, 2010; Szerwinski *et al.*, 2012). L'efficacia della clorazione è in genere misurata come  $CR_T$ , parametro che esprime il prodotto del *cloro residuo totale* per il *tempo di contatto*: a causa della variabilità della composizione del refluo da trattare, i valori richiesti di cloro come  $CR_T$  devono essere determinati empiricamente. Il cloro libero è un disinfettante virale rapido ed efficace per le acque reflue, ma anche una concentrazione moderata di ammoniaca può ridurre notevolmente l'efficacia della disinfezione per *poliovirus* e per il *colifago* MS2 (Cooper, 2000). I protozoi come *Giardia lamblia* e *Cryptosporidium parvum* e *hominis*, mostrano particolare resistenza all'inattivazione per clorazione (EPA, 2004; Gennaccaro *et al.*, 2003).

#### 2.2.11.10.2. Disinfezione UV

L'impiego dei raggi UV per la disinfezione delle acque reflue rappresenta una tecnologia promettente, in quanto sono sempre più disponibili soluzioni a basso costo e a basso consumo energetico. L'efficienza della disinfezione condotta per mezzo dell'irraggiamento UV è subordinata ai trattamenti chimico-fisici precedenti la disinfezione. Il materiale in sospensione agisce fisicamente *riflettendo* e *diffondendo* la radiazione incidente, e a livello chimico-fisico adsorbendo sulla propria superficie gli agenti patogeni. La distribuzione granulometrica delle particelle è quindi un potenziale indice dell'efficienza di disinfezione: è stato infatti osservato che particelle più grandi di 10  $\mu\text{m}$  possono proteggere efficacemente i microorganismi dall'irraggiamento UV (Jolis *et al.*, 2001). Chevrefils *et al.* (2006) hanno condotto una profonda revisione della letteratura nell'ambito del trattamento UV di batteri, virus, e protozoi concludendo che tale tecnica è molto efficace per la maggior parte dei microorganismi, tra cui *poliovirus*, *calicivirus*, *reovirus*, *coxsackievirus*, *rotavirus*, e il *virus dell'epatite*. Un'importante criticità relativa alla disinfezione UV riguarda la possibilità del verificarsi di *fotoriattivazione* dei microorganismi dopo l'esposizione, fenomeno che consiste nella riparazione del DNA danneggiato non in modo irreversibile. Tale fenomeno può verificarsi quando le cellule danneggiate sono esposte alla luce nello spettro del *visibile* (310-480 nm) (Harris *et al.*, 1987; Ni *et al.*, 2002). Lindenauer e Darby (1994) hanno osservato un minor grado di fotoriattivazione di coliformi totali in acque reflue in relazione all'aumento della dose UV irradiata. La dose d'irraggiamento UV viene misurata in millijoules al secondo per  $\text{cm}^2$  ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) e calcolata moltiplicando l'intensità del'irraggiamento (in  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) per il *tempo di esposizione* (in secondi).

#### 2.2.11.10.3. Disinfezione a ozono

L'impiego di *ozono* per la disinfezione delle acque è classificabile come *trattamento avanzato*, in quanto la forte attività ossidante di tale reagente non si limita alla sola

inattivazione dei microrganismi, ma si esplica efficacemente nella rimozione dei contaminanti chimici emergenti (CEC). L'inattivazione microbica, così come per il trattamento di *clorazione*, è provocata dalla lisi cellulare e danni irreversibili al DNA. Tecnologia piuttosto diffusa nell'ambito della produzione di acqua destinata al consumo umano, la disinfezione con ozono è stata oggetto di un crescente interesse da parte di gruppi di ricerca per la sua applicabilità alla disinfezione delle acque reflue depurate (Ishida *et al.*, 2008), in quanto è possibile raggiungere una significativa riduzione batterica prima della comparsa di un residuo di ossidante (Absi *et al.*, 1993; Janex *et al.*, 2000; Lazarova *et al.*, 1998). Nell'ambito delle misure del controllo dello sviluppo di sottoprodotti di disinfezione, l'aggiunta di *perossido di idrogeno* ( $H_2O_2$ ) ad acque reflue sottoposte ad *ozonizzazione* può comportare la riduzione della formazione del *bromato* (Ishida *et al.*, 2008) per acque a forte contenuto di bromuro.

#### 2.2.11.10.4. Pastorizzazione

La pastorizzazione è un processo termico in grado di inattivare i microrganismi. Tale metodologia è stata messa a punto da Louis Pasteur nel 1864, e da allora divenuta una pratica comune nel settore alimentare. La sua applicazione può essere rivolta al trattamento dei fanghi delle acque di scarico, oppure alla disinfezione delle acque reflue destinate al riuso. L'inattivazione termica dei microrganismi è legata alla concomitanza di una serie di fattori, quali le caratteristiche intrinseche dei microrganismi, i relativi livelli di concentrazione, le condizioni ambientali (es. la carenza di nutrienti causa una condizione di stress), la fase di sviluppo e le caratteristiche chimico-fisiche della matrice (quali la conducibilità termica, il pH, la presenza di sostanze protettive come i grassi e solidi, ecc.). Nella realizzazione dei sistemi di pastorizzazione risulta comunque cruciale l'armonizzazione dei valori operativi di temperatura con il tempo di esposizione. L'economicità relativa di tale tecnica è da ricercarsi nella possibilità di gestire circuiti termici in cui sia possibile l'approvvigionamento di calore da altre fonti (es. da una turbina alimentata a gas naturale, o da un digestore per la produzione di biogas), e di realizzare soluzioni ingegneristiche in grado di permettere il recupero di calore dalle acque disinfettate dal preriscaldamento delle grezze.

#### 2.2.11.10.5. Disinfezione con ferrato

Il *ferrato* è una specie chimica del ferro allo stato di ossidazione +6 ( $Fe^{+6}$ ), capace di esercitare un forte potere ossidante in funzione del pH della soluzione. L'impiego del *ferrato* come alternativa al cloro è oggetto di studio già dal 1970, ma a causa degli alti costi di produzione, tale tecnologia non è riuscita ad affermarsi nell'ambito dei trattamenti di disinfezione. Il recente sviluppo di nuovi metodi di produzione *in situ* ha ovviato a tale criticità, permettendo l'applicazione di tale tecnologia come alternativa ad altri processi di ossidazione e disinfezione: tale sintesi, infatti, richiede una serie di reagenti a basso costo e facilmente reperibili, come alcali solidi, cloruro ferrico e ipoclorito di sodio. La ricerca ha dimostrato come il *ferrato* sia un agente ossidante estremamente competitivo per i processi di disinfezione, con l'importante conseguenza di ridurre al minimo la formazione di sottoprodotti (*ossidi di ferro*). In letteratura sono riportati diversi dati riguardanti l'uso del ferrato nella disinfezione delle acque reflue (Skaggs *et al.* 2008 e 2009).

#### 2.2.11.10.6. Tecniche di ossidazione avanzate

Le tecniche di ossidazione avanzata AOP (*Advanced Oxidation Processes*) consistono in una classe di tecnologie di trattamento delle acque basate sui processi UV/ $H_2O_2$ , ozono/ $H_2O_2$ , ozono/UV, UV/ $TiO_2$  (biossido di titanio), e su una serie di combinazioni di agenti ossidanti noti come *reattivi di Fenton* ( $Fe/H_2O_2$ ,  $Fe/ozono$ ,  $Fe/H_2O_2/UV$ ) (Asano *et al.*, 2007; Stasinakis, 2008; Munter, 2001), impiegabili come integrazione a un normale ciclo di trattamento. La necessità dello sviluppo di tali tecniche è riconducibile alla comprovata efficacia nella

rimozione dei residui di prodotti farmaceutici, cosmetici (PPCP) e interferenti endocrini che non sono significativamente rimossi durante i processi di trattamento convenzionale delle acque reflue (Miège *et al.*, 2008). Le tecniche AOP sono piuttosto simili tra loro, in quanto progettate per la generazione di intermedi altamente reattivi, quali i radicali *idrossile* e *superossido* (Glaze *et al.*, 1987), oltre che per sfruttare l'elevato potenziale di ossidazione elettrochimica di tali specie chimiche, combinando processi di disinfezione e di ossidazione crociata come indicato in Tabella 10.

**Tabella 10. Scala dei potenziali di ossidazione chimica di alcuni agenti ossidanti**

Agente ossidante	EOP [V] <sup>1</sup>	EOP relativo <sup>2</sup>
Radicale idrossile	2,80	2,05
Ozono	2,08	1,52
Acido peracetico	1,81	1,33
Perossido d'idrogeno	1,78	1,3
Ipclorito	1,49	1,1
Cloro	1,36	1
Diossido di cloro	1,27	0,93

(1) indica il potenziale elettrochimico di ossidazione (*Electrochemical Oxidation Potential*)

(2) EOP relativo è un numero puro, in quanto ottenuto dalla *normalizzazione* del valore dell'EOP della specie considerata con il valore di EOP del cloro

La formazione dei radicali idrossilici insieme alla loro disponibilità all'interno della matrice sono influenzate dal pH, ma solo a valori estremi (Arakaki, 1999), mentre ai normali valori di pH non si osserva alcuna variazione significativa (Watt *et al.*, 1994). Rispetto ai trattamenti convenzionali, i trattamenti AOP permettono la rimozione dei microrganismi unitamente ai contaminanti chimici emergenti (*Contaminants of Emergent Concern*, CEC) (WRRF, 2012b); oltre che delle *nitrosammine*, sottoprodotti della disinfezione con clorammine e in misura minore con cloro. Tra i composti appartenenti a quest'ultima classe di contaminanti il più noto e diffuso è la *N-nitrosodimetilammina* (NDMA).

## 2.2.12. Sistemi di depurazione naturali

I processi di filtrazione naturale sfruttano le caratteristiche intrinseche di argini, di falde acquifere e di *zone umide* di configurarsi come un setto poroso – grazie alla presenza del suolo e delle piante – in grado di filtrare l'acqua fornendo, in alcuni casi, una superficie disponibile per la crescita di biofilm capace di ossidare o ridurre i contaminanti. Le due tipologie principali di trattamento naturale delle acque reflue sono le *zone umide* e la filtrazione *suolo-falda* (che comprende anche la filtrazione operata dalle sabbie delle rive dei fiumi).

### 2.2.12.1. Meccanismi di trattamento negli ambienti naturali

I sistemi naturali possono ridurre o eliminare gli agenti microbici, il carbonio organico, i contaminanti di interesse e le sostanze nutritive durante il trasporto delle acque sotto la superficie del terreno. L'impiego di bacini di diffusione migliora la qualità microbiologica e chimico-fisica dell'acqua reflua depurata quando questa filtra attraverso il sottosuolo.

### 2.2.12.2. Agenti patogeni

La presenza di agenti patogeni rappresenta una condizione di grande criticità in tutti i sistemi che impiegano acque di riuso. La rimozione delle specie patogene con la tecnica SAT è molto efficiente nelle circostanze in cui l'acqua viene fatta fluire nelle *zone insature* del terreno, mentre la tecnica ASR (*Acquifer Storage and Recovery*) iniettando direttamente l'acqua trattata nell'acquifero sotterraneo, ed escludendo quindi l'effetto filtrante della *zona insatura* del suolo, necessita di un'adeguata pianificazione del trattamento, in quanto necessariamente *sito-specifica*. Inoltre, l'efficienza di rimozione dei patogeni per la tecnica ASR è minore per i sistemi in cui l'acqua reflua viene stoccata in matrici non porose (es. in rocce *basaltiche*) piuttosto che in falde sabbiose. La presenza di agenti patogeni nelle acque ha reso necessario lo sviluppo di parametri in grado di fornire una *stima* del tempo di diffusione delle acque dalla falda alla superficie: tali valori sono in genere determinati in base alle caratteristiche *sito-specifiche* e/o attraverso l'uso di *traccianti di campo*, e sono valutati in *media*, che tuttavia non può essere rappresentativa di tutte quelle circostanze per le quali le acque superficiali risalgono rapidamente in superficie, affiorando dal suolo prima di completare il processo di depurazione. Le criticità legate alla carica virale e al loro abbattimento con tali tecniche sono ancora oggetto di studio; per questo è raccomandata l'integrazione di un sistema di trattamento in grado di garantire l'efficace disinfezione delle acque. Allo stesso modo, la contaminazione di alcuni protozoi come *Cryptosporidium* e *Giardia*, rispettivamente rilevati come oocisti e cisti nelle acque sotterranee (Bridgman *et al.* 1995; Hancock *et al.* 1998) e nelle acque reflue depurate (Gennancaro *et al.*, 2003; Huffman *et al.*, 2006), sottolinea il carattere emergente di tale problematica anche a seguito di evidenze della loro correlazione con la comparsa di focolai epidemici a seguito di forti piogge (Bridgman *et al.* 1995; Willocks *et al.* 1998; Rose *et al.* 2000; Curriero *et al.* 2001) che ha rivelato come queste due specie possono essere facilmente trasportate in superficie, specialmente attraverso terreni porosi. Alla luce di ciò, si ritengono necessari ulteriori studi di approfondimento di tale problematica.

### 2.2.12.3. Carbonio organico

Il carbonio organico residuo rappresenta un potenziale pericolo in sede di riuso delle acque reflue, in quanto i composti riconducibili a questa classe di contaminanti possono causare importanti ripercussioni sulla salute pubblica (Asano, 1998). Nel novero di tale classe di contaminanti è possibile individuare tre *sottoclassi* di particolare interesse sanitario (Drewes & Jekel, 1998): la materia organica naturale (*Natural Organic Matter*, NOM), presente in molte riserve d'acqua, i CEC rilasciati nelle acque dall'impiego individuale di prodotti industriali e/o generati come sottoprodotti di disinfezione (DBP) a seguito dei trattamenti di disinfezione delle acque e dei reflui, e i composti solubili di natura microbiologica (*Soluble Microbial Products*, SMP) generati rilasciati a seguito dei processi di trattamento delle acque reflue e la cui presenza è imputabile alla decomposizione dei composti organici. I composti classificabili come NOM e SMP, non possono essere determinati singolarmente, e il loro ordine di grandezza come carbonio organico è dell'ordine dei mg/L; mentre i contaminanti chimici emergenti CEC sono in genere rinvenibili nell'ordine dei µg/L o ng/L. Il processo di rimozione di tali specie chimiche durante il trasporto dalla superficie al sottosuolo è riconducibile a meccanismi di filtrazione, di assorbimento, di ossidoriduzione e di biodegradazione; con quest'ultimo particolarmente efficace e maggiormente sostenibile (Fox *et al.*, 2005; AWWARF, 2001). La rimozione della NOM e degli SMP viene condotta attraverso l'idrolisi primaria delle molecole ad alto peso molecolare, e dalla successiva decomposizione ad opera dei microrganismi il cui sviluppo e moltiplicazione è favorito dall'impiego dei prodotti di prima idrolisi come *nutrimento* (Drewes *et al.*, 2006). Le medesime circostanze permettono la *co-metabolizzazione* di composti organici

presenti in concentrazioni troppo basse per supportare la crescita microbica (Rausch-Williams *et al.*, 2010, Nalinakumari *et al.*, 2010). I tempi necessari alla trasformazione della sostanza organica durante il trasporto dalla superficie al sottosuolo variano a seconda della natura chimica del composto: è possibile classificare i composti organici come a *decomposizione rapida*, per i quali le reazioni di decomposizione avvengono in poco tempo, e a *decomposizione lenta*, per i composti persistenti le cui reazioni di decomposizione possono impiegare intervalli temporali piuttosto estesi (Fox & Drewes, 2001). La decomposizione dei composti organici facilmente biodegradabili richiede mediamente un arco temporale modesto, dell'ordine di pochi giorni.

#### 2.2.12.4. Costituenti d'interesse sanitario

La rimozione dei CEC è correlato alla rimozione del *carbonio organico disciolto* (*Dissolved Organic Carbon*, DOC). I costituenti afferenti a tale categoria di contaminanti vengono classificati in base alla loro tendenza ad essere *biodegradati*, ovvero a subire decomposizione da parte dei microrganismi all'interno della matrice acquosa nell'arco di determinati intervalli temporali. Sono quindi distinguibili costituenti facilmente biodegradabili, come la caffeina e il 17 $\beta$ -Estradiolo, completamente rimossi nell'arco di pochi giorni; e costituenti maggiormente refrattari, come la NDMA e il sulfametossazolo, la cui completa rimozione può richiedere settimane o mesi (Dickerson *et al.*, 2008). Composti estremamente refrattari, come la carbamazepina e il primidone, sono definiti *persistenti* in quanto la loro permanenza all'interno del comparto ambientale perdura per mesi o anni (Clara *et al.*, 2004, Heberer, 2002). La biotrasformazione dei CEC può dipendere dalla presenza di carbonio organico biodegradabile, in quanto la loro presenza in basse concentrazioni non riesce a supportare lo sviluppo della microflora attiva (Rausch-Williams *et al.*, 2010, Nalinakumari *et al.*, 2010).

#### 2.2.12.5. Azoto

I composti dell'azoto (per la maggior parte inorganici) presenti nelle acque reflue possono essere causa di molteplici problematiche, inerenti effetti diretti e indiretti, in tutte le circostanze per le quali la loro presenza è riscontrabile a livelli superiori ai normali valori del *fondo* naturale. Le acque di riuso che non hanno subito un processo di *denitrificazione* possono contenere più di 20 mg/L di azoto ammoniacale, il quale può richiedere fino a 100 mg/L di ossigeno per la sua completa decomposizione. Gli studi più importanti sul destino ambientale dell'azoto sono stati condotti osservando i meccanismi di decomposizione all'interno della *zona insatura* del terreno: la naturale alternanza di condizioni umide e secche, causa dell'instaurarsi di cicli di aerobiosi/anaerobiosi, favorisce lo sviluppo microbico e la connessa attività biochimica e chimico-fisica di trasformazione delle molecole suscettibili di biotrasformazione (Miller *et al.*, 2006). Tale alternanza facilita il *ciclo dell'azoto*, permettendone l'abbattimento a percentuali maggiori del 70% (Kopchynski *et al.*, 1996). Il meccanismo di rimozione dei composti azotati non è dipendente dal tempo di residenza nell'*orizzonte pedologico* attivo, ma è funzione della *capacità aerobica* dell'acquifero sottostante: quest'ultimo, infatti, tende all'*anossia* se nelle acque reflue depurate percolanti è presente ammoniaca a concentrazioni sufficienti ad esaurirne il contenuto in ossigeno (AWWARF, 2001). È invece subordinata al tempo di residenza all'interno della *zona satura* la riduzione del contenuto in *nitrato* quando questo agisce come elettrone-attrattore – in condizioni anossiche – nelle reazioni di degradazione dei composti organici. Un suo esaurimento, tuttavia, può comportare l'instaurarsi di condizioni riducenti, ostacolo alla decomposizione della materia organica e causa del rilascio nel corpo idrico di composti solubili del ferro e del manganese.

#### 2.2.12.6. Zone umide

Il trattamento delle acque reflue in *zone umide* è un settore in pieno sviluppo, in quanto numerosi studi hanno evidenziato un consistente e affidabile incremento nella qualità dell'acqua trattata secondo tali sistemi, sia naturali che artificiali. Quest'ultime, inoltre, quando progettate e gestite in modo opportuno, mostrano caratteristiche simili a quelle naturali nel trattamento del BOD, del TSS, dell'azoto, del fosforo, degli agenti patogeni, dei metalli, dei solfati organici e di altre sostanze tossiche; oltre a fornire benefici ambientali e habitat naturali assolutamente equivalenti. L'aumento qualitativo dell'acqua trattata è da ricercarsi soprattutto nella capacità di trasformazione e/o di accumulo dei contaminanti: il contatto totale delle acque reflue con il sistema assicura il massimo trattamento possibile in termini di assimilazione e di accumulo di sostanze indesiderate. In corrette condizioni operative è possibile mantenere inalterati nel tempo livelli ottimali di azoto e del BOD, in quanto i processi di rimozione delle specie rappresentate da tali parametri sono condotti da microrganismi che generano come prodotto finale un effluente gassoso rapidamente disperso nell'atmosfera. L'assorbimento del fosforo è invece limitato dalla capacità di *adsorbimento* del suolo e dal suo accumulo a lungo termine. Una revisione della letteratura dedicata alle tecniche alternative di riciclo e riuso delle acque reflue condotto da Carey e Migliaccio (2009) indica che le *zone umide* naturali o artificiali possono, in certe condizioni, sostituire processi avanzati di trattamento delle acque reflue, in quanto capaci di rimuovere dal 79 all'80% del contenuto totale in fosforo. Le tecnologie disponibili per questo tipo di trattamento comprendono principalmente nell'impiego di *zone umide superficiali*, che consistono essenzialmente in vasti bacini superficiali con un folto sviluppo della vegetazione, e *zone umide a flusso profondo*, soluzioni per le quali l'acqua da depurare non è in contatto con la superficie. Indipendentemente dalla specifica tecnologia alla base della loro costruzione, le *zone umide*, forniscono come ulteriore benefici un ottimo habitat per molte specie volatili (incluse le specie a rischio estinzione) e protezione dai fenomeni alluvionali per le comunità locali.

#### 2.2.12.7. Trattamento attraverso il sistema suolo/falda

Questa tecnica di depurazione è subordinata ad una serie di requisiti piuttosto rigorosi, il cui mancato soddisfacimento può risultare in una depurazione insufficiente. Il trattamento SAT necessita, infatti, di una *falda libera*, di una *zona insatura* priva di formazioni impermeabili, e di un'opportuna *granulometria* del suolo in grado di garantire sia una sufficiente velocità d'*infiltrazione* che un'adeguata capacità filtrante. Quest'ultima funzione è assolta appieno dalla *zona satura* del terreno, come esposto nei paragrafi precedenti. Il trattamento SAT, a causa dei delicati equilibri che sottintendono la completa depurazione dell'acqua trattata, viene normalmente condotto quale *integrazione* di processi maggiormente adatti allo scopo precipuo.

#### 2.2.12.8. Impiego dell'energia nei processi di trattamento delle acque reflue

I trattamenti di depurazione convenzionali sono processi che richiedono molta energia, in quanto necessitano l'impiego di sistemi combinati e/o modulari dal pretrattamento fino all'eventuale affinamento. La domanda energetica aumenta con l'incremento del livello di qualità dell'acqua richiesto, e comprende allo stesso modo le apparecchiature di servizio come i sistemi di pompaggio e di aerazione. I soli processi di disinfezione possono gravare fino ad un terzo del totale dell'energia impiegata nei processi di trattamento delle acque. I nuovi approcci nel trattamento di disinfezione sono dunque rivolti – oltre al miglioramento della qualità dell'effluente – all'incremento dell'efficacia energetica: tra questi, si sottolineano la conduzione di trattamenti di *pastorizzazione*, disinfezione UV condotta per mezzo di diodi a emissione luminosa (LED) e di reattori elettrochimici capaci di combinare le tecniche di coagulazione/filtrazione e disinfezione. Come illustrato precedentemente, il trattamento di

pastorizzazione è stato sottoposto a una rigorosa sperimentazione, che ha dimostrato la possibilità per questa tecnica di lavorare quasi a costo zero in termini energetici attraverso il recupero del calore da altre fasi del trattamento. Anche per quanto riguarda le operazioni di aerazione sono in corso sperimentazioni che permettono l'abbattimento di oltre il 50% del consumo energetico attraverso il miglioramento degli impianti e delle tecnologie esistenti unito allo sviluppo di nuovi processi anaerobici (WRRF, 2012c). Pur rappresentando una piccola percentuale del budget, i miglioramenti prodotti nelle tecnologie di filtrazione nell'ambito delle modalità di controlavaggio e nella tipologia del mezzo filtrante hanno contribuito ad una riduzione della domanda energetica rispetto alla filtrazione convenzionale a sabbia (Parkson, 2011). I trattamenti naturali di recupero delle acque reflue possono ridurre drasticamente la domanda energetica in relazione alla qualità dell'acqua richiesta rispetto ai sistemi convenzionali di trattamento.

## 2.3. Impiego irriguo e zootecnico

L'irrigazione di coltivazioni destinate all'alimentazione umana o destinate alla produzione mangimistica e industriale con acqua reflua non trattata è ampiamente praticata in molte parti del mondo, ed è spesso accompagnata da conseguenze negative per la salute pubblica. Diversi fattori sono importanti nella produzione agricola, tra cui la gestione delle pratiche irrigue, la qualità dell'acqua impiegata in tal senso, la sensibilità e tolleranza della specie vegetale, e le caratteristiche del suolo. La combinazione di tali fattori può avere conseguenze non necessariamente negative: ad esempio, suoli ben drenati e correttamente irrigati con adeguati regimi di percolazione possono tollerare acque irrigue piuttosto saline, come l'acqua reflua depurata o salmastra. Generalmente, infatti, le acque reflue depurate tendono ad avere alte concentrazioni saline rispetto alle acque sotterranee di superficie, normalmente impiegate a scopi irrigui. La determinazione dell'idoneità di una data riserva d'acqua reflua depurata all'impiego irriguo è, quindi, *sito-specifica*, ed è pertanto raccomandata un'indagine agronomica specifica a monte dell'implementazione di un programma di riuso agricolo di acque reflue depurate.

### 2.3.1. Elementi in traccia e nutrienti

Il corretto sviluppo delle piante richiede 13 nutrienti minerali, generalmente aggiunti ai terreni che ne sono carenti attraverso l'impiego di fertilizzanti. I nutrienti minerali possono essere classificati in due categorie: i *macronutrienti* e i *micronutrienti*. I *macronutrienti* includono il calcio, il magnesio, l'azoto, il fosforo e il potassio, sono spesso depauperati dal suolo, in quanto necessari in notevole quantità per lo sviluppo e il sostentamento delle piante; mentre i *micronutrienti* includono Boro, Rame, Ferro, Cloruro, Manganese, Molibdeno e Zinco, sono elementi essenziali in piccole quantità, necessari alla crescita della pianta e a cui spesso si fa riferimento come *elementi in traccia*. Dei *macronutrienti*, l'azoto è quello maggiormente applicato, in quanto fondamentale nel rapido sviluppo della pianta, nell'aumento della produttività in termini di semi e frutti, e nell'incremento della qualità delle foglie e del foraggio. Allo stesso modo, il fosforo induce la rapida crescita delle piante ed è cruciale nella fioritura e nella crescita delle radici.

In Tabella 11 sono mostrati i valori di rimozione dal suolo di azoto e fosforo per varie specie coltivate. Il potassio viene assorbito dalle piante in quantità maggiore rispetto agli altri elementi (ad eccezione dell'azoto e, in alcuni casi, del calcio) e ha un ruolo centrale nella qualità dei

frutti e nella riduzione dell'incidenza di patologie a carico del vegetale. Tutti questi nutrienti sono presenti nelle acque reflue depurate, rendendone un valore aggiunto il loro impiego in agricoltura, pur non essendo tale impiego sostitutivo alla concimazione.

**Tabella 11. Valori di rimozione dal suolo di azoto e fosforo per varie specie coltivate**

Alimento	Umidità (%)	Rimozione media		Alimento	Umidità (%)	Rimozione media	
		Azoto (kg/t FW)	Fosforo (kg/t FW)			Azoto (kg/t FW)	Fosforo (kg/t FW)
<b>Frutta</b>				<b>Verdura</b>			
Mele	84	0,32	0,08	Carciofi	84	4,3	0,77
Albicocche	83	2,3	0,32	Asparagi	94	2,2	0,41
More	84	1,9	0,22	Fagioli	91	3,8	0,39
Mirtilli	85	1,1	0,13	Barbabietola	91	2	0,3
Melone	87	1,9	0,59	Broccoli	90	5,4	0,82
Ciliegie	80	1,5	0,21	Cavoli	92	3,4	0,6
Agrumi		2,9	0,4	Carote	89	1,6	0,4
Fico	83	2,2	0,28	Cavolfiori	91	3,1	0,59
Uva spina	87	1,3	0,35	Sedano	95	1,3	0,29
Uva da tavola	~80	1,3	0,27	Cicoria	80	2,2	0,61
Uva da vino			0,26	Erba cipollina	90	2,4	0,51
Pompelmo	89	1,1	0,21	Melanzana	93	1,8	0,25
Kiwi	~84	1,5	0,21	Finocchio	94	1,5	0,26
Limone e lime	87	1,9	0,15	Aglio	61	8,2	1,7
Mandarino		1,6	0,16	Cetriolo	93	2,2	0,38
Gelso	89	3,5	0,38	Lattuga	96	1,9	0,37
Nettarina	86	1,4	0,22	Funghi	91	6	0,8
Arancia	82	1,3	0,18	Cipolla	89	1,9	0,42
Pesca	86	1,2	0,2	Prezzemolo	83	5,8	0,7
Pera	85	0,24	0,03	Piselli	75	11,2	1,33
Cachi		1	0,22	Peperoni	74	5,9	0,78
Ananas		0,78	0,07	Patate	76	2,4	0,53
Prugna	36	1,5	0,19	Zucca	90	2,1	0,56
Lampone	84	1,8	0,29	Ravanello	93	3,5	0,31
Drupacee		12	0,12	Rabarbaro	95	1,1	0,17
Fragola	91	19	0,26	Bieta	93	2,9	0,42
Melone	94	1,5	0,25	Spinaci	93	3,2	0,3
<b>Cereali</b>				<b>Leguminose</b>			
Orzo	11		2,7	Pomodori	94	1,6	0,33
Segale	11	14	3,4	Rape	93	1,9	0,5
Mais	10	13	2,3	Zucchine	94	2,9	0,28
Miglio	11	20	3,3				
Avena	11	16	2,7				
Riso	14	10,3	2,4				
Grano	11		2,5				

FW *fresh weight*, peso fresco

### 2.3.2. Considerazioni operative

Il fabbisogno di acque reflue depurate da destinare alle pratiche irrigue non può prescindere dal considerare le variabilità climatiche stagionali e la *pluviometria* della superficie coltivata. La compatibilità delle operazioni agricole con la qualità dell'acqua di riuso impiegata deve essere garantita da studi *sito-specifici* in grado di determinare ogni possibile criticità associata: a titolo esemplificativo, l'impiego di acqua reflua depurata secondo gli standard di trattamento

secondario non è idoneo per sistemi d'irrigazione a goccia, in quanto i solidi sospesi possono facilmente intasare le linee. Poiché la qualità delle acque reflue depurate è direttamente legata al tipo di coltivazione oggetto dell'attività irrigua, il controllo delle condizioni operative richiede un'opportuna prassi, da implementare a livello normativo qualora si ravvisasse la necessità. Allo stesso modo, è sconsigliato l'uso di acqua reflua depurata secondo gli standard di trattamento secondario nelle coltivazioni il cui sistema di irrigazione provochi la formazione di *aerosol*, in particolare nelle zone adiacenti ai confini di proprietà. Affinché il programma di riuso delle acque reflue abbia successo, è necessaria una regolare comunicazione di dati tra l'utente finale e il fornitore dell'acqua di riuso.

### **2.3.3. Irrigazione delle coltivazioni destinate alla produzione alimentare**

La cronica carenza idrica di alcune regioni del mondo è causa dell'uso improprio delle acque reflue grezze, impiegate direttamente in agricoltura o miscelate con acque superficiali, spesso con gravi ripercussioni sanitarie a carico del consumatore finale. Al fine di minimizzare l'impatto di questo tipo di pratica, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (*World Health Organization*, WHO) ha redatto delle linee guida riguardanti procedure specifiche per l'impiego delle acque reflue in agricoltura (WHO, 2006). Tali procedure intendono ridurre al minimo i rischi derivanti dalla contaminazione microbiologica delle coltivazioni, in particolare per quelle destinate alla produzione di alimenti per il consumo crudo (frutta e alcune verdure); descrivendo i processi di trattamento, gli standard di qualità dell'acqua e le attività di monitoraggio necessarie a garantire la sicurezza nel riuso delle acque reflue. È stato dimostrato come adeguati processi di trattamento insieme ad una corretta pratica tecnica e agronomica permettano il riuso di acque reflue depurate in ambito irriguo in piena sicurezza, anche a lungo termine (Sheikh *et al.*, 1990; 1999). Nella Sicilia orientale, è stato dimostrato come le acque reflue depurate attraverso *aree umide artificiali* possono essere impiegate nella produzione alimentare dei Paesi del Mediterraneo e in altre regioni semi-aride cronicamente affette da carenza idrica (Cirelli *et al.*, 2012). È stata inoltre osservata una resa migliore della produzione (di circa il 20%) con l'impiego di acque reflue depurate in confronto a colture di controllo irrigate con acque superficiali.

### **2.3.4. Irrigazione di coltivazioni di alimenti destinati alla trasformazione e di coltivazioni non alimentari**

L'irrigazione di coltivazioni non alimentari (quali sementi, piante ad uso industriale, alimenti destinati alla trasformazione, foraggio, legnose) con acqua reflua depurata pone decisamente meno problematiche da gestire, oltre ad essere maggiormente accettata dalla comunità agricola. Molti Paesi hanno adottato, o mutuato attraverso propri *iter* normativi, le linee guida della WHO al fine di raggiungere un ragionevole livello di sicurezza nell'esposizione della popolazione, del consumatore e dei lavoratori. Nel novero delle molteplici destinazioni d'uso appartenenti a questa categoria di attività industriali, si sottolinea l'importanza del settore relativo alla produzione foraggera e mangimistica, in quanto alla base della filiera zootecnica.

#### **2.3.4.1. Pascoli e foraggere**

La produzione di foraggio unita al mantenimento di erbai e pascoli è di fondamentale importanza all'interno del comparto zootecnico.

Relativamente alla *foraggicoltura*, le operazioni di *trasformazione* di tali prodotti agricoli a seguito della loro raccolta rappresentano una prassi fondamentale e consolidata nel tempo,

insostituibili nella loro funzione di conservazione del valore nutritivo e dello sviluppo di una maggiore appetibilità da parte degli animali allevati.

A seconda delle caratteristiche biochimiche e morfologiche delle piante di origine, la trasformazione in foraggio può essere condotta generalmente secondo due tecniche: la *fienagione* e l'*insilamento*.

Con il termine *fienagione* si fa riferimento alle pratiche di coltura di specie vegetali di adeguata composizione e facilmente essiccabili, in modo tale da poter conservare intatte le proprietà nutritive. Le specie maggiormente coltivate per queste finalità sono il *trifoglio*, la *loiessa* e i prati di *leguminose* e *graminacee*: una volta raggiunto il giusto grado di maturazione, allo sfalcio del raccolto segue l'essiccazione, che può avvenire o in campo o in fienili a seconda della tecnica agronomica più adatta al territorio. Maggiormente complessa è invece la tecnica dell'*insilamento* (riguardante la maggior parte degli erbai ad eccezione dei precedenti) perseguita accatastando il foraggio falciato in appositi fabbricati (*silos*) e provocandone la fermentazione in ambiente anaerobico. I batteri lattici e acetici presenti nel cumulo causano l'abbassamento del pH producendo notevoli quantità rispettivamente di *acido acetico* e *acido lattico*, alterando le caratteristiche chimico-fisiche e organolettiche dell'insilato e prolungandone la conservazione. La contaminazione microbica del foraggio coinvolge entrambe le tecniche agronomiche, ed è in genere causata dalla deposizione di particolato proveniente dal terreno sulla superficie della pianta. La mancanza di trattamento termico appropriato, così come di un'opportuna pratica di disinfezione, non assicura la corretta igiene del prodotto agricolo: le tecniche di trasformazione del foraggio non intervengono infatti nella disinfezione del prodotto finale. Gli eventuali patogeni presenti non subiscono alcun effetto avverso, oltre al normale *die-off* indotto dall'eccessiva riproduzione e l'*inattivazione* causata dall'alterazione delle condizioni ambientali in conseguenza dei processi di trasformazione industriale.

Le pratiche di *fienagione*, di per sé, o preliminari all'*insilamento*, comportano una riduzione del contenuto idrico del falciato dall'85 al 15%, condizione per la quale si manifesta un effetto *batteriostatico*. Anche l'*insilamento* non interviene nella disinfezione del foraggio, nonostante la ricca produzione in acido acetico e lattico, in quanto il valore di pH del prodotto finale non scende al di sotto di 4, comunque sufficiente all'*inattivazione* della maggior parte dei microorganismi presenti nell'insilato. Tale *inattivazione* è tuttavia una condizione temporanea: i microorganismi indesiderati – anche patogeni – presenti all'interno dell'insilato vengono ingeriti dagli animali da reddito, e in parte escreti (l'impiego del letame prodotto nelle stalle per la concimazione del foraggio prodotto *in loco*, e comunque impiegato nell'alimentazione del bestiame della medesima azienda agricola, è una delle cause principali del ricircolo di contaminanti e dell'aumento della presenza di alcune specie microbiche nei terreni e nei foraggi).

Una criticità piuttosto diffusa e ascrivibile a quanto appena esposto è la presenza di *clostridi* nel fieno e nell'insilato, e dell'impiego di questi per l'alimentazione delle *lattifere* nelle aziende casearie: la presenza di *Clostridium tyrobutyricum* causa il *gonfiore tardivo* nei formaggi stagionati, effetto avverso che ha come conseguenza il peggioramento delle qualità organolettiche del prodotto, e quindi il suo deprezzamento (Lijn *et al.*, 1995). Alla luce di quanto esposto, la qualità dell'acqua destinata all'irrigazione delle colture foraggere si configura quale requisito fondamentale nell'ambito della corretta igiene dei prodotti animali e dei loro derivati: le acque impiegabili a tal fine non dovranno quindi causare contaminazione nelle piante coinvolte, e la relativa qualità dovrà essere valutata in base alla tipologia di conduzione della pratica irrigua, dal sistema d'irrigazione alle operazioni di sfalcio e di movimentazione del foraggio. Per quanto riguarda l'irrigazione di pascoli, nella valutazione del rischio (soprattutto microbiologico) è necessario considerare non solo l'esposizione occupazionale degli operatori, ma anche la contaminazione degli animali da reddito e i possibili casi di contaminazione

indiretta dei prodotti da essi derivati (es. contaminazione causata da deposito di acqua infetta sulla mammella della vacca, in seguito trasmessa al latte crudo o ingestione delle spore di patogeni poi rinvenibili nei prodotti carnei).

### **2.3.5. Qualità dell'acqua destinata all'attività zootecnica**

Il contributo dell'acqua alle attività zootecniche è decisivo sia in termini quantitativi che qualitativi. In particolare la necessità di approvvigionamenti idrici crescenti in relazione alla diversificazione e stratificazione nel territorio degli allevamenti da reddito risulta essere una criticità di particolare rilievo sotto il profilo della economicità, dell'impatto ambientale e delle potenziali ricadute in termini della sicurezza della produzioni.

I molteplici usi dell'acqua negli allevamenti che possono essere riassunti in due ambiti fondamentali: acque destinate non direttamente all'animale e acque destinate direttamente all'animale (acqua di abbeverata), rendono difficile quantificare le esigenze medie idriche per gli allevamenti, considerando anche le varietà di specie, le diverse modalità di produzione, i contesti climatici. Non possono inoltre essere trascurati i consumi idrici riconducibili all'industria mangimistica e foraggera.

L'irrigazione dei pascoli e delle superfici agricole destinate alla produzione di mangimi sono attività indirettamente correlate all'allevamento del bestiame, e consistono in un onere piuttosto gravoso relativamente al prelievo idrico. Per quanto riguarda gli aspetti qualitativi delle acque impiegate per l'irrigazione dei pascoli e delle superfici a produzione foraggera, si rimanda al paragrafo 2.3.4.1.

La qualità dell'acqua di abbeverata, che è di particolare importanza dal punto di vista della sicurezza delle produzioni alimentari, è un fattore decisivo nel modulare sia il rispetto delle condizioni di benessere animale che le caratteristiche positive in termini di requisiti nutrizionali e igienico-sanitari delle carni derivate. È necessario infine sottolineare che una riduzione dell'approvvigionamento idrico è collegata allo stato di salute dell'animale direttamente nel caso dell'acqua di abbeverata, indirettamente nel caso degli altri impieghi.

#### **2.3.5.1. Impiego di acque reflue depurate per l'abbeveraggio del bestiame**

Le caratteristiche qualitative delle acque destinate all'abbeverata del bestiame non sono oggetto di specifica normativa.

L'acqua destinata al consumo umano (DL.vo 31/2001) è idonea all'impiego zootecnico, in quanto di qualità adeguata, o anche superiore rispetto ai requisiti necessari allo scopo.

In effetti, nel contesto della produzione primaria incluso il comparto zootecnico, si rimanda al concetto di *acqua pulita* così come definita nel Regolamento (CE) 852/2004, che indica sotto tale definizione qualsiasi acqua “che non contenga microrganismi e/o sostanze nocive in quantità tali da incidere direttamente o indirettamente sulla qualità sanitaria degli alimenti”, facendo riferimento in questa circostanza alle acque dolci.

In tale contesto, l'impiego di acque non idonee sia sotto il profilo microbiologico che chimico-fisico può comportare problemi sanitari nel bestiame, con conseguenti ricadute in termini di produttività, e problemi connessi alle strutture quali danneggiamenti e/o riduzioni generali di efficienza degli impianti tecnici.

A titolo informativo vengono riportati in Tabella 12 i requisiti di qualità suggeriti per alcuni parametri normalmente rilevati nelle acque superficiali e sotterranee, non necessariamente inquadrabili come i limiti di tolleranza degli animali esposti (FAO, 1985; Raisberg *et al.*, 2011).

**Tabella 12. Requisiti di qualità per le acque di abbeverata (valori indicativi)**

Costituente (simbolo)	Concentrazione (mg/L)
Alluminio (Al)	5,0
Arsenico (As)	0,2
Berillio (Be) <sup>1</sup>	0,1
Boro (B)	5,0
Cadmio (Cd)	0,05
Cromo (Cr)	1,0
Cobalto (Co)	1,0
Rame (Cu)	0,5
Fluoro (F)	2,0
Ferro (Fe)	-
Piombo (Pb) <sup>2</sup>	0,1
Manganese (Mn) <sup>3</sup>	0,05
Mercurio (Hg)	0,01
Molibdeno (Mo)	0,3
Nitrato + Nitrito (NO <sub>3</sub> -N + NO <sub>2</sub> -N)	100
Nitrito (NO <sub>2</sub> -N)	10,0
Selenio (Se)	0,05
Sodio (Na) <sup>4</sup>	1000
Zolfo (come SO <sub>4</sub> ) <sup>5</sup>	1000
Vanadio (V)	0,10
Zinco (Zn)	24,0

(1) dati insufficienti per il bestiame; viene riportato il valore previsto per gli organismi acquatici

(2) il piombo tende all'accumulo, iniziando a causare problemi ad un valore soglia di 0,05 mg/L

(3) dati insufficienti per il bestiame; viene riportato il valore per le acque potabili

(4) l'esposizione a breve termine (giorni/settimane) può arrivare fino a 4000 mg/L, valutando i normali livelli di sodio negli alimenti

(5) l'esposizione a breve termine (giorni/settimane) può arrivare fino a 1,8 mg/L, valutando i normali livelli di SO<sub>4</sub> negli alimenti

#### 2.3.5.1.1. Durezza e salinità

La *durezza*, proprietà delle acque legata al contenuto in sali, in particolare carbonati, bicarbonati e solfati di calcio e magnesio è normalmente espressa in gradi francesi (°F) e tedeschi (°D). Tale parametro può influenzare le modalità di assorbimento di principi nutritivi e anche sostanze attive quando i valori di durezza risultano particolarmente elevati.

La *salinità* oltre ad essere un parametro utile a valutare le condizioni di potabilità delle acque di abbeverata, può in caso di concentrazioni saline molto elevate, provocare effetti negativi negli organismi animali. Tale parametro viene normalmente espresso come milligrammi di residuo fisso per litro d'acqua dopo essiccamento a 180°C, e considerato equivalente al totale dei solidi disciolti (TDS).

#### 2.3.5.1.2. pH

Il pH delle acque di abbeverata non deve discostarsi da quello generalmente riscontrato nelle acque. Valori di pH (generalmente compresi tra 6-9) che non rispettino tale intervallo, possono determinare l'insorgenza di stati patologici e/o di alterazioni della normale fisiologia animale, come ad esempio turbe del metabolismo e della fertilità (Enne *et al.*, 2006).

#### 2.3.5.1.3. Qualità microbiologica

Il controllo microbiologico dell'acqua destinata all'impiego zootecnico è di fondamentale importanza nel garantire il controllo dei rischi igienici nel sistema produttivo dell'allevamento. L'acqua infatti, può essere un vettore in grado di veicolare agli animali agenti microbici responsabili dell'insorgenza di patologie e focolai epidemici. Gli indicatori di contaminazione biologica dell'acqua generalmente presi in considerazione sono i coliformi totali e fecali,

*Escherichia coli* e la carica batterica totale. Nella valutazione del rischio, delle acque impiegate devono essere presi in considerazione altri patogeni (es. *salmonelle*, *vibrioni*, ecc.) di particolare rilevanza sanitaria.

#### **2.3.5.1.4. Qualità dell'acqua di abbeverata e farmaci veterinari**

La qualità dell'acqua di *abbeverata* può influenzare l'esposizione del bestiame ai farmaci veterinari. I farmaci, infatti, vengono somministrati agli animali prevalentemente attraverso i mangimi e le acque di abbeverata. Pertanto valori di pH, durezza e salinità non idonee allo scopo rivestono particolare importanza nel garantire il corretto utilizzo dei principi attivi e contemporaneamente intervenire nella possibile presenza di residui nei prodotti destinati alla alimentazione umana. È necessario sottolineare che l'acqua di abbeverata è inclusa tra le matrici da sottoporre a controllo analitico nell'ambito del Piano Nazionale Alimentazione Animale (PNAA) e Piano Nazionale Residui (PNR) per valutare i corretti impieghi delle sostanze farmaceutiche ed eventuali usi illegali.

#### **2.3.6. Qualità delle acque destinate all'impiego in acquacoltura**

La pratica dell'*acquacoltura* è caratterizzata da una notevole variabilità circa il suo contributo al prelievo idrico totale delle attività di produzione primaria. La domanda idrica è infatti variabile in base soprattutto al tipo di conduzione, dagli impianti *intensivi*, che sono di gran lunga i maggiori consumatori della risorsa idrica (100-500 m<sup>3</sup> di acqua per kg di pesce prodotto) (MIPAAF, 2011), a quelli di carattere *estensivo* e *semiestensivo*. Tuttavia, i potenziali impatti di tali attività coinvolgono una serie di fenomeni avversi quali l'aumento della torbidità e della carica batterica, l'alterazione della composizione chimica delle acque e del pH, l'occorrenza di *eutrofizzazione* e di *blooms* algali, la riduzione dell'ossigeno disciolto e l'introduzione di specie alloctone sia *ittiche* che *bentoniche*, ecc. La particolare condizione associata all'attività di allevamento direttamente nella matrice acquosa è causa inoltre del diretto rilascio nelle acque di sostanze tossiche, dello sviluppo della resistenza agli antibiotici di alcuni ceppi batterici, dell'alterazione delle popolazioni ittiche autoctone o a causa di meccanismi di lotta biologica o provocati dall'introduzione indiretta di agenti patogeni alloctoni. Le caratteristiche chimico-fisiche delle acque impiegate in acquacoltura non possono dunque prescindere da un'adeguata valutazione del rischio, che dovrà necessariamente considerare la qualità dell'acqua in funzione del fabbisogno specifico delle specie ittiche allevate. In linea di principio, risultano idonee allo scopo le *acque dolci idonee alla vita dei pesci* (DL.vo 152/2006; art. 84 Sezione 2, Titolo II, Capo II; e relativi parametri di qualità presenti nella *Tabella 1b* dell'Allegato 2 parte III), tutte le acque compatibili all'impiego agricolo e in acquacoltura, secondo quanto previsto dal DL.vo 152/2006 (Titolo IV, art. 167, c.1), e tutte le acque superficiali e sotterranee in *buono stato chimico ed ecologico*, i cui standard di qualità ambientale possono essere presi a riferimento per la valutazione del rischio associato all'impiego di acque di riuso.

##### **2.3.6.1. Nota specifica riguardo alle attività di molluschicoltura**

Nel novero delle attività di acquacoltura merita particolare attenzione la *molluschicoltura*, soprattutto in relazione al settore dell'allevamento dei mitili e delle vongole, in quanto alimenti classificati ad alto rischio sanitario e piuttosto diffusi sul territorio nazionale. Queste attività concorrono infatti al 70% del totale delle pratiche di acquacoltura in Italia (dati 2006) (Cattaneo & Bernardi, 2010). L'attività vegetativa dei molluschi bivalvi è caratterizzata dalla filtrazione del materiale sospeso in acqua, operazione necessaria all'assorbimento dei nutrienti necessari

allo sviluppo del mollusco ma anche trasversalmente di sostanze indesiderate e del loro accumulo, oltre alla colonizzazione di microorganismi, tra cui potenzialmente quelli patogeni. L'alto rischio associato al consumo di queste specie ittiche è dovuto da una parte, all'intensa attività filtrante delle acque di coltura (in media, 2,5 L/ora) e di accumulo di sostanze di natura antropica, di tossine e microorganismi indesiderati, come ad esempio il virus dell'epatite A (HAV) e i virus Norwalk e Norwalk-like (i molluschi bivalve possono concentrare i virus di origine umana fino a 900 volte la loro concentrazione nelle acque); e dall'altra dal loro consumo intero: in mancanza di *eviscerazione*, infatti, si ha l'ingestione del totale dei tossici accumulati, ad esempio dei metalli pesanti, di biotossine marine e dei microorganismi accumulati nell'*epatopancreas*, la particolare ghiandola digestiva di questa classe di animali marini (Cattaneo & Bernardi, 2010).

La salubrità dell'alimento è quindi diretta conseguenza della qualità delle acque impiegate in tale contesto, configurandosi il controllo di tale matrice di fondamentale importanza nell'assicurazione della qualità del prodotto e, in generale, della sicurezza alimentare.

Pur essendo la molluschicoltura principalmente a carattere *estensivo*, la qualità delle acque impiegate in questo tipo di allevamento può inficiare la produzione sia negli impianti di depurazione dei molluschi allevati in *zone B e C* (Regolamento (CE) N. 854/2004) che nelle *vasche a terra* destinate all'allevamento delle vongole. Nell'allevamento di tali specie animali, è sempre possibile impiegare *acque destinate alla vita dei molluschi* come previsto dal DL.vo 152/2006 (art. 87 Sezione 2, Titolo II, Capo II; e relativi parametri di qualità presenti nella *Tabella 1c* dell'Allegato 2 parte III). Nella valutazione del rischio dell'impiego di acque destinate all'allevamento di molluschi in vasche a terra c'è tuttavia da ricordare che tali acque devono essere conformi ai criteri previsti nella classificazione delle *zone di raccolta* stabiliti nel Regolamento (CE) 854/2004 e basati sui livelli di *E. coli* osservati nei campioni; allo stesso modo, le acque impiegate nei processi di depurazione dei molluschi devono necessariamente corrispondere ad *acqua di mare pulita* (Regolamento (CE) 852/2004), potendo includere inoltre solo le acque di riuso – comunque *pulite* – di adeguata salinità. Le acque di depurazione dei molluschi devono infatti soddisfare una serie di requisiti critici per la ripresa dell'attività vegetativa dell'animale, che si manifesta con la filtrazione delle acque d'immersione. Tali parametri sono brevemente illustrati di seguito.

#### **2.3.6.1.1. Salinità**

In base alle caratteristiche proprie del mollusco, esistono intervalli di salinità adeguati alla ripresa dell'attività vegetativa. Tuttavia, la regola generale è che la salinità utilizzata per la depurazione sia almeno il 20% di quella della *zona di raccolta*, valore generalmente riscontrabile in acqua di mare prelevata dai siti costieri non influenzati da fonti d'acqua dolce, come foci di fiumi o scarichi di acque piovane.

#### **2.3.6.1.2. Temperatura**

Anche in questo caso, esistono intervalli di temperatura per la ripresa vegetativa propri per ogni specie. C'è da sottolineare, tuttavia, come le temperature ottimali dell'attività fisiologica dei molluschi non sempre corrispondono a quelle necessarie ad una buona rimozione dei contaminanti microbici.

#### **2.3.6.1.3. Ossigeno disciolto**

La quantità assoluta di ossigeno disciolto in acqua è funzione della temperatura. In generale, i sistemi ben progettati e funzionanti dovrebbero essere in grado di mantenere concentrazioni di ossigeno di almeno 5 mg/L per i mitili mentre concentrazioni maggiori sono spesso facilmente raggiunte per le altre specie. Il controllo della temperatura è in ogni caso critico: l'alterazione del valore di temperatura può compromettere l'efficacia del processo di depurazione, in quanto,

ad esempio, il raffreddamento dell'acqua può rallentare l'efficienza di rimozione microbica pur aumentando la quantità di ossigeno disciolto.

### 2.3.7. Esperienza mondiale nel riuso delle acque reflue depurate

Le acque reflue depurate vengono impiegate a livello globale per l'agricoltura, l'acquacoltura, l'industria, la produzione di acqua potabile, per l'impiego domestico non concernente il consumo umano, per l'irrigazione di parchi e giardini, per fini ricreativi e per la ricarica di acquiferi sotterranei. In Tabella 13 sono illustrati gli impieghi dell'acqua trattata (a livello *terziario*) rappresentativi solo di una porzione dell'attuale politica di riuso a livello mondiale.

**Tabella 13. Destinazioni d'uso mondiale delle acque reflue depurate a livello terziario**

Destinazione d'uso	% del totale
Irrigazione (impiego agricolo)	32,01
Irrigazione (impiego non agricolo)	20,01
Industriale	19,32
riuso urbano non potabile	8,25
Risanamento ambientale	8,04
Ricreazionale	6,39
riuso potabile indiretto	2,30
Ricarica degli acquiferi	2,10
Altro	1,50

L'impiego irriguo delle acque reflue depurate vanta una serie di studi su coltivazioni-pilota e di applicazioni reali dimostrate sicure a lungo termine in molte parti del mondo, così come mostrato dai seguenti casi considerati a titolo esemplificativo: in Australia, nello stato del Victoria, l'acqua reflua depurata è impiegata per l'irrigazione delle vigne, dei campi di pomodori, di patate ed di altri generi alimentari; a Cipro circa il 90% dell'acqua reflua depurata disponibile è impiegata nell'irrigazione degli agrumeti (limoni), degli oliveti e delle colture a foraggio. Città del Messico impiega circa 74.000 litri al giorno di acque reflua depurata per l'irrigazione di aree verdi, per la ricarica di laghi a fine ricreazionale e per l'agricoltura; mentre in Giordania prevale l'impiego irriguo di tali acque nelle coltivazioni foraggere, delle olive e delle palme da dattero.

### 3. QUADRO NORMATIVO

#### 3.1. Legislazione di riferimento per risorse idriche impiegate in produzione primaria

Le norme indirizzate alla sicurezza alimentare, con particolare riguardo alla produzione primaria<sup>4</sup>, incluso il comparto agricolo e zootecnico, rivolgono una specifica attenzione alla prevenzione della contaminazione delle acque utilizzate come fonte principale nell'irrigazione; a tal fine, nel contesto generale della legislazione alimentare (Allegato I, parte A, del Regolamento (CE) 852/2004), è previsto che gli "Operatori del Settore Alimentare"<sup>5</sup> (OSA) debbano, ove necessario, utilizzare "acqua pulita" o acqua potabile, tenendo conto delle rilevanti norme ambientali, intendendosi per "acqua pulita", acqua che non contiene microrganismi o sostanze nocive in quantità tali da incidere direttamente o indirettamente sulla qualità sanitaria degli alimenti. In Tabella 14 sono riportati i fondamentali atti normativi nazionali in materia di qualità delle acque.

**Tabella 14. Principali atti normativi nazionali, loro scopo e campo di applicazione**

Atto normativo	Campo di applicazione	Scopo
DL.vo 31/2001	Acque destinate al consumo umano	Protezione della salute umana dagli effetti negativi della contaminazione
DL.vo 152/2006	Acque superficiali, marine e sotterranee	Tutela delle acque dall'inquinamento e gestione delle risorse idriche
DL.vo 30/2009	Acque sotterranee	Prevenzione e controllo dell'inquinamento e del depauperamento delle acque sotterranee
DM 185/2003	Acque di riuso	Prevenzione e controllo dell'inquinamento e incentivazione del risparmio idrico

La Direttiva Quadro Europea 2000/60/CE e il suo recepimento italiano (DL.vo 152/2006 e s.m.i.), ha l'obiettivo principale di prevenire e ridurre l'inquinamento dei corpi idrici superficiali e sotterranei attraverso una pianificazione basata sul concetto di bacino idrografico.

Nel 2012, sulla base dello studio del primo ciclo dei piani di gestione, la commissione europea ha pubblicato il Piano per la salvaguardia delle risorse idriche europee (Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, 2012), esso prevede un aumento della carenza idrica e dello stress idrico, che secondo le previsioni colpirà nel 2030 circa la metà dei bacini fluviali dell'UE; tale scenario, derivante da diversi fattori tra i quali anche i cambiamenti climatici, risulta ancora più preoccupante tenendo conto della crescente necessità di uso di acqua per scopi agricoli, alimentari e industriali.

<sup>4</sup> Sono definiti "prodotti primari" i prodotti della produzione primaria compresi i prodotti della terra, dell'allevamento, della caccia e della pesca (Regolamento (CE) 852/2004).

<sup>5</sup> È definito "operatore del settore alimentare" (OSA) la persona fisica o giuridica responsabile di garantire il rispetto delle disposizioni della legislazione alimentare nell'impresa alimentare posta sotto il suo controllo, "impresa alimentare" ogni soggetto pubblico o privato, con o senza fini di lucro, che svolge una qualsiasi delle attività connesse ad una delle fasi di produzione, trasformazione e distribuzione degli alimenti.

In ambito europeo è emersa quindi l'esigenza di affrontare il tema del riutilizzo delle acque reflue in quanto esiste una mancanza di standard comuni in materia ambientale e sanitaria. La recente comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo (Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, 2015) prevede l'impegno da parte della stessa *ad intraprendere una serie di azioni per facilitare il riutilizzo dell'acqua, tra cui una proposta legislativa sui requisiti minimi relativi alle acque riutilizzate, ad esempio per l'irrigazione e il ravvenamento delle acque sotterranee* entro il 2017. Al fine di rendere più efficiente l'utilizzo delle acque è opportuno che le autorità responsabili dei bacini idrici elaborino degli obiettivi di efficienza idrica per i bacini che sono già sotto stress idrico o rischiano di esserlo. Questi obiettivi dovrebbero riguardare tutti i principali settori di utilizzo delle acque (industria, produzione energetica, agricoltura, ecc.) e dovrebbero essere strettamente correlati all'obiettivo del buono stato delle acque. La Commissione Europea ha anche lanciato una consultazione pubblica europea nel 2014 che ha riguardato una serie possibili opzioni per quanto riguarda la proposta normativa e che sarà descritta nel capitolo successivo.

In Italia, il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, relativamente alla salvaguardia delle risorse idriche da un punto di vista quantitativo e qualitativo, ha emanato nel 2003 una normativa sul riutilizzo delle acque reflue di origine urbana o industriale, il DM 185/2003 con i seguenti obiettivi: risparmio idrico attraverso la produzione di risorse idriche non convenzionali (acque reflue), limitazione del prelievo di acque superficiali e sotterranee, riduzione dell'impatto degli scarichi nei corpi idrici superficiali al fine di proteggere l'ambiente. I requisiti di qualità chimico-fisici e microbiologici previsti sono valori medi su base annua o sulla base della singola campagna irrigua nel caso di impiego agricolo. La norma prevede che i valori siano rispettati all'uscita dell'impianto di recupero per poter consentire il riutilizzo delle acque anche per fini irrigui.

A più di dieci anni dall'entrata in vigore del decreto, pur riconoscendo la notevole portata innovativa della norma, può osservarsi che la definizione di valori limite indifferenziati, piuttosto che derivati da valutazioni di rischio specificamente correlate alle modalità di utilizzo e alla destinazione d'uso della risorsa, risulta in molti casi in limiti notevolmente restrittivi e, di conseguenza, richiede oneri di trattamenti delle acque poco competitivi rispetto ai costi di approvvigionamento di acque con modalità convenzionale. La trasposizione di standard di qualità ambientale per acque di riuso a destinazione agricola è soggetta, inoltre, a diverse criticità tra cui aspetti legati ad esempio al fenomeno del bioaccumulo e tossicità delle specie vegetali. Anche la definizione di standard per acque di (ri)utilizzo per fini irrigui o zootecnici a partire da valori limiti stabiliti per le acque sotterranee e le acque destinate al consumo umano, rispettivamente normate dalla Direttiva Europea 2006/118/CE, recepita con il DL.vo 30/2009, e dal DL.vo 31/2001 e successive modifiche, appare un processo non del tutto congruo, in quanto gli standard di qualità e i valori soglia sono basati essenzialmente su criteri di protezione della salute umana relativamente agli utilizzi delle acque in ambito domestico o in produzione alimentare. In questo contesto deve anche sottolinearsi una criticità del DL.vo 152/2006 e s.m.i., che definisce valori limiti di emissione in acque superficiali e in fognatura determinati non sulla base di criteri tossicologici, ma sulla base delle migliori tecnologie disponibili nel campo della depurazione presenti negli anni '70. Nello scenario normativo sopra accennato risultano quindi differenti valori limite per le medesime sostanze chimiche in base alle diverse tipologie e destinazioni d'uso delle acque. In assenza di una normativa adeguatamente armonizzata sussiste quindi una certa complessità per gli operatori locali nell'identificazione di valori di riferimento adeguati per gli impieghi agricoli e per alcuni usi delle acque nell'industria alimentare. Una valutazione critica in tal senso è stata di recente espressa dalla UE nel documento "Updated

report on wastewater reuse in the European Union”<sup>6</sup> dell’aprile 2013 in cui viene ravvisata, tra l’altro, una criticità della norma nel non considerare l’influenza sulla contaminazione delle modalità di irrigazione e gli utilizzi del prodotto primario, aspetti determinanti per stabilire standard di sicurezza sulle acque a destinazione irrigua. Ad integrazione degli atti legislativi sopra menzionati, è utile richiamare la norma sulla qualità delle acque destinate al consumo umano, in particolare la Direttiva 98/83/CE recepita con DL.vo 31/2001 e s.m.i., in quanto espressamente richiamata per gli approvvigionamenti idrici della produzione alimentare dal Regolamento (CE) 178/2002 e dal Regolamento (CE) 852/2002.

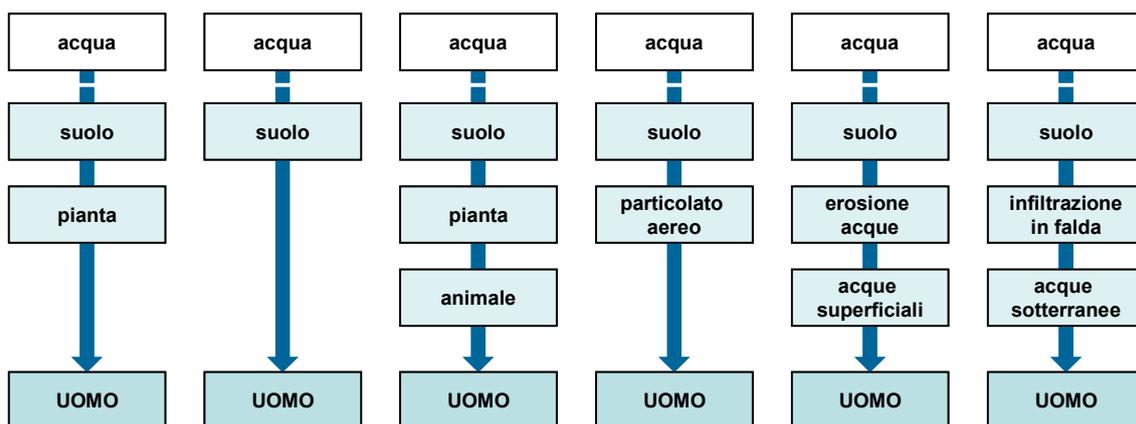
### 3.2. Norme e linee guida applicabili a risorse idriche impiegate in produzione primaria

A livello internazionale la WHO ha emanato delle linee guida e criteri per l’utilizzo in agricoltura e acquacoltura di acque reflue di diversa composizione (WHO, 2006), al fine di proteggere la salute degli agricoltori e dei consumatori. A partire dal 2006, la WHO, il Programma per l’Ambiente delle Nazioni Unite (*United Nations Environment Programme*, UNEP) e l’Organizzazione per l’alimentazione e l’agricoltura (*Food and Agriculture Organization*, FAO) hanno aggiornato pregresse linee guida e norme di qualità per l’utilizzo di acque in agricoltura e acquacoltura anche a partire da uso di acque reflue. L’approccio nella valutazione dei rischi della WHO 2006 ha considerato le possibili ricadute per la salute umana correlata all’utilizzo delle acque attraverso il DALY (*Disability-Adjusted Life-Year*), indicatore che combina l’impatto complessivo sulla salute generale di malattie, disabilità e mortalità. Il DALY è il risultato della somma degli anni di vita persi in seguito a mortalità prematura (calcolati come il numero di morti ad ogni età moltiplicato per la speranza di vita media per ciascuna età) con gli anni vissuti in disabilità o malattia (calcolati come il numero di casi di disabilità/malattia in un periodo moltiplicato per la relativa durata media e corretto per un fattore di disabilità/malattia). Il rischio considerato ai fini della definizione di *health-based targets* è  $\leq 10^{-6}$  perdita di DALY per persona per anno; questo, in condizioni di approvvigionamenti con acque di caratteristiche vicine alle acque reflue, può essere ottenuto mediante una riduzione di presenza di patogeni almeno pari a 6-7 unità log, grazie anche alla combinazione di più misure quali trattamenti delle acque, mantenimento di un adeguato intervallo temporale tra ultima irrigazione e consumo dei prodotti, adeguate modalità di

<sup>6</sup> Si ritiene utile riportare integralmente uno stralcio della Sezione 2. 4 del documento *Current water reuse in the European Union countries* che riferisce: “The proposed standards seemed to follow a quite restrictive approach, especially for some chemical compounds: in many cases the quality standards for reclaimed wastewater were the same as drinking water. This approach surely led to some difficulties in promoting wastewater reuse, when the compliance with some very strict standards asked for advanced treatments, with all the related consequences on the economics of the reclamation. Another negative aspect was the overabundance of parameters taken into account and their related monitoring protocols. In fact the number of parameters to be monitored exceeds 50 items and the sampling frequency can be very high, depending on the regional provisions. It must be also considered that no regulatory distinction was established among various crops to be irrigated with reclaimed wastewater (restricted, unrestricted irrigation) and no attention was paid to the influence of different irrigation options (i.e.: subsurface drip irrigation, versus spray irrigation) in reducing sanitary risks. In summary: in a set of 54 control parameters - which is probably too large to assure an effective enforcement and monitoring - 20% of them ask for the same quality of drinking water; 37% of them are not even considered for drinking water, and the indication of some other parameters (for instance biocides and pesticides) was difficult to be explained in an agricultural environment”.

irrigazione (es. a goccia), lavaggio e/o disinfezione dei prodotti eduli, eliminazione della buccia di vegetali o cottura degli stessi. Un livello di presenza di elminti fino a  $\leq 1$  uova/L è applicabile per l'irrigazione delle colture ortive, con minori rischi associabili a prodotti di coltivazioni arboree. Il monitoraggio delle acque dovrebbe essere condotto al punto di uso o del punto di scarico degli effluenti dall'impianto di trattamento, con frequenza 1-2/mese e 1/1-2 mesi, rispettivamente per *E.coli* ed elminti, raccomandando anche un controllo sugli alimenti vegetali.

Il DL.vo 152 del 3 aprile 2006 e s.m.i. stabilisce che l'autorità competente, in sede di autorizzazione allo scarico dell'impianto per il trattamento di acque reflue urbane, dovrà fissare il limite più opportuno in relazione alla situazione ambientale e igienico-sanitaria del corpo idrico recettore e agli usi esistenti, e consiglia un limite per il parametro *Escherichia coli* non superiore ai 5000 UFC/100 mL. Il DM 185 del 12 giugno 2003 fissa per le acque reflue limiti microbiologici per *Salmonella* spp. ed *Escherichia coli* con valori puntuali rispettivamente di assenza/100 mL, e 100 UFC/100 mL o 200 UFC/100 mL a seconda del tipo di acque reflue. Infine il Regolamento (CE) 852/2004 stabilisce che le acque destinate ad uso diverso dal consumo umano, devono essere "pulite" ma non fissa alcun limite, stabilendo che le acque pulite non devono contenere microrganismi in quantità tali da incidere direttamente o indirettamente sulla qualità sanitaria degli alimenti. Per quanto riguarda la contaminazione chimica, le linee guida WHO pur considerando diverse vie di trasferimento di inquinanti dall'acqua all'uomo (Figura 8), ricorrono ad un modello semplificato, ritenuto la principale via di esposizione, che considera il trasferimento dell'inquinante da acqua ad uomo per via del consumo dell'alimento irrigato.



**Figura 8. Alcune possibili vie di esposizione umana a contaminanti chimici veicolati attraverso l'acqua di irrigazione**

Su tali basi, considerando un consumo di vari alimenti vegetali (cereali a granella, colture ortive, tuberi, frutta) pari al 75% del consumo alimentare di un uomo adulto, e configurando uno scenario di esposizione di un uomo adulto (60 kg di peso), che consumi alimenti di origine vegetali prodotti unicamente mediante irrigazione con l'acqua contaminata, che apporti un totale di 50% della dose giornaliera ammissibile (ADI, *Acceptable Daily Intake*) (essendo il complementare 50% dovuto ad esposizione attraverso acque potabile, ambiente, ecc.), la WHO ha definito dei valori limite per un set di contaminanti chimici inorganici e organici.

È importante sottolineare che, a differenza dell'approccio seguito per i pericoli di natura microbiologica nelle acque, i limiti per i contaminanti chimici sono stati definiti in termini di concentrazione dell'inquinante nel terreno, anche in considerazione del fatto che l'assorbimento di inquinanti dalla pianta avviene a partire dalla soluzione circolante esistente nel terreno, e che

il terreno funziona in genere come matrice di accumulo degli inquinanti veicolati dall'acqua irrigua, in particolar modo per gli elementi di natura inorganica.

È anche da considerare che le linee guida WHO, pur fornendo importanti indicazioni sui limiti di elementi chimici tossici in acque di irrigazione cui si correla inibizione di crescita e sviluppo di diversi vegetali, non si indirizzano a regolare aspetti di natura produttiva e ambientale. Questi ultimi aspetti, unitamente alla valutazione del rischio per la salute umana, sono d'altra parte ampiamente sviluppati nelle linee guida Australiane (EPHC *et al.*, 2006). Tali linee guida, unitamente alle più recenti linee guida della *Environmental Protection Agency* (EPA) statunitense (EPA, 2012) sono il riferimento raccomandato dalla Commissione Europea nel recente "Documento di riferimento per la consultazione pubblica sulle opzioni strategiche per ottimizzare il riutilizzo delle acque nell'UE" (Commissione Europea, 2014) per la definizione di un approccio globale basato sul rischio che, nell'indirizzo indicato dalla UE, comprende piani per la sua gestione, norme per il trattamento, controlli del processo di trattamento, controlli delle applicazioni e criteri di riferimento per la qualità dell'acqua.

### 3.2.1. Commissione Europea e indicazioni sul riuso delle acque

La DG-ENV (*Directorate-General for Environment*) presso la Commissione europea ha recentemente commissionato ad una società di consulenza, la TYPSA, la preparazione di relazioni sul riutilizzo delle acque reflue nell'Unione europea al fine di ottenere una panoramica delle pratiche attualmente seguite in ogni Stato membro in tale ambito (TYPSA, 2013). Il *Joint Research Centre* (JRC) della Commissione Europea, ha redatto un consistente rapporto (JRC, 2014) per implementare il riutilizzo delle acque reflue trattate in Europa, analizzando i cambiamenti tecnici, ambientali, sanitari e le sfide socio-economiche associati a tale riutilizzo. Rilevando l'assenza di linee guida ufficiali a livello europeo per affrontare il riutilizzo delle acque reflue trattate, nel rapporto *Water reuse in Europe* vengono dapprima confrontate le normative nazionali e internazionali attualmente in essere, e poi considerato l'approccio alla gestione delle acque reflue basato sulla valutazione dei rischi e una panoramica delle esigenze e degli ostacoli all'innovazione tecnologica e normativa.

Dal rapporto emerge chiaramente che, sebbene il riutilizzo delle acque reflue sia una pratica generalmente accettata in diversi Paesi dell'UE, che si trovano a dover affrontare il problema della carenza idrica, quali ad esempio Cipro, Francia, Grecia, Italia, Malta, Portogallo, Spagna, solo una piccola percentuale dell'acqua riciclata viene attualmente riutilizzata. Gli ostacoli all'implementazione di tale pratica sono di vario genere sia di ordine tecnico che economico. I principali ostacoli individuati sono principalmente i seguenti:

- mancanza di norme ambientali e sanitarie comuni nell'UE in materia di riutilizzo delle acque;
- potenziali ostacoli alla libera circolazione di prodotti agricoli irrigati con acqua riutilizzata;
- inadeguatezza dei modelli tariffari e commerciali dell'acqua;
- scarsa consapevolezza dei benefici derivanti dal riutilizzo delle acque da parte dei soggetti interessati;
- mancanza di accettazione da parte dei cittadini;
- ostacoli tecnici e incertezza a livello scientifico.

La DG ENV ha inoltre evidenziato come le disparità tra le normative nazionali e tra le procedure applicate nell'ambito dell'impiego irriguo delle acque di riuso possano generare differenti costi di produzione degli alimenti. Allo stesso modo, l'impiego di acque di riuso di differente qualità potrebbe riflettersi nella qualità degli alimenti prodotti, generando diffidenza nei consumatori e nel mercato degli Stati Membri (DG-ENV, 2016). La Commissione europea ha parallelamente avviato una consultazione pubblica su una serie di possibili misure a livello dell'UE volte a incoraggiare il riutilizzo delle acque depurate, con il fine ultimo di conoscere

cosa pensano i cittadini, i soggetti interessati, le imprese, le organizzazioni non governative (ONG) e le pubbliche autorità delle potenzialità del riutilizzo e degli ostacoli che vi si frappongono, e con quale tipo di misure, normative e non, l'UE potrebbe contribuire efficacemente a superare queste preoccupazioni e a incrementare il ricorso al riutilizzo sicuro delle acque. La consultazione si è conclusa il 7 novembre 2014. I risultati contribuiranno a realizzare una valutazione di impatto concernente tutti gli aspetti principali del riutilizzo delle acque, compresi gli usi agricoli, urbani, industriali e ricreativi.

La DG-ENV sta attualmente lavorando su un piano d'azione per promuovere il riutilizzo delle acque a livello di Unione europea. Il piano d'azione dovrebbe includere 5 passaggi principali. Stabilire i requisiti di qualità delle acque, per i quali il JRC, coordinando un gruppo tecnico di esperti dei diversi Stati membri, deve formulare una proposta è la prima azione. Questo potrebbe aprire la strada a un successivo strumento legislativo. L'irrigazione agricola e la ricarica degli acquiferi sono state identificate come aree prioritarie. La proposta formulata dal JRC potrebbe prevedere norme per la qualità delle acque il riutilizzo, il monitoraggio e le pratiche. Le norme per la qualità delle acque devono garantire la salute e la sicurezza dell'ambiente. In tutto ciò è fondamentale che sussista fiducia degli utilizzatori, aspetto che costituisce un notevole freno allo sviluppo del riutilizzo delle acque.

In tale contesto, la proposta tecnica su cui la Commissione Europea e il gruppo di esperti anche italiani sta lavorando dovrebbe essere finalizzata entro la fine del 2016. Le altre azioni prevedono: lo sviluppo di linee guida europee, entro il 2016, per i diversi operatori del settore acqua e le relative autorità competenti, al fine di garantire una migliore integrazione del riutilizzo delle acque nel quadro legislativo esistente, fondate sulle buone pratiche negli Stati membri; la promozione del riutilizzo industriale in conformità alla direttiva sulle Emissioni industriali; i finanziamenti per l'innovazione e la ricerca; i finanziamenti per le infrastrutture.

### **3.3. Legislazione di riferimento per i prodotti alimentari**

Al fine di perseguire e garantire un livello elevato di tutela della salute umana in relazione agli alimenti, la comunità europea ha emesso il Regolamento (CE) 178/2002 recante i principi e i requisiti generali della legislazione alimentare in riferimento agli alimenti e ai mangimi; istituendo al contempo l'autorità europea per la sicurezza alimentare (*European Food Safety Agency*, EFSA). I successivi Regolamenti (CE) 852/2004 e (CE) 853/2004 contemplano nello specifico la normativa relativa rispettivamente all'igiene degli alimenti e degli alimenti di derivazione animale definita come l'insieme delle misure e delle condizioni necessarie per controllare i pericoli e garantire l'idoneità al consumo umano di un prodotto alimentare. La presenza o l'introduzione di tali pericoli è definita come contaminazione dell'alimento, e come tale viene considerata nel Regolamento (CE) 1881/2006 e successive modifiche, che stabilisce i tenori massimi di alcuni contaminanti chimici nei prodotti alimentari; e nel Regolamento (CE) 212/2013 che sostituisce l'Allegato I del Regolamento (CE) 396/2005 concernente i livelli massimi di residui di antiparassitari nei o sui prodotti alimentari e mangimi di origine vegetale e animale. Per quanto riguarda la contaminazione microbiologica, i criteri applicabili in tal senso sono presenti nei Regolamenti (CE) 2073/2005 e (CE) 2075/2005. Nelle Tabelle 15a e 15b è presente un riepilogo dei valori limite di concentrazione ammessi nelle relative tipologie di genere alimentare per alcuni contaminanti chimici ambientali o che si possono considerare rintracciabili in acque potenzialmente contaminate – Parte 1 Regolamento (CE) 212/2013 che sostituisce Allegato I del Regolamento (CE) 396/2005; Parte 2 Regolamento (CE) 1259/2011 modifica i tenori massimi ammissibili di diossine, PCB diossina-simili e PCB precedentemente normati nel Regolamento (CE) 1881/2006.

**Tabella 15a. Riepilogo dei valori limite di concentrazione ammessi di alcuni contaminanti chimici potenzialmente rinvenibili in prodotti alimentari**

Categoria alimentare	Erbicidi e fitofarmaci (mg/kg)						
	Lindano <sup>2</sup>	Clordano <sup>3</sup>	Eptacloro <sup>4</sup>	Atrazina	Malathion <sup>5</sup>	Parathion	Clorpyrifos
Grano, mais e riso <sup>1</sup>	0,01	-	0,01	0,1	8	0,05	0,05
Latte	0,001	0,002	0,004	-	0,02	0,05	0,01
Uova	0,01	0,005	0,02	-	0,02	0,05	0,01
Carne	0,02	0,05	0,2	-	0,02	0,05	0,05 <sup>6</sup>
Frattaglie	0,02	0,05	0,2	-	0,02	0,05	0,05 <sup>6</sup>
Agrumi	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	0,05	-
Pomacee	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	0,05	0,5
Drupacee e piccola frutta	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	0,05	-
Frutta a guscio	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	0,05	0,05
Leguminose	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	0,05	0,05
Ortaggi	0,01	0,01	0,01	0,05 <sup>7</sup>	0,02	0,05	0,05 <sup>8</sup>

1 Riso "brillato"; 2 Gamma-isomero dell'esaclorocicloesano HCH; 3 somma del cis- e trans-clordano; 4 somma dell'eptacloro e dell'eptacloro epossido; 5 somma del malathion e del malaosxon; 6 dati relativi alle sole carni avicole; 7 dati relativi agli ortaggi ad eccezione di quelli a frutto; 8 dati relativi ai soli ortaggi a foglia

**Tabella 15b. Riepilogo dei valori limite di concentrazione ammessi di alcuni contaminanti chimici potenzialmente rinvenibili in prodotti alimentari**

Categoria alimentare	Altri inquinanti d'interesse		
	Somma di diossine <sup>1</sup>	Somma di diossine e PCB diossina-simile <sup>2</sup>	Somma di PCB <sup>3</sup>
	pg/g (grasso) <sup>4</sup>	pg/g (grasso) <sup>4</sup>	pg/g (grasso) <sup>4</sup>
Latte	2,5	5,5	40
Uova	2,5	5	40
Carne (escluso pollame)	2,5/1 (idem/suino)	4/1,25 (idem/suino)	40
Frattaglie (escluso pollame)	4,5/2,5/1 (fegato/grasso/grasso suino)	10/4/1,25 (fegato/grasso/grasso suino)	40
Pollame	1,75	3	40
Frattaglie di pollame	4,5/1,75 (fegato/grasso)	10/3 (fegato/grasso)	40
Oli e grassi	0,75/1,5 (vegetali/animali)	1,25/2,5 (vegetali/animali)	40

1 Si intende la somma dei valori di concentrazione di 7 policlorodibenzo-p-diossine (PCDD; di cui 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-diossina; 1,2,3,7,8-pentaclorodibenzo-p-diossina; 1,2,3,4,7,8-esaclorodibenzo-p-diossina; 1,2,3,6,7,8-esaclorodibenzo-p-diossina; 1,2,3,7,8,9-esaclorodibenzo-p-diossina; 1,2,3,4,6,7,8-epitaclorodibenzo-p-diossina; Octaclorodibenzo-p-diossina) e 10 policlorodibenzofurani (PCDF; 2,3,7,8-tetraclorodibenzofurano; 1,2,3,7,8-pentaclorodibenzofurano; 2,3,4,7,8-pentaclorodibenzofurano; 1,2,3,4,7,8-esaclorodibenzofurano; 1,2,3,6,7,8-esaclorodibenzofurano; 1,2,3,7,8,9-esaclorodibenzofurano; 2,3,4,6,7,8-esacloro; 1,2,3,4,6,7,8-epitaclorodibenzofurano; 1,2,3,4,7,8,9-epitaclorodibenzofurano; Octaclorodibenzofurano)

2 Si intende la somma dei valori di concentrazione di 7 policlorodibenzo-p-diossine (PCDD), 10 policlorodibenzofurani (PCDF) e 12 policlorobifenili (PCB; 3,3',4,4'-tetraclorobifenile; 3,4,4',5-tetraclorobifenile; 3,3',4,4',5-pentaclorobifenile; 3,3',4,4',5,5'-esaclorobifenile; 2,3,3',4,4'-pentaclorobifenile; 2,3,4,4',5-pentaclorobifenile; 2,3',4,4',5-pentaclorobifenile; 2,3',4,4',5'-pentaclorobifenile; 2,3,3',4,4',5-esaclorobifenile; 2,3,3',4,4',5'-esaclorobifenile; 2,3,3',4,4',5,5'-epitaclorobifenile) i cui aspetti tossicologici sono ascrivibili a quelli delle diossine

3 Si intende la somma dei valori di concentrazione di 6 policlorobifenili (PCB; 2,4,4'-triclolorbifenile; 2,2',5,5'-tetraclorobifenile; 2,2',4,5,5'-pentaclorobifenile; 2,2',3,4,4',5'-esaclorobifenile; 2,2',4,4',5,5'-esaclorobifenile; 2,2',3,4,4',5,5'-epitaclorobifenile) i cui aspetti tossicologici non sono ascrivibili a quelli delle diossine

4 Concentrazioni *upper bound*: vengono calcolate ipotizzando che tutti i valori dei vari congeneri inferiori al limite di quantificazione siano pari al limite di quantificazione. Il tenore massimo espresso in rapporto al grasso non si applica ai prodotti alimentari contenenti < 2% di grassi. Per i prodotti alimentari che contengono meno del 2% di grassi, il tenore massimo applicabile è espresso secondo la seguente formula: Tenore massimo espresso in funzione del prodotto per i prodotti alimentari contenenti meno del 2% di grassi = tenore massimo espresso in rapporto al grasso per questi prodotti alimentari × 0,02.

Il gruppo di esperti scientifici sui contaminanti nella catena alimentare (*Contaminants in the Food Chain*, CONTAM) dell'EFSA ha emesso nel 2009 un parere scientifico riguardo l'esposizione all'arsenico dei bambini e di determinati gruppi etnici attraverso il consumo di riso e degli alimenti a base di riso (EFSA, 2009a). Nello specifico, l'esposizione dei bambini al di sotto dei tre anni d'età è stata stimata circa 2-3 volte superiore a quella della popolazione adulta, in quanto il riso è un ingrediente fondamentale nelle preparazioni industriali di alimenti destinati ai bambini e ai lattanti. Tali evidenze hanno indotto la Commissione Europea a emanare il Regolamento (UE) 1006/2015 concernente modifiche al Regolamento (CE) 1881/2006 riguardo i tenori massimi di arsenico inorganico nei prodotti alimentari contenenti riso, di cui in Tabella 16.

**Tabella 16. Tenori massimi ammissibili di arsenico nel riso e nei suoi derivati ai sensi del Regolamento (UE) 1006/2015**

Prodotti alimentari <sup>1</sup>	Arsenico <sup>2</sup> mg/kg peso fresco
Riso lavorato non parboiled (riso brillato o bianco)	0,20
Riso parboiled e riso semigreggio	0,25
Cialde di riso, cialdine di riso, cracker di riso e dolci di riso	0,30
Riso destinato alla produzione di alimenti per i lattanti e i bambini <sup>(3)</sup>	0,10

<sup>1</sup> Riso, riso semigreggio, riso brillato e riso parboiled come definito nella norma del Codex 198-1995

<sup>2</sup> Inorganico, somma di As(III) e As(V)

<sup>3</sup> Per i prodotti alimentari indicati in questa categoria, si rimanda alla definizione di cui alla direttiva 96/5/CE della Commissione, del 16 febbraio 1996, sugli alimenti a base di cereali e gli altri alimenti destinati ai lattanti e ai bambini (GU L 49 del 28.2.1996, pag. 17), modificata da ultimo dalla Direttiva 2003/13/CE (GU L 41 del 14.2.2003, pag. 33).

## 4. EFFETTI AVVERSI ASSOCIATI ALL'IMPIEGO DI ACQUE NON ADEGUATE ALLA DESTINAZIONE D'USO

### 4.1. Rischi correlati all'impiego delle acque reflue depurate in produzione primaria

Il DL.vo 152/2006 all'art.74 definisce “scarico” una qualsiasi immissione diretta tramite condotta di acque reflue liquide, semiliquide e comunque convogliabili nelle acque superficiali, sul suolo, nel sottosuolo e in rete fognaria (Sezione II, Titolo I, art.74, c.1, l. ff) e “acque di scarico” tutte le acque reflue provenienti da uno “scarico”.

Non sussistendo alcuna definizione generale di “acque reflue”, configurandosi tale corpo idrico quale collettore dei materiali di scarto di svariate attività antropiche, in virtù della loro variabilità qualitativa si sottintendono tali tutte le acque la cui qualità originaria è compromessa a seguito del loro impiego in tutte le circostanze riconducibili alla presenza e all'attività umana<sup>7</sup>.

Tale eterogeneità è alla base della caratterizzazione delle acque reflue, la cui composizione qualitativa è, d'altra parte, fondamentale nella valutazione dei rischi associati all'esposizione a tale matrice. In Tabella 17 (WHO, 2006) è riportato un quadro generale dei potenziali rischi sanitari associati alle tipologie di scorie oggetto di scarico.

Nello specifico del rischio microbiologico nella Tabella 18 sono riportati gli agenti patogeni maggiormente riscontrabili nelle acque reflue non trattate, il cui potenziale infettivo è di fatto la maggior fonte di preoccupazione riguardo il riuso di tali acque (NRC, 1996; Sagik *et al.*, 1978; Hurst *et al.*, 1989; Feachem *et al.*, 1983; Mara & Silva, 1986; Oragui *et al.*, 1987; Yates & Gerba, 1998; Da Silva *et al.*, 2007; Haramoto *et al.*, 2007; Geidreich, 1990; Bitton, 1999; Blanch & Jofre, 2004; EPHC *et al.*, 2008).

Le principali vie di esposizione agli agenti patogeni consistono nell'ingestione di cibo e acqua contaminati e nell'inalazione di *aerosol*<sup>8</sup> contaminati. La formazione di aerosol è promossa soprattutto dall'impiego di sistemi d'irrigazione a *sprinkler*, arrecando un concreto pericolo nelle circostanze in cui l'acqua reflua impropriamente trattata venga impiegata in contesti urbani e agricoli.

Alla presenza di aerosol sono inoltre imputabili vie di contaminazione *indiretta*, relativamente alla loro deposizione sulla superficie della vegetazione irrigata e sui vestiti degli addetti ai lavori: non sono quindi in alcun modo trascurabili i potenziali pericoli per il consumatore rappresentati dall'ingestione dell'acqua depositata sulla superficie del prodotto a seguito dell'attività irrigua.

<sup>7</sup> Le definizioni specifiche di *acque reflue domestiche, industriali e urbane* sono riportate rispettivamente alle lettere g), h) e i) del medesimo comma.

<sup>8</sup> Gli aerosol sono particelle sospese in aria di diametro inferiore ai 50 µm.

Tabella 17. Quadro generale dei potenziali rischi associati all'esposizione alle acque reflue

Acque reflue	Potenziali rischi biologici					Potenziali rischi chimici			Potenziali rischi fisici		
	Virus	Batteri	Protozoi	Elminti	Altri agenti infettivi	Sostanze tossiche	Metalli pesanti	Oggetti taglienti	Materiale inorganico	Cattivi odori	
<b>Frazione liquida</b>											
Liquame fecale umano e animale	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Urine umane e animali	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Scarichi domestici	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	
Acque meteoriche	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
Acque di fiume	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
Acque reflue industriali*						✓	✓				
<b>Frazione solida</b>											
Fanghi fecali	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	
Fanghi di depurazione	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Rifiuti domestici organici	✓	✓			✓						
Rifiuti domestici inorganici						✓	✓	✓			
Rifiuti agricoli (scarti di coltura)	✓	✓	✓	✓	✓			✓			
Scarti di giardinaggio					✓			✓			
Liquami/letame animale	✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓	
Rifiuti sanitari	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	
Rifiuti industriali						✓	✓	✓		✓	
Scarti di macellazione	✓	✓	✓	✓	✓					✓	
Rifiuti edili (materiale di risulta)								✓			

**Tabella 18. Microrganismi patogeni maggiormente riscontrabili nelle acque reflue e patologie correlate**

Patogeni	Patologia	UFC/L
<b>Batteri</b>		
<i>Shigella</i>	Shigellosi (dissenteria provocata da bacilli)	Fino a 10 <sup>4</sup>
<i>Salmonella</i>	Salmonellosi, gastroenterite (diarrea, vomito, febbre), artrite reattiva, febbre tifoidea	Fino a 10 <sup>5</sup>
<i>Vibro cholera</i>	Colera	Fino a 10 <sup>5</sup>
<i>E. coli</i> enteropatogeno	Gastroenterite e setticemia, sindrome emolitico-uremica (SEU)	
<i>Yersinia</i>	Yersiniosi, gastroenterite e setticemia	
<i>Leptospira</i>	Leptosirosi	
<i>Campylobacter</i>	Gastroenterite, artrite reattiva, sindrome di Guillain-Barrè	Fino a 10 <sup>4</sup>
Micobatteri atipici	Malattie respiratorie (alveolite allergica)	
<i>Legionella</i>	Malattie respiratorie (broncopneumite)	
<i>Staphylococcus</i>	Infezioni alla pelle e agli occhi, setticemia	
<i>Pseudomonas</i>	Infezioni alla pelle e agli occhi	
<i>Helicobacter</i>	Gastriti croniche, ulcera, cancro allo stomaco	
<b>Protozoi</b>		
<i>Entamoeba</i>	Amebiasi (dissenteria provocata da amebe)	Fino a 10 <sup>2</sup>
<i>Giardia</i>	Giardiasi (gastroenterite)	Fino a 10 <sup>5</sup>
<i>Cryptosporidium</i>	Cryptosporidiosi, diarrea, febbre	Fino a 10 <sup>4</sup>
Microsporidia	Diarrea	
<i>Cyclospora</i>	Ciclosporiasi (diarrea, febbre, crampi allo stomaco, dolori muscolari, gonfiore)	
<i>Toxoplasma</i>	Toxoplasmosi	
<b>Elminti</b>		
<i>Ascaris</i>	Ascariasi (infezione da nematodi)	Fino a 10 <sup>3</sup>
<i>Ancylostoma</i>	Ancylostomiasi (infezione da nematodi)	Fino a 10 <sup>3</sup>
<i>Necator</i>	Necatoriasi (infezione da nematodi)	
<i>Ancylostoma</i>	Larva migrans cutaneo (infezione da nematodi)	
<i>Strongyloides</i>	Strongyloidiasi (infezione da nematodi)	
<i>Trichuris</i>	Trichuriasi (infezione da nematodi)	Fino a 10 <sup>2</sup>
<i>Taenia</i>	Teniasi (infezione da cestodi), neurocisticercosi	
<i>Enterobius</i>	Enterobiasi (infezione da nematodi)	
<i>Echinococcus</i>	Hydatiosi (infezione da cestodi)	
<b>Virus</b>		
Enterovirus <sup>2</sup>	Gastroenterite, anomalie cardiache, meningite, malattie respiratorie, disordini nervosi, altro	Fino a 10 <sup>6</sup>
Virus dell'epatite A ed E	Epatite infettiva	
Adenovirus	Malattie respiratorie, infezioni oculari, gastroenterite (sierotipi 40 e 41)	Fino a 10 <sup>6</sup>
Rotavirus	Gastroenterite	Fino a 10 <sup>5</sup>
Parvovirus	Gastroenterite	
Astrovirus	Gastroenterite	
Calicivirus <sup>3</sup>	Gastroenterite	Fino a 10 <sup>9</sup>
Coronavirus	Gastroenterite	

**UFC:** Unità Formanti Colonia

<sup>1</sup> altri tipi di *E. coli* non sono pericolosi

<sup>2</sup> polio, echo, coxsackie, nuovi enterovirus, sierotipi dal 68 al 71

<sup>3</sup> inclusi Norovirus e Sapovirus

In Tabella 19 (Asano *et al.*, 1992; Tanaka *et al.*, 1998; Haas *et al.*, 1999; Van Ginnekin & Oron, 2000; Petterson *et al.*, 2001; Mara & Horan, 2003) sono elencati una serie di processi preventivi di mitigazione del rischio microbiologico e il loro rendimento in termini di riduzione della contaminazione microbica.

**Tabella 19. Misure di controllo della contaminazione microbica delle acque di riuso e loro effetti sull'esposizione umana**

Misure di controllo della contaminazione microbica	Riduzione dell'esposizione
Cottura e altri processi di produzione (es. cereali, vino, ecc.)	5-6 log
Rimozione della buccia prima del consumo	2 log
Irrigazione a goccia delle coltivazioni	2 log
Irrigazione a goccia delle coltivazioni a contatto limitato o nullo con il terreno (es. pomodori, peperoncino, ecc.)	3 log
Irrigazione a goccia di coltivazioni a contatto nullo con il terreno (es. mele, albicocche, vite, ecc.)	5 log
Subirrigazione di coltivazioni a contatto con il terreno	4 log
Periodi di stasi	0,5 log/giorno <sup>1</sup>
Periodi di stasi dall'irrigazione di aree verdi e impianti sportivi (1-4 ore)	1 log
Controllo della dispersione dei sistemi spray (microsprinkler, sistemi anemometrici, ecc.)	1 log
Irrigazione a goccia di piante e arbusti	4 log
Subirrigazione di piante, arbusti e aree erbose	5-6 log
Divieto d'accesso al pubblico durante le operazioni d'irrigazione	2 log
Divieto d'accesso e contatto limitato del pubblico al termine delle operazioni d'irrigazione (relativamente alle aree agricole)	3 log
Zone tampone (25-30 m)	1 log

**UFC:** Unità Formanti Colonia

(1) valutato in base all'inattivazione dei virus. I tassi di inattivazione batterica sono probabilmente simili; mentre per quanto riguarda l'inattivazione dei protozoi, al periodo di stasi deve concorrere anche l'essiccamento.

L'impiego di acque reflue depurate per l'irrigazione delle coltivazioni non alimentari o di alimenti destinati al processamento prima della loro commercializzazione come prodotto destinato al consumo umano comporta rischi minori, permettendo la selezione di requisiti di qualità meno restrittivi rispetto ad altre forme di riuso.

Tuttavia, nelle circostanze in cui le coltivazioni foraggere irrigate con acque reflue depurate vengano impiegate direttamente per il pascolo degli animali per la produzione di latte, esistono requisiti aggiuntivi relativi al rispetto di un *periodo di latenza* del pascolo prima del transito degli animali, o relativi ad un aumento del livello di disinfezione dei capi se non si considera opportuna l'adozione di tale accortezza.

In Tabella 20 e in Tabella 21 (EPHC *et al.*, 2006; WHO, 2006; Amoah *et al.* 2011; modificato da Mara *et al.*, 2010) sono rispettivamente elencate una serie di misure preventive di mitigazione di rischi microbiologici in relazione all'impiego zootecnico (ad eccezione dell'allevamento di suini) e all'impiego agricolo nelle fasi di produzione, post-raccolta e prima del consumo.

**Tabella 20. Sinossi delle misure preventive e/o di controllo relativamente al riuso zootecnico<sup>1</sup>**

<b>Impiego</b>	<b>Misure di prevenzione <i>in situ</i></b>	<b>Obiettivi di qualità dell'acqua</b>
Acqua di abbeveraggio	Divieto d'uso per l'abbeveraggio del bestiame al di sotto dei 12 mesi se contiene residui di natura animale (es. mattatoi, ecc.)	BOD <sub>5</sub> <20 mg/L SS <30 mg/L <i>E.coli</i> <100 per 100 mL Residui di disinfettante <sup>2</sup>
Lavaggio delle stalle	Divieto d'uso per il lavaggio dei macchinari dedicati alla mungitura e alla produzione di latte <sup>3</sup>	( <i>idem</i> )
Irrigazione di pascoli/foraggiere <sup>4</sup> con successivo periodo di stasi limitato	Esclusione del bestiame per la produzione di latte da quattro ore fino al completo drenaggio del pascolo. Il foraggio deve essere essiccato o insilato  <i>Accesso al pubblico:</i> Vietato durante le operazioni d'irrigazione Distanza di sicurezza di 25-30 metri dal punto di pubblico accesso più vicino al sito Controllo della diffusione dell'aerosol	( <i>idem</i> )
Irrigazione di pascoli/foraggiere <sup>2</sup> con successivo periodo di stasi	Esclusione dal pascolo del bestiame per i primi 5 giorni dopo il termine delle operazioni di irrigazione. Il foraggio deve essere essiccato o insilato.  <i>Accesso al pubblico:</i> ( <i>idem</i> )	( <i>idem</i> ), tranne: <i>E.coli</i> <1000 per 100 mL

**BOD<sub>5</sub>:** Biochemical Oxygen Demand testato in 5 giorni;

**TSS:** Total Suspended Solids

- 1 per acque reflue trattate a livello secondario per la riduzione della presenza di elminti (accumulo in laguna >25 giorni, o adeguata filtrazione) e successiva disinfezione; oppure per trattamento primario con accumulo in laguna >50 giorni e successiva disinfezione
- 2 devono essere anche considerati i residui dell'azione della disinfezione operata per mezzo dei raggi UV
- 3 a meno che il riuso non sia considerato sicuro per la salute umana attraverso opportuna valutazione e gestione del rischio
- 4 inclusi fieno, insilati e altro foraggio commerciale

**Tabella 21. Sinossi delle misure preventive e/o di controllo relativamente al riuso agricolo nelle fasi di produzione, post-raccolta e al consumo**

Misure di controllo della contaminazione microbica	Riduzione esposizione	Osservazioni
<b>A) all'interno dell'azienda agricola</b>		
Impiego di terreni e fonti idriche alternative	6-7 log	
Limitazioni nella selezione del tipo di coltura (es. nessuna coltivazione di generi alimentari destinati al consumo crudo)	6-7 log	Dipende da (a) l'efficacia del controllo locale delle restrizioni imposte sulle colture, e (b) la comparazione col margine di profitto del nuovo tipo di coltura.
Trattamenti <i>in situ</i> :		
a) Sistema di accumulo a tre stadi	1-2 log	Il sistema consta di una prima fossa di riempimento, una seconda di stagnazione e una terza dalla quale viene prelevata l'acqua accumulata e travasata sequenzialmente nel sistema
b) Sedimentazione semplice	0,5-1 log	Sedimentazione per ~18 ore
c) Filtrazione semplice	1-3 log	Il valore di abbattimento degli agenti patogeni è funzione della tipologia di filtro impiegata
<i>die-off</i> <sup>1</sup> dei patogeni (fanghi fecali)	secondo linee guida WHO 2006	I fanghi fecali grezzi impiegati nelle coltivazioni cerealicole in Ghana e in India devono essere disidratati all'interno delle fattorie per periodi ≥ 60 giorni o ≥ 90 giorni in base al metodo di accumulo impiegato (spargimento vs fossa) al fine di minimizzare i rischi per la salute degli operatori.
Metodo di applicazione delle acque reflue:		
a) Irrigazione a solco	1-2 log	La densità e la resa delle colture potrebbero diminuire.
b) Irrigazione a goccia a basso costo	2-4 log	
c) Riduzione degli schizzi	1-2 log	necessario adeguato addestramento degli operatori
<i>die-off</i> <sup>1</sup> dei patogeni (acque reflue)	0,5-2 log al giorno	Dipende strettamente dal tempo che intercorre dal termine delle operazioni d'irrigazione al consumo, relativamente alle condizioni ambientali e alle caratteristiche peculiari delle colture
<b>B) dopo la raccolta</b>		
Trattamenti precedenti la vendita	1-2 log	Lavaggio di frutta e verdura con acqua pulita.
	2-3 log	Lavaggio di frutta e verdura con acqua di qualità potabile.
	1-3 log	Rimozione delle foglie più esterne di cavoli, lattuga, ecc.
<b>C) al consumo</b>		
Disinfezione	2-3 log	Lavaggio di frutta e verdura con un'appropriata soluzione disinfettante e risciacquo con acqua pulita.
Sbucciatura	2 log	Frutta e ortaggi da radice.
Cottura	6-7 log	Le alternative dipendono dalla dieta locale e dalle tradizioni proprie di cucina e cottura degli alimenti.

<sup>1</sup> per *die-off* si intende la fase di declino della crescita batterica, naturalmente provocata dalla carenza di nutrienti nella matrice colonizzata

#### 4.1.1. Effetti riconducibili alla presenza di sodio e cloro

Le acque impiegate in agricoltura sono, in generale, caratterizzate da un certo grado di *salinità*, determinata attraverso la misurazione della conducibilità elettrica (EC) e/o la misurazione del totale dei solidi disciolti (TDS) in acqua.

In carenza di adeguato drenaggio del terreno, i sali costituenti, sia in forma cationica che anionica, tendono ad accumularsi nel terreno in funzione della loro concentrazione nell'acqua irrigua e del loro tasso di rimozione per dilavamento. Considerando il TDS quale *indice di salinità*, non si osservano effetti avversi per le colture se il suo valore è minore di 500 mg/L; mentre tra 500 e 1000 mg/L si può osservare nocimento per alcune piante sensibili, e a concentrazioni superiori ai 1000-2000 mg/L si registrano generalmente gravi danni per la maggior parte delle specie vegetali coltivate.

Alla luce di quanto appena esposto, è necessaria una corretta e attenta gestione della criticità, generalmente condotta attraverso l'adozione di limitazioni d'uso a seguito di opportune valutazioni *sito-specifiche*.

Uno studio condotto in Israele e in Giordania sull'impatto delle acque reflue depurate caratterizzate da notevole salinità (fino a NaCl 35 mM, ed EC = 9 dS/m) ha evidenziato come l'irrigazione con acque saline non è di per sé essenziale allo sviluppo vegetativo nella misura in cui la rizosfera risulti continuamente sottoposta a *dilavamento* attraverso l'impiego di opportuni volumi in eccedenza di acqua irrigua (Ben-Gal *et al.*, 2008; Ben-Gal *et al.*, 2002; Ben-Gal *et al.*, 2009; Shani *et al.*, 2009; Yermiyahu *et al.*, 2008).

Relativamente ai residui di cloro, comunque riconducibili anche ai processi di disinfezione, non si osservano effetti avversi per le colture a concentrazioni minori di 1 mg/L; mentre per concentrazioni maggiori di 5 mg/L si registrano normalmente gravi danni alla maggior parte delle piante. Tuttavia, alcune coltivazioni sensibili possono risentire di alterazioni funzionali a livelli inferiori a 0,05 mg/L. Ad esempio molte coltivazioni legnose accumulano cloro nei tessuti fino a superare le dosi tossiche, andando incontro a danni simili all'ustione chimica delle foglie, del tutto simili a quelli osservati dopo il contatto diretto delle foglie con acqua reflua depurata ricca in sodio e cloro in sistemi di irrigazione a pioggia.

In Tabella 22 (Maas, 1986; Department of Agriculture Western Australia, 2002; Anzecc & Armcanz, 2000; Maas, 1987; Cresswell & Weir, 1997) sono presentati i limiti di tolleranza di varie specie per vari tipi di suolo e acque irrigue.

I valori dei limiti di tolleranza alla specie cloruro per diverse specie vegetali sono riportati in Tabella 23. In Tabella 24 sono mostrati i livelli relativi al grado di restrizione d'uso, valutati in base ad opportuni parametri indicatori.

#### 4.1.2. Elementi in traccia e nutrienti

La concentrazione massima raccomandata di costituenti chimici nelle acque reflue depurate, per un impiego continuo e a lungo termine, viene considerata relativamente al loro impiego per colture praticate in suoli sabbiosi. Tali valori di concentrazione sono stabiliti a livelli inferiori rispetto alle dosi tossiche per le piante coltivate in *soluzioni nutrienti* o in sabbia "arricchita". Per questo motivo, un superamento transiente dei livelli indicati non è necessariamente legato al manifestarsi di fitotossicità, che tuttavia potrebbe insorgere a seguito dell'accumulo cronico di costituenti chimici nel suolo.

I criteri raccomandati per gli elementi in traccia e i nutrienti in suoli neutro-alcalini a tessitura fine, e con alta capacità di rimozione di diversi elementi inquinanti, sono mostrati in Tabella 25.

**Tabella 22. Limiti di tolleranza salina di alcune tipologie di colture commerciali in relazione al suolo e all'acqua irrigua impiegata**

Tipologia di coltura	Limiti di tolleranza per il suolo (ECe dS/m)	Limiti di tolleranza per l'acqua irrigua (ECi)			
		suolo a 25% LF (es. sabbia)	suolo a 20% LF (es. terriccio sabbioso)	suolo a 17% LF (es. terriccio humico)	suolo a 12% LF (es. argilla fine)
Mandorle	1,5-4	2,8	2,4	2,0	1,5
Mele	1	1,0	0,9	0,7	0,6
Albicocche	1,6	1,6	1,4	1,2	0,9
Frutti di bosco	1,5	1,5	1,3	1,1	0,8
Vite	1,5-8	4,8	4,1	3,5	2,7
Pompelmo	1,8-6	3,9	3,4	2,9	2,2
Limone	1-6	3,5	3,0	2,6	2,0
Olivo	4	4,0	3,4	2,9	2,2
Arance	1,7-6	3,9	3,3	2,8	2,2
Pesche	3,2	3,2	2,8	2,4	1,8
Pere	1	1,0	0,9	0,7	0,6
Susino	1,5	1,5	1,3	1,1	0,8
Melone	2,2	2,2	1,9	1,6	1,2
Fragola	1	1,0	0,9	0,7	0,6
Orzo	8	8,0	6,9	5,9	4,5
Fave	2-4	3,0	2,6	2,2	1,7
Lupini	2-4	3,0	2,6	2,2	1,7
Avena	5	5,0	4,3	3,7	2,8
Mais	1,7	1,7	1,5	1,3	1,0
Soia	5,0	5,0	4,3	3,7	2,8
Girasole	5,5	5,5	4,7	4,0	3,1
Grano duro	5,7	5,7	4,9	4,2	3,2
Grano tenero	2-6	4,0	3,4	2,9	2,2
Trifoglio	1,5	1,5	1,3	1,1	0,8
Erba medica	2	2,0	1,7	1,5	1,1
Asparagi	4,1	4,1	3,5	3,0	2,3
Fagioli	1	1,0	0,9	0,7	0,6
Barbabietola	4	4,0	3,4	2,9	2,2
Barbabietola da zucchero	7	7,0	6,0	5,1	3,9
Broccoli	2,8	2,8	2,4	2,1	1,6
Cavoli	1,8	1,8	1,6	1,3	1,0
Carote	1	1,0	0,9	0,7	0,6
Cavolfiori	2,5	2,5	2,2	1,8	1,4
Sedano	1,8	1,8	1,6	1,3	1,0
Cetrioli	2,5	2,5	2,2	1,8	1,4
Melanzane	1,1	1,1	0,9	0,8	0,6
Lattuga	1,3	1,3	1,1	1,0	0,7
Cipolle	1,2	1,2	1,0	0,9	0,7
Patate	1,7	1,7	1,5	1,3	1,0
Ravanelli	1,2	1,2	1,0	0,9	0,7
Spinaci	2	2,0	1,7	1,5	1,1
Zucca	2,5	2,5	2,2	1,8	1,4
Rape	0,9	0,9	0,8	0,7	0,5
Peperone	1,5	1,5	1,3	1,1	0,8
Pomodoro	2,3-2,5	2,4	2,1	1,8	1,3
Zucchine	4,7	4,7	4,1	3,5	2,6

EC conduttività elettrica in dS/m

ECe conduttività elettrica di un campione di suolo

ECi conduttività elettrica dell'acqua d'irrigazione

LF *Leaching Fraction*, frazione lisciviata

**Tabella 23. Limiti di tolleranza alla specie cloruro per alcune tipologie di colture commerciali**

Tipo di coltura	Cloruri nell'estratto di suolo saturo (mg/L)
Erba medica	710
Orzo (foraggio) <sup>a</sup>	2130
Orzo	2840
Fagioli	355
Barbabietola rossa	1420
Broccoli	887
Cavoli	532
Carota	355
Sedano	532
Trifoglio	532
Cetriolo	887
Lattuga	355
Mais	532
Cipolla	355
Peperone	532
Patate	532
Ravanello	355
Riso grezzo <sup>a,b</sup>	1065
Spinaci	710
Zucchine	1597
Fragole	355
Barbabietola da zucchero <sup>a</sup>	2485
Patate dolci	532
Pomodoro	887
Rape	355
Grano duro	1952
Grano tenero <sup>a</sup>	2130

<sup>a</sup> Meno tollerante durante la fase di germinazione e nel primo stadio di crescita; <sup>b</sup> i valori del riso fanno riferimento alla concentrazione di cloruro nell'acqua del suolo durante la fase di crescita per sommersione

**Tabella 24. Grado di restrizione d'uso di acque reflue in base ai potenziali impatti negativi sulle colture**

Potenziati criticità	Unità	Grado di restrizione d'uso		
		nessuno	da debole a moderato	elevato
<b>Salinità</b> (può ridurre la disponibilità di acqua)				
EC <sub>w</sub> <sup>1</sup>	dS/m	<0,7	0,7-3,0	> 3,0
TDS	mg/L	< 450	450-2000	> 2000
<b>Infiltrazione</b> (come combinazione di SAR e EC <sub>w</sub> )				
SAR <sup>2</sup>	EC <sub>w</sub> =	>0,7	0,7-0,2	<0,2
		>1,2	1,2-0,3	<0,3
		>1,9	1,9-0,5	<0,5
		>2,9	2,9-1,3	<1,3
		>5,0	5,0-2,9	<2,9
<b>Tossicità a specifici ioni</b> (può causare danni a specie sensibili)				
Sodio (Na) <sup>3</sup> irrigazione superficiale	SAR	< 3	3-9	> 9
irrigazione a pioggia	meq/L	< 3	> 3	
Cloruro (Cl) <sup>3</sup> irrigazione superficiale	meq/L	< 4	4-10	> 10
irrigazione a pioggia	meq/L	< 3	> 3	
Boro (B)	mg/L	<0,7	0,7-3,0	>3,0
<b>Altri effetti</b> (relativamente a specie sensibili)				
Nitrato (NO <sub>3</sub> -N)	mg/L	< 5	5-30	> 30
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	meq/L	< 1,5	1,5-8,5	> 8,5
pH			intervallo normale: 6,5-8,4	

<sup>1</sup> indica la conducibilità elettrica riportata in deciSiemens per metro a 25°C (dS/m) o in millimho per centimetro (mmho/cm)

<sup>2</sup> indica il tasso di adsorbimento di sodio; per un dato valore di SAR, il tasso d'infiltrazione aumenta all'aumentare della salinità dell'acqua <sup>3</sup> La maggior parte delle coltivazioni legnose sono sensibili al sodio e al cloro in colture irrigate per scorrimento superficiale, a differenza delle colture annuali. Per sistemi di irrigazione a pioggia in condizioni di bassa umidità (<30%), il sodio e il cloro possono essere adsorbiti in specie sensibili attraverso le foglie

**Tabella 25. Valori limite raccomandati di alcuni contaminanti chimici nelle acque irrigue**

Elemento	Limite massimo (mg/L)	Osservazioni
Alluminio	5,0	può causare improduttività in suoli acidi; suoli a pH a 5,5-8 lo precipitano inattivandone la tossicità
Arsenico	0,10	la sua tossicità varia notevolmente tra le specie, dai 12 mg/L di alcune foraggere a meno di 0,05 mg/L per il riso
Berillio	0,10	la sua tossicità varia notevolmente tra le specie, dai 5 mg/L del cavolo ai 0,5 mg/L di alcune specie di fagiolo
Boro	0,75	essenziale per la crescita delle piante; si ottengono ottime rese per valori di poche decine di mg/L; tossico per le specie sensibili (es. agrumi) a 1 mg/L. La maggior parte delle foraggere tollera livelli pari a 2,0-10 mg/L
Cadmio	0,01	tossico per fagioli, bieta e rape a partire da 0,1 mg/L; sono raccomandati limiti più rigorosi
Cromo	0,1	non viene generalmente considerato un elemento essenziale; a causa della carenza di dati tossicologici sono raccomandati limiti più rigorosi
Cobalto	0,05	tossico per i pomodori a 0,1 mg/L; tende ad essere disattivato in suoli neutro-alcinali
Rame	0,2	tossico per un certo numero di specie a livelli compresi tra 0,1 e 10 mg/L
Fluoruro	1,0	la sua tossicità è disattivata in suoli neutro-alcinali
Ferro	5,0	non tossico in suoli areati, ma può contribuire all'acidificazione del terreno e alla conseguente perdita di fosforo e molibdeno
Piombo	5,0	può inibire la crescita cellulare della pianta a concentrazioni elevate
Litio	2,5	è tollerato da molte specie fino a 5 mg/L. È tossico per gli agrumi anche a basse dosi (limite raccomandato 0,075 mg/L)
Manganese	0,2	tossico per un certo numero di specie da poche decine a pochi mg/L in suoli acidi
Molibdeno	0,01	non tossico per le piante; può essere tossico per il bestiame se il foraggio viene coltivato in suoli ricchi di molibdeno
Nichel	0,2	tossico per un certo numero di piante da 0.5 a 1.0 mg/L; la sua tossicità è ridotta in suoli a pH neutro-alcinali
Selenio	0,02	tossico per le piante a bassa concentrazione e per il bestiame
Stagno, tungsteno e titanio	-	non vengono assorbiti dalle piante; livello di tolleranza specifico sconosciuto
Vanadio	0,1	tossico per molte piante a concentrazioni relativamente basse
Zinco	2,0	tossico per molte piante per un vasto intervallo di concentrazione; la tossicità è ridotta per suoli l a pH>6 e in terreni a tessitura fine o ricchi in sostanza organica

Tali criteri sono coerenti con le raccomandazioni FAO presenti nel documento *Water Quality for Agriculture* (FAO, 1985). Esistono inoltre effetti del pH relativi alla crescita delle piante, in primo luogo imputabili alla loro influenza nell'espressione e/o promozione di effetti tossici provocati da metalli: è pertanto raccomandato un intervallo di pH tra 6 e 8 per le acque reflue depurate destinate all'impiego irriguo.

### 4.1.3. Potenziali impatti dei residui dei costituenti chimici in traccia rispetto alla antibiotico-resistenza

La maggior parte degli impianti di depurazione delle acque reflue non è progettata per la rimozione delle sostanze chimiche organiche in traccia. In Tabella 26 è illustrato un elenco generale di tali sostanze e della loro presenza nelle relative categorie di consumo.

**Tabella 26. Elenco di alcuni contaminanti chimici in traccia in base alla loro categoria di consumo**

Categoria di consumo	Esempi
Sostanze chimiche industriali	1,4 Diossano, acido perfluorooctanoico, metilterbutiletere, tetracloroetano
Pesticidi, biocidi ed erbicidi	Atrazina, lindano, diuron, fipronil
Sostanze chimiche naturali	Ormoni (17 $\beta$ -estradiolo), fitoestrogeni, geosmina, 2-metilisoborneolo
Sostanze farmaceutiche e loro metaboliti	Antibatterici (sulfametossazolo), analgesici (paracetamolo, ibuprofene), beta-bloccanti (atenololo), antiepilettici (fenitoina, carbamazepina), antibiotici umani e veterinari (azitromicina), contraccettivi a uso orale (etinilestradiolo)
Prodotti per la cura della persona	Triclosan, componenti di creme solari, fragranze, pigmenti
Prodotti per la casa e additivi alimentari	Sucralosio, bisfenolo A (BPA), dibutilftalato, alchilfenoli polietossilati, ritardanti di fiamma (acido perfluorooctanoico, perfluorooctano sulfonato)
Sottoprodotti di disinfezione	NDMA, HAA, e THM

Come conseguenza, sono stati rilasciati nell'ambiente residui di antibiotici e loro metaboliti, cosa che ha provocato l'insorgere di fenomeni di *resistenza* in microorganismi patogeni e non patogeni nell'ambiente (Pauwels & Verstraete, 2006). Tali fenomeni di resistenza agli antibiotici non si limita all'ambiente, ma può verificarsi anche durante la profilassi individuale, quando la flora intestinale è esposta ad alte concentrazioni di antibiotico; oppure durante i processi di trattamento delle acque reflue, in particolare durante il processo di trattamento biologico secondario (Clara *et al.*, 2004; Dhanapal & Morse, 2009). La WHO ha identificato la resistenza agli antibiotici come un problema critico per la salute umana del prossimo secolo, e ha annunciato una strategia globale per il suo contenimento in un rapporto (WHO, 2000) secondo il quale più di due milioni di americani vengono infettati ogni anno da agenti patogeni resistenti agli antibiotici, con 14000 morti registrati. Il largo impiego di queste molecole per la cura della salute umana e in zootecnia ha portato ad un notevole rilascio di antibiotici e loro metaboliti nell'ambiente, in quanto è stato stimato come più del 75% di questi vengono escreti inalterati o solo parzialmente metabolizzati (Bockelmann *et al.*, 2009). Un'altra causa di proliferazione di resistenza agli antibiotici è da ricondursi ad alcuni punti critici dei processi di trattamento convenzionale delle acque reflue, ad esempio nei sistemi convenzionali di depurazione *ai fanghi attivi* (CAS, si tratta di un sistema in cui la biomassa attiva è presente come sospensione nell'acqua da trattare, che viene costantemente areata) e i *bioreattori a membrana* (MBR) dove si può sviluppare la resistenza agli antibiotici a causa della continua esposizione dei batteri sia ad alte concentrazioni di antibiotico che in condizioni ideali di crescita. Le specie *antibiotico-resistenti* possono quindi accumularsi nei biosolidi ed essere scaricati nell'ambiente come effluente o acqua di riuso. Uno studio recente (Knapp *et al.*, 2010) ha evidenziato come la resistenza agli antibiotici di batteri del suolo, campionati e archiviati in Olanda dal 1940 (quando l'uso degli antibiotici iniziava a diffondersi) fino al 2008, è aumentata sia per le forme innocue che per le forme patogene; evidenza che sottolinea una potenziale minaccia emergente per la salute pubblica e ambientale.

#### 4.1.4. Potenziale contaminazione chimica degli alimenti

La contaminazione della produzione primaria e dei relativi prodotti di trasformazione è un concetto centrale nell'ambito della valutazione dei rischi associati all'impiego di acque reflue in agricoltura. La complessità dei meccanismi chimico-fisici e biologici alla base dell'assorbimento dei nutrienti a livello della rizosfera, insieme ai meccanismi biologici di ripartizione delle specie chimiche all'interno della struttura del vegetale comportano notevoli difficoltà nel determinare i *pathways* dei vari contaminanti dall'ambiente di coltura alla parte edibile della pianta, ovvero quella destinata al consumo umano. A differenza dei rischi di natura microbiologica associati all'impiego di acque reflue in agricoltura (immediati e ad effetto acuto), i rischi derivanti dall'esposizione cronica a costituenti chimici veicolati tramite le acque in un terreno dedicato alla coltivazione di specie vegetali destinate alla produzione alimentare è da ricercarsi nella capacità di accumulo nel terreno, nella presenza di contaminanti *in tracce* e nella difficoltà dei sistemi di depurazione di abbatterne il loro contenuto a livelli non misurabili. Uno studio specifico riguardo alla contaminazione chimica da arsenico (Dahal *et al.*, 2007) ha evidenziato, nel caso del riso e di altre specie vegetali, come la correlazione tra la concentrazione di arsenico nelle acque irrigue e nella pianta sia maggiore rispetto alla correlazione tra la medesima e i livelli di arsenico del suolo impiegato. È stato inoltre dimostrato come l'uso prolungato di acque d'irrigazione contenenti arsenico a valori maggiori di 0,250 mg/L possa causare un considerevole rischio di contaminazione della catena alimentare: nel caso specifico del riso, è stato osservato un contenuto in arsenico della parte edibile (riso brillato) a valori prossimi o superiori a quelli previsti dal Regolamento (CE) 1006/2015. In Tabella 27 sono riportati i valori di concentrazione di alcuni elementi d'interesse determinati attraverso studi specifici circa l'interazione acqua reflua-suolo-pianta sia in condizioni controllate che in campo aperto.

**Tabella 27. Sinossi dei dati disponibili in letteratura nell'ambito della ripartizione dei contaminanti chimici nel sistema suolo-acqua-pianta**

Elemento	Range di valori					Acqua irrigua (mg/L)	Suolo (mg/kg d.w.)	Altro
	Pianta <sup>1</sup> (mg/kg d.w.)							
Arsenico <sup>2</sup>	Riso:	Cavolfiori:	Cipolle:	Patate:		<0,005-1,014	6,1-16,7	terreni irrigati con acque superficiali contaminate
	0,06-22,20	0,09-3,45	<0,01-1,20	<0,01-0,79				
Piombo <sup>3</sup>	Patate:					0,014	26,7	terreni irrigati con acque fluviali contaminate da reflui urbani
Cadmio <sup>3</sup>	0,07					0,017	2	
Mercurio <sup>4</sup>	Ceci:		Grano:			0,25 - 1	-	coltivazione idroponica
	0,23 - 0,71		0,09 - 0,11					
Manganese <sup>5</sup>	Cipolle:	Aglio:	Pomodori:			0,150	4,8	terreni irrigati con acque reflue
Cobalto <sup>5</sup>	0,350	0,800	0,450			0,130	0,124	
Cromo <sup>5</sup>	5,05	2,6	6,1			0,050	0,493	
Rame <sup>6</sup>	Riso:	Grano:	Mais:	Spinaci:	Cavolfiori:	0,029	-	terreni irrigati con acque reflue depurate
Zinco <sup>7</sup>	52	9,4	15	21	11			
Boro <sup>7</sup>	Broccoli:		Cavoli Bruxelles:			1,18	0,27-0,34	
	21,04		24,12					

<sup>1</sup> i valori fanno riferimento alla *parte edibile* ad eccezione dell'arsenico (range di valori in diverse sezioni della pianta)

<sup>2</sup> Dahal *et al.*, 2007; <sup>3</sup> Surdyk *et al.*, 2010; <sup>4</sup> Millàn Rocio *et al.*, 2013; <sup>5</sup> Noor-ul- Amin *et al.*, 2012;

<sup>6</sup> Rattan *et al.*, 2005; <sup>7</sup> Kalavrouziotis *et al.*, 2008

In Tabella 28 sono elencate una serie di raccomandazioni EFSA per alcuni contaminanti d'interesse sanitario sulla base di informazioni di natura analitica ed epidemiologica.

**Tabella 28. Riepilogo delle raccomandazioni EFSA nell'ambito dell'esposizione dei consumatori ad alcuni contaminanti d'interesse attraverso la veicolazione alimentare**

Elemento	Raccomandazioni EFSA <sup>1</sup>
Arsenico <sup>2</sup>	L'arsenico inorganico nei prodotti alimentari <sup>3</sup> è presente in media per il 70% del totale
	C'è carenza di dati analitici riguardo la presenza di arsenozuccheri, arsenolipidi, metilarsonati e dimetilarsinati negli alimenti
	La principale via d'assorbimento di arsenico per gli ortaggi a foglia è la deposizione atmosferica, mentre per quelli a radice è noto l'effetto combinato dell'esposizione atmosferica e rizosferica
Cadmio <sup>4</sup>	Più dell'80% dell'intake nella dieta proviene da alimenti di origine vegetale; soprattutto dai cereali, ortaggi e patate
	L'assorbimento attraverso la dieta è di norma basso (3-5%)
Cromo <sup>5</sup>	C'è carenza di dati analitici riguardo la presenza del Cromo esavalente nel cibo <sup>6</sup>
	Ortaggi e loro trasformati, compresi i funghi, contribuiscono all'esposizione al cromo(III) per valori mediani tra il 4% per adolescenti e bambini e l'8% per la popolazione adulta <sup>6</sup>
Mercurio <sup>7</sup>	Negli alimenti, ad eccezione del pesce e dei frutti di mare, si presume che il mercurio sia presente nelle sue forme inorganiche
	l'esposizione cronica al mercurio inorganico è valutata nell'ordine del 1,6 al 26% per valori mediani tra il per bambini, adolescenti e popolazione adulta
Piombo <sup>8</sup>	Il consumo di patate contribuisce all'esposizione al piombo per il 6,8%, mentre il consumo di cereali e di ortaggi rispettivamente per il 6,8% e il 4,2%
	Risulta necessario diminuire i livelli di esposizione al piombo, anche per quanto riguarda sorgenti di contaminazione non alimentari

<sup>1</sup> Per gli elementi cobalto, fluoro, manganese, rame, zinco, boro non sono presenti raccomandazioni relativamente alla concentrazione dell'elemento nelle matrici alimentari destinate al consumo umano. Esistono tuttavia una serie di pareri e opinioni EFSA relativamente ai preparati destinati all'impiego zootecnico e per l'acquacoltura

<sup>2</sup> EFSA, 2010

<sup>3</sup> ad eccezione del pesce e dei prodotti della pesca

<sup>4</sup> EFSA, 2009b

<sup>5</sup> EFSA, 2014

<sup>6</sup> In tale matrice la presenza di cromo è assunta come presenza del solo cromo trivalente, sulla base di recenti studi di speciazione e sull'evidenza del carattere riducente delle matrici alimentari che ostacolano l'ossidazione del cromo(III) in cromo (VI). È altresì evidenziato come non sia possibile escludere del tutto una esigua quota di cromo(VI) all'interno degli alimenti, e delle conseguenze sull'esposizione pubblica ad essa conseguenti.

<sup>7</sup> EFSA, 2012

<sup>8</sup> EFSA, 2010

## **5. MISURE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO E ANALISI DI RISCHIO MEDIANTE APPROCCI OLISTICI**

### **5.1. Piani di sicurezza igienico-sanitaria della WHO**

Negli ultimi anni, il riuso di acque reflue è stato oggetto di importanti ricerche, anche a causa dell'incremento del tasso di urbanizzazione, della domanda alimentare e della scarsità di risorse idriche. Diversi soggetti, tra cui enti pubblici e imprese private, sono impegnati nell'offrire servizi volti ad un uso produttivo di tale risorsa e al contenimento dei costi associati. I modelli sviluppati possono in genere comportare una serie di benefici a livello di igiene pubblica, in primo luogo rimuovendo i reflui d'escrezione umana dall'ambiente contestualmente all'incremento della produzione alimentare sfruttandone le proprietà fertirrigue e/o ammendanti. Tuttavia, i possibili pericoli sanitari derivanti dall'esposizione a tale matrice sono le maggiori criticità associate a questo tipo di approccio. I soggetti coinvolti devono inoltre confrontarsi con una normativa piuttosto frammentata e settoriale, quando non ostantiva, comunque poco omogenea nell'ambito della sicurezza dai rischi di natura igienico-sanitaria; oltre a dover affrontare la naturale resistenza dell'opinione pubblica nei riguardi del riuso di reflui contenenti materiale proveniente da escrezione umana. In questo contesto, la WHO ha recentemente pubblicato delle linee guida (WHO, 2015) volte ad affrontare l'insieme delle criticità che intervengono nelle attività dei gruppi umani, direttamente o indirettamente coinvolti nella gestione dei reflui, attraverso lo sviluppo di Piani di sicurezza igienico-sanitaria (*Sanitation Safety Plans*, SSP). Questi ultimi si configurano come utili strumenti destinati agli operatori della filiera igienico-sanitaria, atti all'impiego in sicurezza della matrice in oggetto al fine di massimizzarne i benefici contestualmente alla riduzione dei rischi. Lo sviluppo di SSP consiste nell'identificazione sistematica dei pericoli e degli eventi pericolosi, nella valutazione dei rischi e nella gestione degli stessi rischi, su basi di priorità, all'interno della filiera igienico-sanitaria; sulla base dei rischi effettivamente definiti su base sito-specifica, i piani rappresentano il supporto ai processi decisionali e gestionali correlati al ciclo idrico integrato, al fine di garantire nel tempo la sicurezza dei servizi e prodotti correlati alle attività della filiera idrica. Lo scopo è quello di realizzare un'opportuna architettura in cui tutte le parti interessate concorrono all'identificazione dei potenziali pericoli all'interno della filiera igienico-sanitaria, all'apporto di migliorie nel sistema e al regolare monitoraggio. Gli SSP sottolineano inoltre il ruolo chiave del settore sanitario nel riuso delle acque reflue, promuovendo maggiore accortezza per la salute umana all'interno di altri settori – di norma meno sensibili – quali quello ingegneristico e agricolo.

#### **5.1.1. Piani di sicurezza igienico-sanitaria, punti critici di controllo e piani di sicurezza dell'acqua**

La WHO ha introdotto nel 2005 le linee guida riguardo i piani di sicurezza dell'acqua (*Water Safety Plans*, WSP) (WHO, 2005) al fine di garantire sistematicamente la sicurezza della filiera idropotabile attraverso una valutazione e gestione dei rischi integrata. Analogamente gli SSP trovano il loro fondamento nell'analisi dei pericoli e dei punti critici di controllo (*Hazard Analysis and Critical Control Point*, HACCP) provvedendo alla valutazione, gestione e monitoraggio dalla generazione del refluo fino all'impiego ultimo o allo smaltimento.

Nello specifico del riuso agricolo, si considera come filiera igienico-sanitaria l'insieme delle attività, degli agenti e degli eventi individuabili dalla generazione del refluo al consumo dei prodotti agricoli. Tuttavia, a differenza del contesto di sviluppo dei *Piani di Sicurezza dell'Acqua*, e dei modelli HACCP gli SSP non si inseriscono in quadri normativi ben definiti, e trattano circostanze piuttosto diverse tra loro coinvolgendo una vasta gamma di parti interessate e gruppi di esposizione.

### 5.1.2. Applicazioni dei piani di sicurezza igienico-sanitaria al riuso agricolo

Sulla base di quanto esposto, il riuso di acque reflue a vario grado di depurazione in produzione primaria è inquadrabile all'interno dello sviluppo di opportuni SSP. Il team multidisciplinare preposto dovrà considerare, nell'ambito di tale attività:

- la caratterizzazione dei reflui grezzi, con particolare attenzione all'origine dei reflui;
- i diversi gruppi d'esposizione coinvolti, con particolare attenzione per le fasce più sensibili;
- la diffusione e trasporto orizzontale di contaminanti;
- la diversa natura dei rischi associati sia alla matrice che al tipo d'impiego;
- la vulnerabilità della filiera alimentare.

Obiettivi specifici dovranno riguardare la pianificazione delle attività di monitoraggio operativo e di verifica, la realizzazione di alternative perseguibili a breve e a lungo periodo e di misure correttive *ad hoc*. La *dinamicità* propria di tale strumento dovrà essere ulteriormente implementata promuovendo il progresso generale dell'intera filiera, attraverso opportune migliorie a tutti i livelli; sottintendendo in ogni luogo una corretta ed efficace comunicazione alle parti interessate, alla popolazione e agli enti preposti.

## 5.2. Osservazioni di carattere generale

La mitigazione del rischio sanitario per la salute pubblica concerne tre obiettivi principali:

- riduzione o totale eliminazione di agenti patogeni nelle acque reflue depurate;
- controllo dello stato chimico delle acque reflue depurate;
- limitazione dell'esposizione per contatto, inalazione o ingestione alle acque reflue depurate.

La qualità delle acque reflue depurate è funzione della destinazione d'uso, alla cui variabilità corrispondono allo stesso modo i potenziali rischi per la salute.

### 5.2.1. Elementi di gestione del rischio microbiologico

L'analisi del rischio microbiologico e la sua successiva gestione constano di 4 fasi principali:

- *Identificazione del pericolo*  
in questa fase viene descritti i parametri *qualitativi* dell'agente patogeno e della relativa patologia; e viene identificata la parte della popolazione maggiormente incline al contagio
- *Dose-risposta*  
valutazione del rapporto tra la *dose* (numero di microorganismi ricevuti) e i conseguenti effetti sanitari. I dati prodotti da studi su umani e animali permettono di ottenere una serie di strumenti matematici in grado di predire il valore *dose-soglia* responsabile degli effetti avversi.

- *Gestione dell'esposizione*  
in questa fase viene descritto il pathway dell'agente patogeno, ovvero le vie di contatto con l'individuo e la successiva infezione (per via aerea, attraverso l'acqua potabile, ecc.). È necessario quindi determinare il numero e la categoria di persone esposte.
- *Caratterizzazione del rischio*  
integrazione delle informazioni provenienti dalle fasi precedenti in un unico modello matematico per il calcolo del rischio, che descriva la probabilità che si verifichi un'evento come un'infezione, malattia o morte. Il calcolo del *rischio* per tutti i valori forniti può essere eseguito utilizzando il *metodo di Monte Carlo*, il cui risultato è una gamma completa di possibili rischi, inclusi scenari mediati o relativi al caso peggiore. I rischi così determinati forniscono una solida base al processo decisionale nella politica di *regolamentazione dei rischi*.

### 5.2.2. Elementi di gestione del rischio dei costituenti chimici in traccia

I processi convenzionali operativi negli impianti di trattamento delle acque reflue non sono in grado di rimuovere completamente le sostanze organiche in tracce, che restano pertanto a potenziale rischio di introduzione nell'ambiente attraverso lo scarico dei reflui. Tuttavia, sulla base delle informazioni disponibili in letteratura, non ci sono evidenze che i rischi sanitari derivanti dall'impiego di acqua reflua depurata secondo alti standard di trattamento nella produzione di acque destinate al consumo umano siano maggiori di quelli derivanti dall'uso di riserve acquifere convenzionali (NRC, 2012). Un recente rapporto del *Global Water Research Coalition* (GWRC) sintetizza i risultati di recenti pubblicazioni circa la presenza e il potenziale impatto sanitario di residui di sostanze farmaceutiche nel sistema di distribuzione delle acque potabili (GWRC, 2009). Il rapporto conclude come non sia noto alcun effetto negativo sulla salute umana riconducibile all'esposizione a sostanze farmaceutiche nelle acque potabili. Inoltre, un recente rapporto del gruppo di esperti della WHO ha concluso che il rischio di sviluppare effetti avversi per la salute umana in seguito all'esposizione alle sostanze farmaceutiche in traccia nelle acque potabili è da considerarsi poco probabile (WHO, 2011); tuttavia, tale rapporto non ha considerato gli effetti dell'esposizione a sostanze chimiche in traccia di natura non farmaceutica. Allo stesso modo, l'esposizione pubblica alle sostanze chimiche in traccia nelle acque destinate al riuso irriguo o per altre destinazioni non potabili è da considerarsi trascurabile.

### 5.3. Distanze di setback

Come criterio di sicurezza passiva applicabile a tutti gli usi previsti per le acque reflue depurate è possibile adottare le distanze di *setback* o *zone tampone* tra gli scarichi delle acque reflue, i siti di riuso, e varie altre strutture come i serbatoi per l'approvvigionamento di acqua potabile, le fontane pubbliche d'acqua potabile, i confini di proprietà private, le aree residenziali e le strade. I requisiti relativi alle distanze di *setback* variano a seconda della qualità dell'acqua introdotta nell'ambiente, e della modalità di applicazione. Per l'impiego irriguo la pratica generale è di limitare, attraverso opportuna progettazione o controllo operativo, l'esposizione all'aerosol e agli spray aerodispersi prodotti dall'acqua reflua depurata, che non ha subito disinfezione oppure è stata disinfettata solo parzialmente. Le distanze di *setback* da sorgenti di acqua potabile sono sito-specifiche, e hanno come obiettivo il controllo delle sorgenti di acqua

di riuso e della loro azione contaminante, minimizzando le infiltrazioni e ogni possibile trasporto di contaminanti attraverso il suolo.

## 5.4. Controllo delle sorgenti

Lo sviluppo e l'implementazione di un sistema di controllo delle sorgenti di scarico industriale rappresentano la prima misura preventiva al rilascio di sostanze chimiche indesiderate, in quanto elevate concentrazioni di contaminanti possono compromettere i successivi trattamenti di depurazione o causare contaminazione crociata con gli effluenti depurati. In generale, i programmi di prevenzione dell'inquinamento dimostrano comprovata efficacia se sono soddisfatte precise condizioni, ovvero quando:

- l'inquinante è presente a livello misurabile, in range definito, nel grezzo e nel sistema di raccolta;
- è possibile identificare una singola sorgente o un gruppo di sorgenti simili come produttori del massimo carico inquinante degli scarichi;
- le fonti di contaminazione sono note alle agenzie territorialmente preposte al controllo.

Le sorgenti industriali sono facilmente controllabili a differenza delle sorgenti *diffuse*. Tra queste ultime, tra l'altro, ha rivestito particolare rilevanza il mercurio proveniente dallo smaltimento dei termometri o il lindano presente nella composizione di alcuni antiparassitari ad uso sia umano che agricolo.

In alcuni casi, per essere efficaci, le limitazioni all'uso dei prodotti devono essere rafforzate a livello nazionale e regionale, come è avvenuto per il bando del *nonilfenolo* (un ingrediente di surfattanti, riconosciuto come interferente endocrino) nell'Unione Europea (Direttiva 2003/53/CE) o, più di recente, del perfluoroottano sulfonato.

## 5.5. Monitoraggio delle performance dei trattamenti

Diversi recenti documenti di riferimento (NRC, 2012; WRRF, 2011a; Colford *et al.*, 2009) raccomandano attività di monitoraggio che risultino affidabili nell'evidenziare eventuali criticità nel processo produttivo e nella gestione della qualità delle acque destinate al riuso, e che dovrebbe inoltre includere:

1. un programma di controllo della sorgente in grado di documentare la concentrazione di contaminanti e le eventuali azioni diversive da applicare in caso di necessità;
2. la valutazione individuale delle *barriere multiple* impiegate nell'abbattimento della carica microbica patogena;
3. solidi studi sul destino dei contaminanti (es. i processi di biodegradazione, assorbimento, fotolisi o gli effetti negativi come le patologie gastrointestinali);
4. conduzione da parte di operatori qualificati e procedure certificate;
5. protocolli di comunicazione per eventuali azioni correttive.

### 5.5.1. Misura degli organismi indicatori

Per *organismo indicatore* si intende una particolare specie biologica assunta come indicatore, in quanto rappresentativa delle condizioni microbiologiche di una matrice; nello specifico la sua misura viene valutata come indice delle performance dei trattamenti di depurazione delle acque destinate al riuso. Per descrizione accurata di quanto appena introdotto

si rimanda al paragrafo 2.2.4 Indicatori di disinfezione. Nello studio degli agenti patogeni e degli organismi indicatori è oggi molto applicata la PCR (Polymerase Chain-Reaction), che permette la rilevazione del DNA o dell'RNA nell'ambiente. Tale tecnica è particolarmente utile in questo altamente sensibile e maggiormente economica anche in termini di tempo tecnico rispetto ai metodi colturali che, fra l'altro, per taluni agenti patogeni, sono attualmente non disponibili. È tuttavia opportuno ricordare che la tecnica PCR non determina il grado d'infettività e di vitalità dell'agente patogeno, in quanto è solo indice della presenza del DNA o dell'RNA del microorganismo.

### **5.5.2. Considerazioni specifiche rispetto al rischio chimico**

Non esistendo, a livello comunitario e in altri Paesi, una normativa specifica che stabilisca parametri chimici di qualità per risorse idriche destinate ad uso irriguo e in linea con i capisaldi della legislazione alimentare, sebbene l'applicazione dei principi del sistema dell'analisi dei pericoli e dei punti critici di controllo (HACCP) alla produzione primaria non è ancora praticabile su base generalizzata; spetta agli OSA, nella misura del possibile, assicurare che i prodotti primari siano protetti da contaminazioni, tenendo conto di tutte le trasformazioni successive cui saranno soggetti. E, a tal fine, gli stessi OSA che allevano, raccolgono o cacciano animali o producono prodotti primari di origine animale devono, se del caso, adottare misure adeguate per utilizzare acqua potabile o "acqua pulita", ove necessario in modo da prevenire la contaminazione. In tale contesto, può ragionevolmente considerarsi che l'utilizzo di (a) acque di origine superficiale o sotterranea in buono stato chimico e in buono stato ecologico ai sensi del DL.vo 152/2006 e s.m.i., e del DL.vo 30/2009, (b) acque conformi ai requisiti di cui DM 185/2003 destinabili a fini irrigui, possa rientrare nelle condizioni di "acqua pulita" ai fini della produzione primaria in quanto può generalmente garantire il controllo dei rischi di natura chimica sulla produzione primaria; inoltre, l'utilizzo in produzione primaria di acque idonee al consumo umano ai sensi del DL.vo 31/2001 e s.m.i è espressamente consentito dal Regolamento 852/2002/CE.

Ad integrazione di quanto sopra, l'utilizzo di acque anche non conformi alle suddette normative è consentito all'OSA, responsabile della sicurezza igienico-sanitaria della produzione primaria che, comunque, è tenuto ad assicurare la conformità della risorsa idrica utilizzata in produzione primaria ai requisiti previsti per l'"acqua pulita".

## CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

La gestione della quantità e qualità delle acque utilizzate in produzione primaria è oggi sempre più legata alle prospettive di riuso delle acque reflue depurate come misura improcrastinabile per affrontare, con approcci integrati multidimensionali, il problema della sostenibilità di prelievi e utilizzi idrici e la gestione dei reflui.

Considerando la diversa composizione delle acque reflue, effetto delle molte diverse attività umane, domestiche e/o agro-zootecniche e/o industriali e della vasta gamma di processi e tecnologie di depurazione, come pure la diversità delle possibili destinazioni d'uso delle acque reflue depurate, risulta evidente quanto complessa sia la tematica del riuso delle acque con le associate criticità sanitarie e ambientali. In tale contesto è necessario promuovere sia in termini tecnici che legislativi soluzioni orientate alla *flessibilità*, che perseguano semplicità operativa e di monitoraggio e utilità in termini economici, garantendo, nel contempo il controllo sui rischi, analizzati su variabili di contesto sito-specifico.

Gli elementi di principale rilevanza per definire lo scenario dei riutilizzi in ambito nazionale sono stati approfonditi nelle precedenti sezioni, e possono essere richiamati come segue:

- L'utilizzo di acque di riuso reflue depurate deve essere presieduto da un'analisi di rischio specifica che consideri le caratteristiche (origine) del refluo, i trattamenti di depurazione effettuati con indicatori di efficacia, le possibili destinazioni d'uso delle acque depurate e ogni scenario di esposizione correlato al riuso dell'acqua.
- La diversa domanda di acqua irrigua in base all'impiego del suolo è regolata anche dai diversi sistemi di irrigazione normalmente praticati in ambito agricolo. L'impatto sanitario e le criticità tecniche connesse ai sistemi di irrigazione può risultare in un'esposizione locale o piuttosto diffusa al variare della tecnica d'irrigazione praticata nel fondo, arrivando anche a coinvolgere gli acquiferi sotterranei e gli alimenti prodotti.
- L'uso di acque reflue non depurate è una sorgente di rischio chimico e microbiologico, considerando l'impatto sanitario sugli operatori direttamente esposti e la contaminazione delle falde e degli alimenti.
- Esistono vari livelli di depurazione capaci di generare acque a qualità crescente. Non richiedendo le acque irrigue livelli di depurazione pari a quelli richiesti per le acque destinate al consumo umano, sono potenzialmente utilizzabili acque reflue di *trattamento secondario*, eventualmente sottoposte ad opportuna disinfezione quando necessario.
- È consigliabile che il materiale particolato sia ridotto a livelli bassi, nell'intorno dei 5 mg/L come totale di solidi sospesi (TSS), prima di procedere alla disinfezione.
- Il trattamento di disinfezione per *pastorizzazione* è piuttosto economico ed efficace per il riuso agricolo, in quanto esistono una serie di soluzioni ingegneristiche che permettono l'ottimizzazione in termini di rendimento sia tecnico che economico (abbinato ad un primo processo di *sedimentazione e filtrazione*).
- In alternativa, il processo di disinfezione con *ferrato* garantisce un ottimo livello di disinfezione delle acque in luogo di un trascurabile impatto in termine di sottoprodotti (soprattutto ossido ferrico) e di costo di reagenti (solidi, cloruro ferrico e ipoclorito di sodio).
- I processi di trattamento delle acque reflue necessari alla loro stabilizzazione chimica e microbiologica, consentono il monitoraggio di *parametri di processo*, più semplici, rapidi

ed economici da controllare rispetto al controllo esaustivo di lunghe liste di *parametri di qualità dell'acqua*, nell'ambito del riuso di tali acque a fini irrigui.

Alcune criticità osservate nelle attività di depurazione dell'acqua hanno messo in luce una serie di circostanze d'interesse scientifico ed ecologico relativamente all'immissione nell'ambiente di nuove molecole e materiali. L'impossibilità di alcuni processi di depurazione di abbattere le concentrazioni e gli effetti indiretti della presenza di contaminanti emergenti in acque reflue depurate rappresentano in effetti delle sfide per l'analisi di rischio. Nello specifico:

- Dati provvisori sulla presenza di *nanomateriali ingegnerizzati* nelle acque reflue indicano che, quando osservata, potrebbe non rappresentare ad oggi un rischio significativo, in quanto l'esposizione diretta della persona è probabilmente superiore. Tali materiali sono in genere contenuti nei prodotti farmaceutici, della cosmesi e della cura della persona, e domestici.
- Il rischio associato alla presenza di interferenti endocrini nelle acque è oggetto di dibattito nella comunità scientifica e negli organi gestionali.
- La maggior parte delle sostanze chimiche in tracce non viene decomposta se non attraverso processi di disinfezione avanzata AOP; potendo dunque dare luogo ad accumulo nei terreni e nelle piante coltivate.
- Alcuni processi di depurazione possono incrementare la *resistenza agli antibiotici* per alcuni ceppi di microorganismi, producendo indirettamente la selezione dei più resistenti.

Sulla base di quanto illustrato, in merito a quanto concerne l'impatto delle acque reflue depurate sull'attività agricola, si possono quindi esprimere le seguenti valutazioni conclusive:

- La necessità di uno schema normativo dedicato al riutilizzo delle acque reflue in agricoltura deve incardinarsi alle norme di legislazione alimentare in particolare per quanto attiene alle responsabilità dell'OSA<sup>9</sup> di cui all'allegato I, parte A, del Regolamento (CE) 852/2004, di utilizzo di acque potabili, o acqua pulita, ove necessario, integrate dalle rilevanti indicazioni emesse dalla (CE) in documenti successivi.
- Relativamente al controllo del rischio microbiologico delle acque reflue destinate ad uso irriguo di colture alimentari, si raccomanda, come requisito minimo, il monitoraggio del parametro *Escherichia coli*, indicatore di contaminazione fecale e indice della possibile presenza di batteri patogeni di origine enterica, quali *Salmonella spp*, *Campylobacter spp*, *Escherichia coli* produttore di shigatossina. La scelta di tale indicatore si correla al fatto che la riduzione logaritmica del livello iniziale in seguito ad un eventuale trattamento delle acque, o al naturale decadimento al suolo o sulla superficie dei prodotti vegetali nonché in seguito al lavaggio dei vegetali, è paragonabile a quella dei batteri patogeni. A tal fine si suggeriscono:
  - un limite di  $\leq 1000$  UFC/100 mL (corrispondenti ai valori di MPN, *Most Probable Number*) presenti nella Tabella B.2 [97-Well Quanti Tray (Quanti-Tray/2000) MPN] del metodo ISO 9308-2:2012. Tale limite viene proposto in accordo con il parere dell'EFSA secondo cui una concentrazione di *Escherichia coli*  $\leq 10^3$  UFC 100 mL di acqua è associata ad una bassa probabilità di riscontro di batteri patogeni nell'acqua stessa. Il limite per *Escherichia coli* si propone, sia per le colture alimentari a consumo crudo che per quelle da consumarsi previa cottura. In

---

<sup>9</sup> Si ritiene opportuno riferirsi a OSA e imprese alimentari in modo da non comprendere nel campo di applicazione la produzione agricola non destinata al commercio.

quest'ultimo caso rappresenta una misura precauzionale atta a prevenire fenomeni di contaminazione crociata;

- una frequenza di campionamento bisettimanale per tutto il periodo irriguo, su almeno un sito ogni 5 ettari di area irrigua, per le colture alimentari a consumo crudo;
- una frequenza di campionamento mensile per tutto il periodo irriguo, su almeno un sito ogni 5 ettari di area irrigua, per le colture alimentari da consumarsi previa cottura.

Tali raccomandazioni sono ovviamente suscettibili di modifiche/integrazioni, dal momento che, allo stato attuale, sono disponibili dati molto limitati rispetto a contaminazione microbiologica delle acque reflue utilizzate per uso irriguo su colture alimentari, comportamento dei patogeni ai diversi trattamenti delle acque, persistenza di patogeni nel suolo e sulla superficie dei vegetali, possibilità di internalizzazione in alcuni vegetali, e rimozione della contaminazione dalla superficie dei vegetali, attraverso la comune pratica di lavaggio.

Per quanto riguarda il controllo del rischio chimico di acque destinate ad utilizzo irriguo si può considerare, allo stato, quanto segue:

- L'utilizzo in produzione primaria di acque idonee al consumo umano conformi al DL.vo 31/2001 e s.m.i è espressamente consentito dal Regolamento (CE) 852/2002; l'utilizzo di acque di origine superficiale o sotterranea in buono stato chimico e in buono stato ecologico ai sensi del DL.vo 152/2006 e s.m.i. e del DL.vo 30/2009, e di acque conformi ai requisiti di cui DM 185/2003 destinabili a fini irrigui, si considera rientrare nelle condizioni di "acqua pulita" di cui al citato regolamento ai fini della produzione primaria in quanto può generalmente garantire il controllo di rischi di natura chimica sulla produzione primaria, fatte salve circostanze di contaminazioni particolari che richiedano il controllo di inquinanti specifici in definiti territori.
- L'utilizzo di acque non conformi alle suddette normative da parte dell'OSA, responsabile della sicurezza igienico-sanitaria della produzione primaria, è comunque possibile, in conformità ai disposti normativi che definiscono la risorsa idrica utilizzata in produzione primaria come "acqua pulita". Può, in alcuni contesti, essere opportuna un'analisi di rischio sito-specifica per la produzione primaria che tenga in particolare conto della mobilità e biodisponibilità degli inquinanti dal suolo alla pianta, modalità di irrigazione, modalità di trattamento nella filiera agro-alimentare e destinazione d'uso dei prodotti primari, con particolare riguardo alla parte edibile, rispetto ai livelli di contaminanti tossicologicamente accettabili nei prodotti alimentari, parallelamente a tali valutazioni, il controllo sulla contaminazione delle acque utilizzate a fini irrigui è indirettamente assicurato dalla rispondenza della qualità dei suoli ai livelli normativi essendo la qualità chimica dei suoli comunque correlata alla "soluzione circolante" (ovvero alla fase liquida terreno), e alla conformità dei prodotti primari ai livelli di contaminanti ammissibili dalle specifiche norme.

La sicurezza igienico-sanitaria della produzione primaria da rischi di natura chimica deve dunque essere garantita dalla sorveglianza sui livelli di contaminazione chimica dei terreni utilizzati per fini agricoli e, parallelamente, dal rispetto dei livelli di contaminanti previsti per i prodotti alimentari dalle norme vigenti e dal *Codex Alimentarius*.

## BIBLIOGRAFIA

### Bibliografia citata

- Absi F, Gamache F, Gehr R, Liechtiand P, Nicell J. Pilot plant investigation of ozone disinfection of physico-chemically treated municipal wastewater. In: *Ozone in water and wastewater treatment, Proceedings of the 11<sup>th</sup> Ozone Congress*; San Francisco, California. Las Vegas: International Ozone Association; 1993. p. S733-S741
- Adams C, Wang Y, Loftin K, Meyer M. Removal of antibiotics from surface and distilled water in conventional water treatment processes. *Journal of Environmental Engineering* 2002;128(3):253.
- Department of Agriculture Western Australia. *Soil salinity tolerance of plants for agriculture and revegetation*. South Perth: Department of Agriculture, Western Australia; 2002. Disponibile all'indirizzo: [http://www.plantstress.com/articles/salinity\\_m/salinity\\_m\\_files/salt%20tol%20australia.htm](http://www.plantstress.com/articles/salinity_m/salinity_m_files/salt%20tol%20australia.htm); ultima consultazione 9/5/16.
- Alum A, Yoon Y, Westerhoff P, Abbaszadegan M. Oxidation of bisphenol A, 17beta-estradiol, and 17.alpha.-ethynyl estradiol and byproduct estrogenicity. *Environmental Toxicology* 2004;19(3):257.
- Amoah P, Keraita B, Akple M, Drechsel P, Abaidoo RC, Konradsen F. *Low-cost options for reducing consumer health risks from farm to fork where crops are irrigated with polluted water in West Africa*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute; 2011.
- ANZECC (Australian and New Zealand Environment Conservation Council), Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMCANZ). *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality*. Canberra: Commonwealth of Australia; 2000(a).
- ANZECC (Australian and New Zealand Environment Conservation Council), ARMCANZ (Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand). *National water quality management strategy. Australian guidelines for water quality monitoring and reporting, 7*. Canberra Commonwealth of Australia; 2000(b).
- Aqwise. *Integrated water & wastewater treatment solutions*. Herzliya, Israel: Aqwise - Wise Water Technologies Ltd.; 2010
- Arakaki T. pH dependent photoformation of hydroxyl radical and absorbance of aqueous-phase N(III) (HNO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>). *Environmental Engineering Science* 1999;33(15):2561.
- Asano T, Burton F, Leverenz H, Tsuchihashi R, Tchobanoglous G. *Water reuse: issues, technologies, and applications*. New York, NY: McGraw-Hill; 2007.
- Asano T, Leong LYC and Rigby MG. Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using enteric virus monitoring data. *Water Science and Technology*. 1992; 26:1513-24.
- Asano T. *Wastewater reclamation and reuse*. Lancaster, PA: Technomic Publishing Company; 1998.
- AWWA (American Water Works Association). *Water treatment membrane processes*. New York, NY. McGraw-Hill; 1996.
- AwwaRF (American Water Works Association Research Foundation). *Investigation on soil-aquifer treatment for sustainable water reuse*. Denver, CO: AwwaRF; 2001.
- Bellona C, Drewes JE, Oelker G, Luna J, Filteau G, Amy G. Comparing reverse osmosis and nanofiltration for water reclamation. *JAWWA* 2008;100(9):102-16.
- Ben-Gal A, Ityel E, Dudley L, Cohen S, Yermiyahu U, Presnov E, Zigmond L, Shani U. Effect of irrigation water salinity on transpiration and on leaching requirements: A case study for bell peppers. *Agric Water Manag* 2008;95:587-97.

- Ben-Gal A, Shani U. Yield, transpiration and growth of tomatoes under combined excess boron and salinity stress. *Plant Soil* 2002;247:211-21.
- Ben-Gal A, Yermiyahu U, Cohen S, Fertilization and blending alternatives for irrigation with desalinated water. *J Environ Quality* 2009;38:529-36.
- Bitton G. *Wastewater microbiology*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: NY Wiley-Liss Pub; 1999.
- Black & Veatch Corporation. *White's handbook of chlorination and alternative disinfectants*, 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc; 2010.
- Blanch AR, Jofre J. Emerging pathogens in wastewaters. *The Handbook of Environmental Chemistry* 2004;5(1):141.
- Bockelmann U, Dorries H, Ayuso-Gabella MN, de Marçay MS, Tandoi V, Levantesi C, Masciopinto C, Van Houtte E, Szewzyk U, Wintgens T, Grohmann E. Quantitative PCR monitoring of antibiotic resistance genes and bacterial pathogens in three European artificial groundwater recharge systems. *Applied Environmental Microbiology* 2009;75:154.
- Bonadonna L, Briancesco R, Ottaviani M, Veschetti E. Occurrence of *Cryptosporidium* oocysts in sewage effluents and correlation with microbial, chemical and physical water variables. *Environmental Monitoring and Assessment* 2002;75:241.
- Bonne PAC, Hofman JAMH, van der Hoek JP. Long-term capacity of biological activated carbon filtration for organics removal. *Water Science and Technology: Water Supply* 2006;2(1):139.
- Brahman KD, Kazi TG, Baig JA, Afridi HI, Khan A, Arain SS, Arain MB. Fluoride and arsenic exposure through water and grain crops in Nagarparkar, Pakistan. *Chemosphere* 2014;100:182-3.
- Brentwood Industries (Ed.). *Integrated fixed Film/Activated Sludge (IFAS) technology*. Reading, PA: Brentwood Industries Inc.; 2009.
- Bridgman SA, Robertson RM, Syed Q, Speed N, Andrews N, Hunter PR. Outbreak of cryptosporidiosis associated with a disinfected groundwater supply. *Epidemiology and Infection* 1995;115(3):555.
- Carey RO, Migliaccio KW. Contribution of wastewater treatment effluents to nutrient dynamics in aquatic systems: a review. *Environmental Management* 2009;44(2):205.
- Cattaneo P, Bernardi C. *Molluschi bivalvi vivi ed echinodermi, tunicati e gasteropodi marini vivi*. Milano: Dipartimento di Scienze e Tecnologie Veterinarie per la Sicurezza Alimentare, Facoltà di Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Milano; 2010. (Food in, Collezione di studi sull'ispezione degli alimenti di origine animale Volume 1).
- CDPH (California Department of Public Health). *Alternative treatment technology report for recycled water*. San Diego, CA: CDPH; 2012.
- Chevrefils G, Caron E, Wright H, Sakamoto G, Payment P, Bargeau B, Cairns B. UV Dose required to achieve incremental log inactivation of bacteria, protozoa, and viruses. *IUVA News* 2006;8(1):38.
- Cirelli GL, Consoli S, Licciardello F, Aiello R, Giuffrida F, Leonardi C. Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. *Agricultural Water Management* 2012;104:163.
- Clara M, Strenn B, Kreuzinger N. Carbamezapine as a possible anthropogenic marker in the aquatic environment: investigations on the behavior of carbamezapine in wastewater treatment and during groundwater recharge. *Water Research* 2004;38:947.
- Colford JM, Hilton JF, Wright CC, Arnold BF, Saha S, Wade TJ, Scott J, Eisenberg JNS. The Sonoma water evaluation trial: a randomized drinking water intervention trial to reduce gastrointestinal illness in older adults. *American Journal of Public Health* 2009;99(11):1988.
- Cooper R. Comparison of the resistance of MS-2 and Poliovirus to UV and chlorine disinfection. *Water Reuse Association Symposium XV, September 12-15, 2000. Napa, CA. 2000*

- Cresswell G, Weir R. *Plant nutrient disorders. 5: Ornamental plants and shrubs*. Melbourne: Inkata Press; 1997.
- Curriero FC, Patz J, Rose JB, Subhash L. The association between extreme precipitation and waterborne disease outbreaks in the United States, 1948-1994. *American Journal of Public Health* 2001;91(8):1164-99.
- Da Silva AK, Le Saux JC, Parnaudeau S, Pommepuy M, Elimelech M, Le Guyader FS. Evaluation of Removal of Noroviruses during Wastewater Treatment, Using Real-Time Reverse Transcription-PCR: Different Behaviors of Genogroups I and II. *Applied Environmental Microbiology* 2007;73(24):7891.
- Dahal BM, Fuerhacker M, Mentler A, Karki KB, Shrestha RR, Blum WEH. Arsenic contamination of soils and agricultural plants through irrigation water in Nepal. *Environmental Pollution* 2007;155(1):157-63.
- Dhanapal LP, Morse AN. Effect of analgesics and their derivatives on antibiotic resistance of environmental microbes. *Water Science and Technology* 2009;59:1823.
- Dickenson E, Drewes JE, Snyder S, Sedlak D. Applying surrogates to determine the efficacy of groundwater recharge systems for the removal of wastewater organic contaminants. In: *Ahupua'a - Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2008. Vol. 316*. 2008.
- Dickenson ERV, Drewes JE, Sedlak DL, Wert E, Snyder SA. Applying surrogates and indicators to assess removal efficiency of trace organic chemicals during chemical oxidation of wastewater. *Environmental Science & Technology* 2009;43:6242.
- Drewes JE, Jekel M. Behavior of DOC and AOX using advanced treated wastewater for groundwater recharge. *Water Research* 1998;32:3125.
- Drewes JE, Khan S. Water reuse for drinking water augmentation. In: *Water quality and treatment*. 6th ed. Denver, CO: American Water Works Association; 2010. par. 16.1-16.48.
- Drewes JE, Quanrud DM, Amy GL, Westerhoff PK. Character of organic matter in soil-aquifer treatment systems. *ASCE Journal of Environmental Engineering* 2006;132:1447.
- EFSA (European Food Safety Authority). EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM); Scientific opinion on arsenic in food. *EFSA Journal* 2009a; 7(10):1351, 199 pp.
- EFSA (European Food Safety Authority). Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on cadmium in food. *EFSA Journal* 2009b;980:1-139.
- EFSA (European Food Safety Authority). Scientific opinion on lead in food. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). *EFSA Journal* 2010;8(4):1570, 151 pp.
- EFSA (European Food Safety Authority). Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). *EFSA Journal* 2012;10(12):2985, 241 pp.
- EFSA (European Food Safety Authority). Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of chromium in food and drinking water. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain Panel (CONTAM). *EFSA Journal* 2014;12(3):3595, 261 pp.
- Enne G, Greppi G, Serrantoni M. Il ruolo dell'acqua nell'allevamento animale. *Italian Journal of Agronomy* 2006;1 (3 Suppl.):519-27.
- EPA. *Disinfection profiling and benchmarking guidance manual*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency; 1991. (EPA 815/R-99/013).
- EPA. *Draft ultraviolet disinfection guidance manual*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency; 2003. (EPA 815-D-03-007).
- EPA. *Guidelines for water reuse*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency; 2004. (EPA. 625/R04/108).

- EPA. *Guidelines for water reuse*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency; 2012. (EPA 600-R-12-618).
- EPHC (Environment Protection and Heritage Council), NHMRC (National Health and Medical Research Council), NRMMC (Natural Resource Management Ministerial Council). *Australian guidelines for water recycling: augmentation of drinking water supplies*. Canberra, Australia: Environment Protection and Heritage Council; 2008.
- EPHC (Environment Protection and Heritage Council), NRM (Natural Resource Management Ministerial Council), AHMC (Australian Health Ministers' Conference). *Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental risks (phase1)*. EPHC, NRM, AHMC;2006.
- Evans PJ. Nature works: biological treatment methods yield high-quality water. *Opflow* 2010;36(7):12.
- FAO. *Water quality in agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. (FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1).
- Feachem RG, Bradley DJ, Garelick H, Mara DD. Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management. Chichester, UK: John Wiley & Sons; 1983. (World Bank Studies in Water Supply and Sanitation 3).
- Fox P, Aboshanp W, Alsmadi B. Analysis of soils to demonstrate sustained organic carbon removal during soil aquifer treatment. *Journal of Environmental Quality* 2005;34:156-163.
- Fox P, Drewes JE. Monitoring requirements for groundwater under the influence of reclaimed water. *Journal of Environmental Assessment and Monitoring* 2001;70:117.
- Geldreich EE. Microbiological quality of source waters for water supply. In: *Drinking water microbiology: progress and recent developments*. New York, NY: Springer-Verlag; 1990. p. 3-31.
- Gennaccaro AL, McLaughlin M, Quintero-Betancourt W, Huffman D, Rose J. Infectious *Cryptosporidium parvum* oocysts in final reclaimed effluent. *Applied and Environmental Microbiology* 2003;69(8):4983.
- Glaze WH, Kang JW, Chapin D. The chemistry of water-treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide, and ultraviolet radiation. *Ozone Science and Engineering* 1987;9(4):335.
- GWRC. *Occurrence and potential for human health impacts of pharmaceuticals in the water system science brief*. London: Global Water Research Coalition; 2009.
- Haas CN, Rose JB, Gerba CP. *Quantitative microbial risk assessment*. New York, NY: John Wiley & Sons Inc.; 1999.
- Hancock CM, Rose JB, Callahan M. Cryptosporidium and Giardia in US groundwater. *Journal of the American Water Works Association* 1998;90(3):58.
- Haramoto E, Katayama H, Oguma K, Ohgaki S. Quantitative analysis of human enteric adenoviruses in aquatic environments. *Journal of Applied Microbiology* 2007;103:2153.
- Harris GD, Adams V, Sorensen D, Curtis M. Ultraviolet inactivation of selected bacteria and viruses with photoreactivation of the bacteria. *Water Research* 1987;21(6):687.
- Harwood VJ, Levine AD, Scott TM, Chivukula V, Lukasik J, Farrah SR, Rose JB. Validity of the indicator organism paradigm for pathogen reduction in reclaimed water and public health protection. *Applied and Environmental Microbiology* 2005;71(6):3163.
- Havelaar AH, van Olphen M, Drost YC. F-specific RNA bacteriophages are adequate model organisms for enteric viruses in fresh water. *Applied Environmental Microbiology* 1993;59:2956.
- Heberer T. Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: a review of recent research data. *Toxicology Letters* 2002;131(1-2):5.

- Huber MM, Korhonen S, Ternes TA, Von Gunten U. Oxidation of pharmaceuticals during water treatment with chlorine dioxide. *Water Research* 2005;39(15):3607.
- Huffman D, Gennaccaro AL, Berg TL, Batzer G, Widmer G. Detection of infectious parasites in reclaimed water. *Water Environment Research* 2006;78(12):2297.
- Hurst CJ, Benton WH, Stetler RE. Detecting viruses in water. *Journal of the American Water Works Association* 1989;81(9):71.
- Ishida C, Salvesson A, Robinson K, Bowman R, Snyder S. Ozone disinfection with the HiPOXTM reactor: streamlining an “old technology” for wastewater reuse. *Water Science and Technology* 2008;58(9):1765.
- ISO 9308. *Water quality – Enumeration of Escherichia coli and coliform bacteria – Part 2: Most probable number method*. Geneva: International Organization for Standardization; 2012.
- Janex ML, Savoye P, Xu P, Rodriguez J, Lazarova V. Ozone for urban wastewater disinfection: a new efficient alternative solution. In: *Proceedings of the Specialized Conference on Fundamental and Engineering Concepts for Ozone Reactor Design; Toulouse, France*. Stamford, Connecticut: International Ozone Association; 2000. p. 95-8.
- Jolis D, Lam C, Pitt P. Particle effects on ultraviolet disinfection of coliform bacteria in recycled water. *Water Environment Research* 2001;73(2):233.
- JRC Science and Policy Reports. Water Reuse in Europe. *Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation. A synoptic overview*. Laura Alcalde Sanz, Bernd Manfred Gawlik, 2014
- Kaegi R, Voegelin A, Sinnet B, Zuleeg S, Hagendorfer H, Burkhardt M, Siegris H. Behavior of metallic silver nanoparticles in a pilot wastewater treatment plant. *Environmental Science & Technology* 2011;45(9):3902.
- Kalavrouziotis IK, Robolas P, Koukoulakis PH, Papadopoulos AH. Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro- and micro-elements status of soil and of Brassica oleracea var. Italica, and B. oleracea var. Gemmifera. *Agricultural Water Management* 2008;95(4):419-426
- Kiser MA, Westerhoff P, Benn T, Wang Y, Pérez-Rivera J, Hristovski K. Titanium nanomaterial removal and release from wastewater treatment plants. *Environmental Science & Technology* 2009;43:6757.
- Klijin N, Nieuwenhof FFJ, Hoolwerf JD, Van Der Waals C, Weerkamp AH. Identification of Clostridium tyrobutyricum as the causative agent of late blowing in cheese by species-specific PCR amplification” *Applied And Environmental Microbiology* 1995;61(8):2919-24.
- Knapp CW, Dolfing J, Ehlert PAI, Graham DW. Evidence of increasing antibiotic resistance gene abundances in archived soils since 1940. *Environmental Science & Technology* 2010;44:580.
- Kopchynski T, Fox P, Alsmadi B, Berner M. The effects of soil type and effluent pre-treatment on soil aquifer treatment. *Water Science & Technology* 1996;34(11):235.
- La Rosa G, Fratini M, della Libera S, Iaconelli M, Muscillo M. Emerging and potentially emerging viruses in water environments. *Ann Ist Super Sanità* 2012;48(4):397-406.
- Lazarova V, Levine B, Renaud P. Wastewater reclamation in Africa : assessment of the reuse applications and available technologies. In: *Proceedings IXème Congrès de l’Union Africaine des Distributeurs d’Eau*, Casablanca, 16-20 February 1998. 16p.
- Lindenauer KG, Darby JL. Ultraviolet disinfection of wastewater - effect of dose on subsequent photoreactivation. *Water Research* 1994;28(4):805.
- Maas EV. Salt tolerance of plants. *Applied Agricultural Research* 1986;1:12-25.
- Maas EV. Salt tolerance of plants. In: Christie BR (Ed.). *CRC Handbook of plant science in agriculture*. Boca Raton: CRC Press Inc; 1987.

- Mara D, Hamilton A, Sleight A, Karavarsamis N. *Updating the 2006 WHO guidelines. More appropriate tolerable additional burden of disease. Improved determination of annual risks. Norovirus and Ascaris infection risks. Extended health-protection control measures: Treatment and non-treatment options*. Geneva: World Health Organization; 2010.
- Mara D, Horan N. *Handbook of water and wastewater microbiology*. London: Academic Press; 2003
- Mara DD, Silva SA. Removal of intestinal nematode eggs in tropical waste stabilization ponds. *Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 1986;89(2):71.
- Metcalf and Eddy. *Wastewater engineering, treatment and reuse*. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill; 2003.
- Miège C, Choubert JM, Ribeiro L, Eusèbe M, Coquery M. Removal efficiency of pharmaceuticals and personal care products with varying wastewater treatment processes and operating conditions – conception of a database and first results. *Water Science and Technology* 2008;57(1):49.
- Millán R, Elvira E, Zornoza P, Sierra MJ Could an abandoned mercury mine area be cropped? *Environmental Research* 2013;125:150-9.
- Miller JH, Ela WP, Lansley KE, Chipello PL, Arnold RG. Nitrogen transformations during soil–aquifer treatment of wastewater effluent – oxygen effects in field studies. *ASCE Journal of Environmental Engineering* 2006:132.
- MIPAAF (Ministero Delle Politiche Agricole E Forestali). *Metodi di analisi delle acque per uso agricolo e zootecnico*. Milano: Franco Angeli Editore, 2011.
- Munter R. Advanced oxidation processes-current status and prospects. *Proceedings of the Estonian Academy of Science and Chemistry* 2001;50(2):59.
- Nalinakumari B, Cha W, Fox P. Effects of primary substrate concentration on N-nitrosodimethylamine (NDMA) during simulated aquifer recharge. *ASCE Journal of Environmental Engineering* 2010;136(4):373-80.
- National Research Council (NRC). 1996. *Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production*. National Academy Press, Washington, D.C.
- National Research Council (NRC). 1998. *Issues in Potable Reuse: The Viability of Augmenting Drinking Water Supplies with Reclaimed Water*. Committee to Evaluate the Viability of Augmenting Potable Water Supplies with Reclaimed Water, National Research Council. Washington, D.C.
- National Research Council (NRC). 2012. *Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply Through Reuse of Municipal Wastewater*. The National Academies Press: Washington, D.C.
- National Water Research Institute (NWRI). 2012. *Ultraviolet Disinfection Guidelines for Drinking Water and Water Reuse, 3rd Edition*. National Water Research Institute. Fountain Valley, CA.
- Ni C, Chen J, Tsai Y, Chen W, Chen C. Ozonation of domestic secondary effluent for recycling and reuse - a pilot plant study. *Water Science and Technology* 2002;46(4-5):361.
- Noor-ul- A, Hussain A, Alamzeb S, Begum S, 2012, “Accumulation of heavy metals in edible parts of vegetables irrigated with waste water and their daily intake to adults and children, District Mardan, Pakistan” *Food Chemistry*. 136(1515-1523)
- O'Brien N, Cummins E. Ranking initial environmental and human health risk resulting from environmentally relevant nanomaterials. *Journal of Environmental Science and Health Part A* 2010;45(8):992-1007.
- Oragui JI, Curtis TP, Silva SA, Mara DD. Removal of excreted bacteria and viruses in deep waste stabilization ponds in northeast Brazil. *Water Science and Technology* 1987;19:569.
- Pauwels B, Verstraete W. The treatment of hospital wastewater: An appraisal. *Journal of Water and Health* 2006;4:405.

- Petterson SR, Ashbolt NJ, Sharma A. Microbial risks from wastewater irrigation of salad crops: a screening-level risk assessment. *Water Environment Research* 2001;72:667-72.
- Rattan RK, Datta SP, Chhonkar PK, Suribabu K, Singh AK. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater - a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 2005;109:310-22.
- Rauch-Williams T, Hoppe-Jones C, Drewes JE. The role of organic matter in the removal of emerging trace organic chemicals during managed aquifer recharge. *Water Research* 2010;44(2):449.
- Rose JB, Daeschner S, Easterling DR, Curriero FC, Lele S, Patz JA. Climate and waterborne disease outbreaks. *Journal of the American Water Works Association* 2000;92(9):77.
- Rose JB, Dickson LJ, Farrah SR, Carnahan RP. Removal of pathogenic and indicator microorganisms by a full-scale water reclamation facility. *Water Research* 1996;30:2785.
- Rose JB, Huffman DE, Riley K, Farrah SR, Lukasik JO, Hamann CL. Reduction of enteric microorganisms at the Upper Occoquan Sewage Authority water reclamation plant. *Water Environment Research* 2001;73:711.
- Sagik BP, Moore BE, Sorber CA. Infectious disease potential of land application of wastewater. In: *State of knowledge in land treatment of wastewater, Vol. 1. Proceedings of an International Symposium*. Hanover, New Hampshire: U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory; 1978. p. 35-46.
- Savage N, Diallo M. Nanomaterials and water purification: opportunities and challenges. *Journal of Nanoparticle Research* 2005;7:331
- Shani U, Ben-Gal A, Tripler E, Dudley LM. Plant response to the soil environment: an analytical model integrating yield, water, soil type and salinity. *Water Resources Res* 2007;43:W08418, 10.1029/2006WR005313.
- Shechter RI. Energy efficiency and performance of a full scale membrane aerated biofilm reactor. In: *Water Environment Federation (WEFTEC®) Technical Session Biofilm Models and Reactors*, 29th September 2015, Chicago (IL), USA.
- Sheikh B, Cooper RC, Israel KE. Hygienic evaluation of reclaimed water used to irrigate food crops—a case study. *Water Science Technology* 1999;40(4-5):261.
- Sheikh B, Cort RP, Kirkpatrick WR, Jaques RS, Asano T. Monterey Wastewater reclamation study for agriculture. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation* 1990;62(3):216.
- Snyder SA, Stanford BD, Bruce GM, Pleus RC, Drewes JE. *Identifying hormonally active compounds, pharmaceuticals, and personal care product ingredients of potential health concern from potential presence in water intended for indirect potable reuse*. Alexandria, VA: WateReuse Research Foundation; 2010.
- Stasinakis AS. Use of selected Advance Oxidation Processes (AOPs) for wastewater treatment-mini review. *Global NEST Journal* 2008;10(3):376
- Surdyk N, Cary L, Blagojevic S, Jovanovic Z, Stikic R, Vucelic-Radovic B, Zarkovic B, Sandei L, Kloppmann W, Pettenati M. Impact of irrigation with treated low quality water on the heavy metal contents of a soil-crop system in Serbia. *Agricultural Water Management* 2010;98(3 Special Issue):451-7.
- Szerwinski A, Bell KY, Bordewick K. Chloramination in a partially nitrified effluent: process control solutions and case study. In: *Proceedings of the 85th WEFTEC 2012; New Orleans, Louisiana, Sep. 29-Oct. 3*; Alexandria, Virginia: Water Environment Federation; 2012.
- Tanaka H, Asano T, Schroeder, Tchobanoglous G. Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data. *Water Environment Research* 1998;70:39-51

- Ternes T A, Joss A. *Human Pharmaceuticals, hormones and fragrances: the challenge of micropollutants in urban water management*. London: IWA Publishing; 2006.
- TYPSA. *Updated report on wastewater reuse in the European Union. Service contract for the support to the follow-up of the communication on water scarcity and droughts*. TYPSA; 2013.
- van der Aa LTJ, Kolpa RJ, Magic-Knezev A, Rietveld L C, van Dijk JC. Biological activated carbon filtration: pilot experiments in the Netherlands. In: *Water Technology Conference, Philadelphia, November 2-6, 2003*.
- van Ginneken M, Oron G. Risk assessment of consuming agricultural products irrigated with reclaimed wastewater: an exposure model. *Water Resources Research* 2000;36:2691-9.
- Watts RJ, Kong S, Dippre M, Bames WT. Oxidation of sorbed hexachlorobenzene in soils using catalyzed hydrogen peroxide. *Journal of Hazardous Materials* 1994;39(1):33.
- WEF (Water Environment Federation), AWWA (American Water Works Association). *Using reclaimed water to augment potable water resources*. 2nd ed. Denver, CO: American Water Works Association; 2008.
- WEF. *WEF Manual of Practice No. 8, Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. 5th ed. Alexandria, VA: Water Environment Federation Press; 2010.
- WERF. *Disinfection of wastewater effluent – comparison of alternative technologies*. Final Report 04-HHE-4. Alexandria, VA: Water Environment Research Foundation; 2008.
- Westerhoff P, Yoon Y, Snyder SA, Wert E. Fate of endocrine-disruptor, pharmaceutical, and personal care product chemicals during simulated drinking water treatment processes. *Environmental Science & Technology* 2005;39:6649.
- WHO. *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture*. Geneva: World Health Organization; 1989. (Technical Report Series 77)8.
- WHO. *Pharmaceuticals in drinking water*. Geneva: World Health Organization; 2011. (WHO/HSE/WSH/11.05).
- WHO. *Sanitation safety planning: manual for safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta*. Geneva: World Health Organization; 2015.
- WHO. *Water safety plans. Managing drinking-water quality from catchment to consumer*. Geneva: World Health Organization; 2005.
- WHO. *WHO annual report on infectious disease: overcoming antimicrobial resistance*. Geneva: World Health Organization; 2000.
- WHO. *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater - Volume IV: Excreta and greywater use in agriculture*. Geneva: World Health Organization; 2006 .
- Willocks L, Crampin A, Milne L, Seng C, Susman M, Gair R, Mouldsdale M, Shafi S, Wall R, Wiggins R, Lightfoot N. A large outbreak of cryptosporidiosis associated with a public water supply from a deep chalk borehole. *Communicable Disease and Public Health* 1998;1(4):239.
- WRRF. *Attenuation of Emerging contaminants in stream augmentation with recycled water*. Alexandria, VA: WateReuse Research Foundation; 2011. (WRF Report 06-20-1)
- WRRF. *Potential infectivity assay for Giardia lamblia cysts*. Alexandria, VA: WateReuse Research Foundation; 2012a. WRF-08-18.
- WRRF. *Demonstration of filtration and disinfection compliance through SAT*. WateReuse Research Foundation; 2012b. (WRF-10-10)
- WRRF. *Challenge projects on low energy treatment schemes for water reuse, phase I*. WateReuse Research Foundation; 2012c. (WRF-10-06)

- Wunder DB, Horstman VA, Hozalski RM. Antibiotics in slow-rate biofiltration processes: biosorption kinetics and equilibrium. *American Water Works Association Water Quality Technology Conference Proceedings*, 2008. p. 3524-37.
- Yates MV, Gerba CP. Microbial considerations in wastewater reclamation and reuse. In: Asano T (Ed.). *Wastewater reclamation and reuse. Vol. 10*. Boca Raton, FL: CRC Press; 1998. p. 437-88.
- Yermiyahu U, Ben-Gal A, Keren R, Reid RJ. Combined effect of salinity and excess boron on plant growth and yield. *Plant and Soil* 2008;304:73-87.

## Riferimenti normativi

- Europa. *Comunicazione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. L'anello mancante - Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare*. Bruxelles: Commissione Europea; 2015. (COM(2015) 614 final)
- Europa. *Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato Delle Regioni. Piano per la salvaguardia delle risorse idriche europee*. Bruxelles: Commissione Europea; 2012. (COM(2012) 673 final).
- Europa. Direttiva 98/83/CE del Consiglio del 3 novembre 1998 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano. *Gazzetta ufficiale delle Comunità europee* L 330/32, 5.12.1998.
- Europa. Direttiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2000 che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque. *Gazzetta ufficiale delle Comunità europee* L 327/1, 22.12.2000.
- Europa. Direttiva 2003/53/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 18 giugno 2003 che modifica per la ventiseiesima volta la direttiva 76/769/CEE del Consiglio relativamente alle restrizioni in materia di immissione sul mercato e di uso di talune sostanze e preparati pericolosi (nonilfenolo, nonilfenolo etossilato, cemento). *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 178/24, 17.7.2003.
- Europa. Direttiva 2006/95/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 12 dicembre 2006 concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative al materiale elettrico destinato ad essere adoperato entro taluni limiti di tensione. *Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea* L 374/10, 27.12.2006.
- Europa. Direttiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2008 relativa a standard di qualità ambientale nel settore della politica delle acque, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive del Consiglio 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE e 86/280/CEE, nonché modifica della direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 348/84, 24.12.2008.
- Europa. *Documento di riferimento per la consultazione pubblica sulle opzioni strategiche per ottimizzare il riutilizzo delle acque nell'UE*. Bruxelles: Commissione Europea; 2014.
- Europa. Regolamento (CE) n. 178/2002 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 28 gennaio 2002 che stabilisce i principi e i requisiti generali della legislazione alimentare, istituisce l'Autorità europea per la sicurezza alimentare e fissa procedure nel campo della sicurezza alimentare. *Gazzetta ufficiale delle Comunità europee* L 31/1, 1.2.2002.
- Europa. Regolamento (CE) n. 1881/2006 della Commissione del 19 dicembre 2006 che definisce i tenori massimi di alcuni contaminanti nei prodotti alimentari. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 364/5, 20.12.2006.
- Europa. Regolamento (CE) n. 2073/2005 della Commissione del 15 novembre 2005 sui criteri microbiologici applicabili ai prodotti alimentari. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 338/1, 22.12.2005.

- Europa. Regolamento (CE) n. 2075/2005 della Commissione del 5 dicembre 2005 che definisce norme specifiche applicabili ai controlli ufficiali relativi alla presenza di Trichine nelle carni. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 338/60, 22.12.2005.
- Europa. Regolamento (CE) n. 396/2005 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 febbraio 2005 concernente i livelli massimi di residui di antiparassitari nei o sui prodotti alimentari e mangimi di origine vegetale e animale e che modifica la direttiva 91/414/CEE del Consiglio. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 70/1, 16.3.2005.
- Europa. Regolamento (CE) n. 852/2004 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 sull'igiene dei prodotti alimentari. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 139/1, 30.4.2004.
- Europa. Regolamento (CE) n. 853/2004 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 che stabilisce norme specifiche in materia di igiene per gli alimenti di origine animale. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 139/55, 30.4.2004.
- Europa. Regolamento (CE) n. 854/2004 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 che stabilisce norme specifiche per l'organizzazione di controlli ufficiali sui prodotti di origine animale destinati al consumo umano. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* n. L 139/206, 30.4.2004.
- Europa. Regolamento (UE) n. 212/2013 della Commissione dell'11 marzo 2013 che sostituisce l'allegato I del regolamento (CE) n. 396/2005 del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda le aggiunte e le modifiche concernenti i prodotti di cui a tale allegato. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 68/30, 12.3.2013.
- Europa. Regolamento (UE) n. 420/2011 della Commissione del 29 aprile 2011 che modifica il regolamento (CE) n. 1881/2006 che definisce i tenori massimi di alcuni contaminanti nei prodotti alimentari. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 111/3, 30.4.2011.
- European Commission. *Inception impact assessment on Minimum quality requirements for reused water in the EU (new EU legislation)*. Bruxelles: Directorate-General for Environment; 2016. (DG-ENV C1).
- Italia. Decreto Legislativo 16 marzo 2009, n. 30. Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento. *Gazzetta Ufficiale* n. 79 del 4 aprile 2009.
- Italia. Decreto Legislativo 2 febbraio 2001, n. 31 Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano. *Gazzetta Ufficiale* n. 52 del 3 marzo 2001.
- Italia. Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152. Norme in materia ambientale. *Gazzetta Ufficiale* n. 88 del 14 aprile 2006.
- Ministero dell'Ambiente. Decreto 12 giugno 2003, n. 185. Regolamento recante norme tecniche per il riutilizzo delle acque reflue in attuazione dell'articolo 26, comma 2, del decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152. *Gazzetta Ufficiale* n.169 del 23 luglio 2003.

## Siti di approfondimento

- ISTAT. Datawarehouse *CensimentoAgricoltura2010* disponibile all'indirizzo <http://dati-censimentoagricoltura.istat.it/>; ultima visita: 3/04/2016
- CREA- INRAN, Banca dati *Tabelle di composizione degli alimenti* disponibile all'indirizzo [http://nut.entecra.it/646/tabelle\\_di\\_composizione\\_degli\\_alimenti.html](http://nut.entecra.it/646/tabelle_di_composizione_degli_alimenti.html) ultima visita: 3/04/2016



*Serie Rapporti ISTISAN  
numero di maggio 2016, 3° Suppl.*

*Stampato in proprio  
Settore Attività Editoriali – Istituto Superiore di Sanità*

*Roma, maggio 2016*