

Giornate di formazione
“Acque potabili in Puglia: sorgenti, gestione e qualità”

Ordine dei Chimici della provincia di Bari
Modugno (BA), 30-31 Gennaio 2015



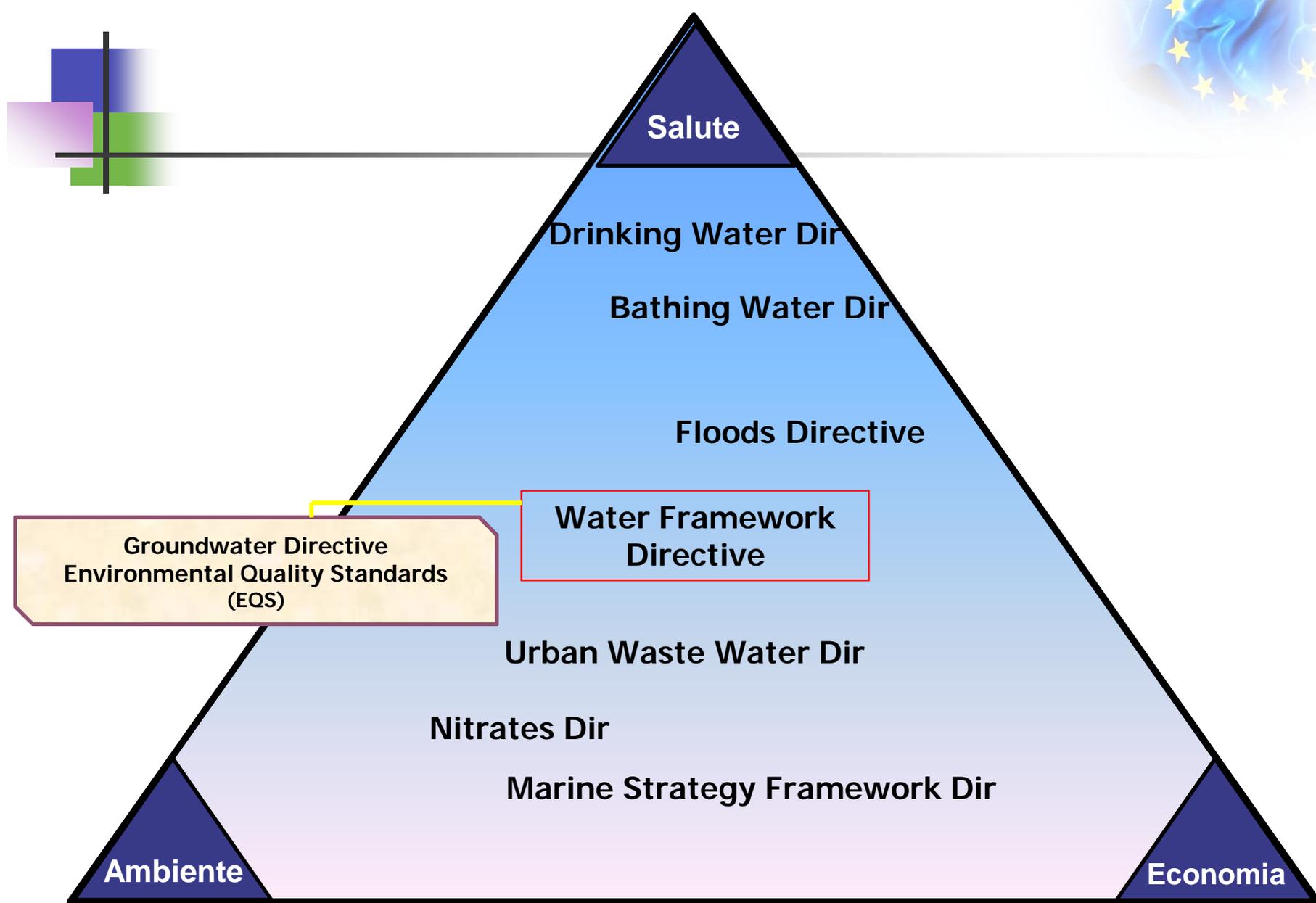
LA POTABILIZZAZIONE DELLE ACQUE:
aspetti igienico sanitari,
processi e tecnologie

ENRICO VESCHETTI



Istituto Superiore di Sanità - Dipartimento Ambiente e connessa Prevenzione Primaria

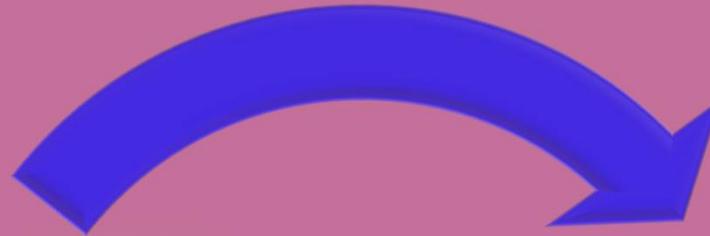
Normativa EU sulle acque



Salute umana



Drinking Water Directive
(Dir. 98/83/CE)

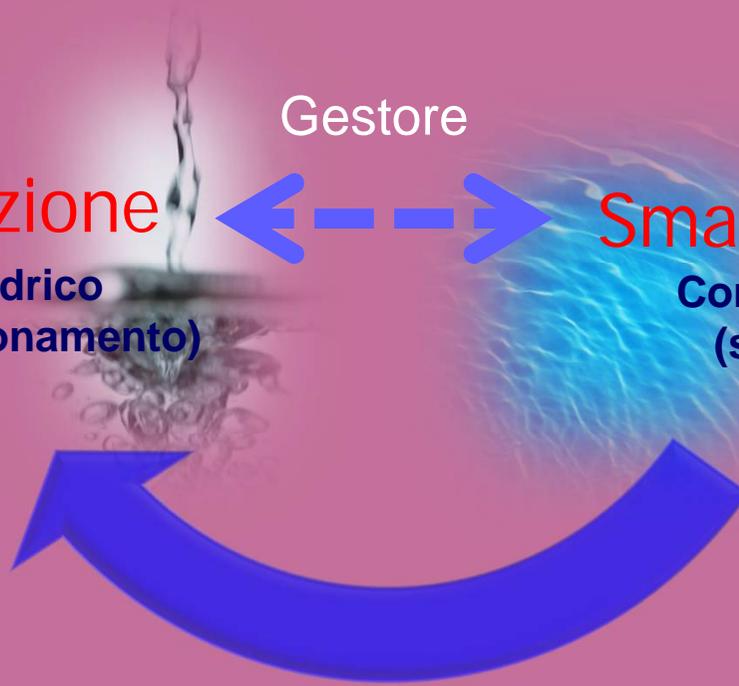


Salute e ambiente

Captazione
Corpo idrico
(approvvigionamento)



Smaltimento
Corpo idrico
(scarico)

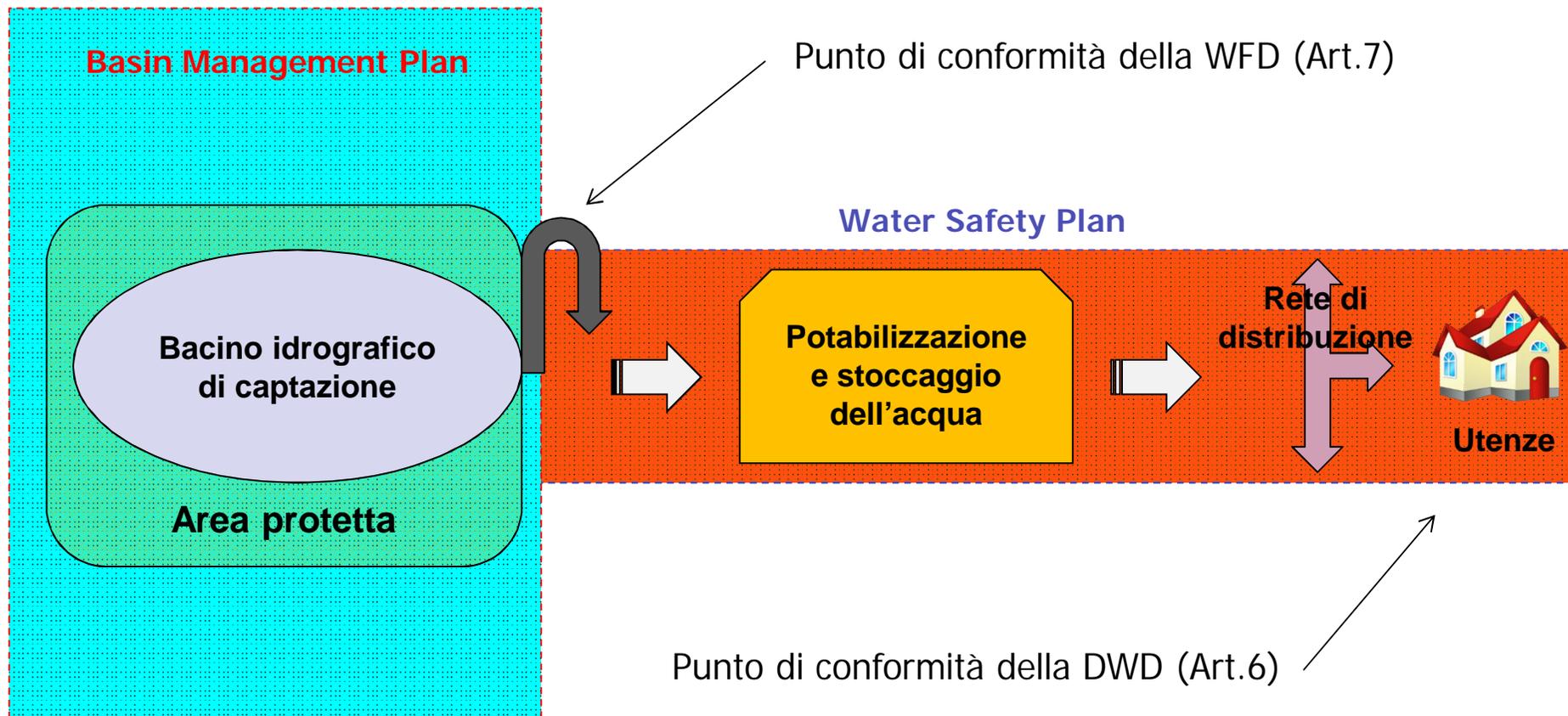


Water Framework Directive
(Dir. 2000/60/CE)

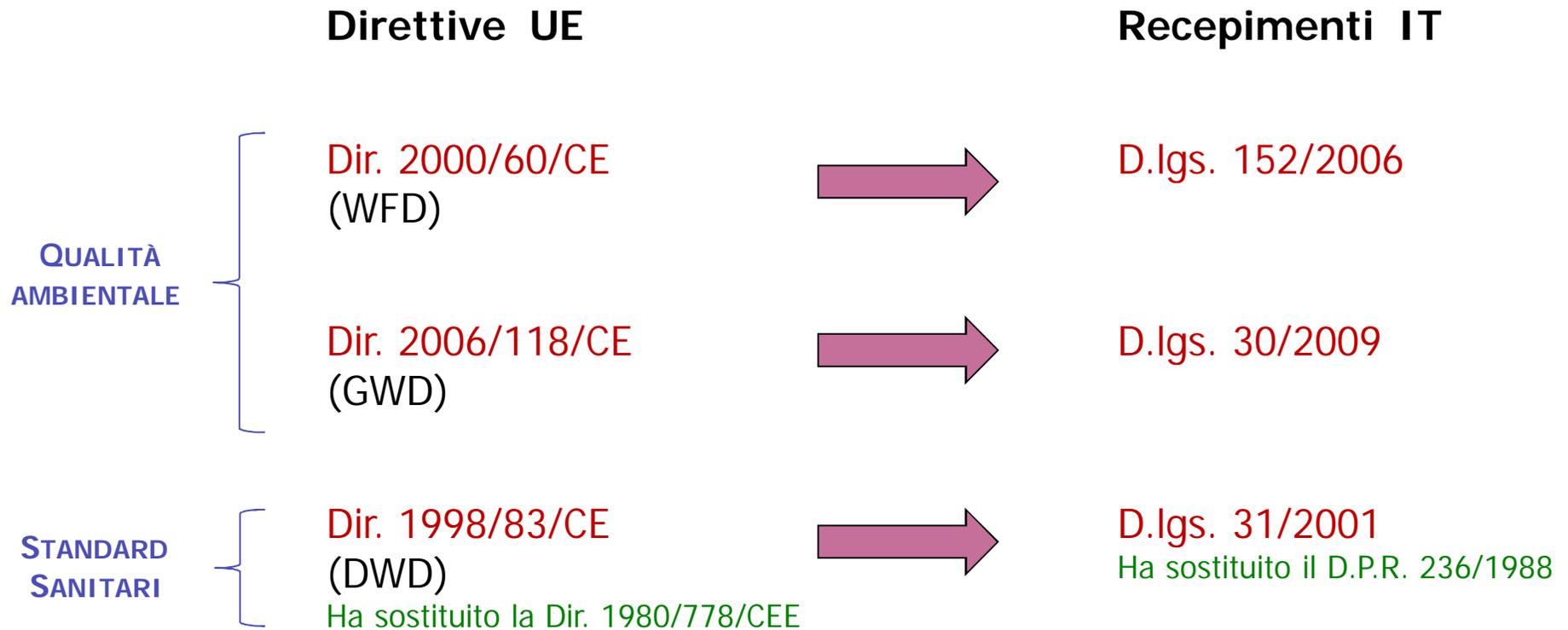
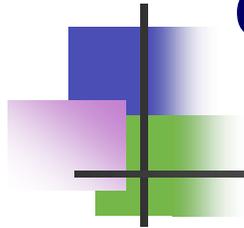


Qualità ambientale

Acqua destinata al consumo umano: approccio del WHO e regolamentazione UE



Acque destinate al consumo umano: dalla normativa UE a quella nazionale



D.lgs. 152/2006 e s.m.i.:

standard di qualità ambientale (buono stato chimico)

Tabelle 1/A, 1/B e 2/B: nella colonna d'acqua

N	CAS	Classificazione *1	Sostanza	SQA Media Annuale		SQA CMA
				Interne *2	Altre *3	

Elenco di 37 sostanze prioritarie + 51 sostanze non prioritarie + 9 sostanze per acque potabili: pesticidi, organoclorurati, IPA, fenoli, altri aromatici, organostannici, elementi pesanti, CN^- , F^- , NO_3^- , NO_2^-

*1 Prioritarie (P), Pericolose Prioritarie (PP), Rimanenti (E)

*2 Fiumi, laghi, corpi idrici artificiali/fortemente modificati

*3 Acque marino –costiere, territoriali, di transizione

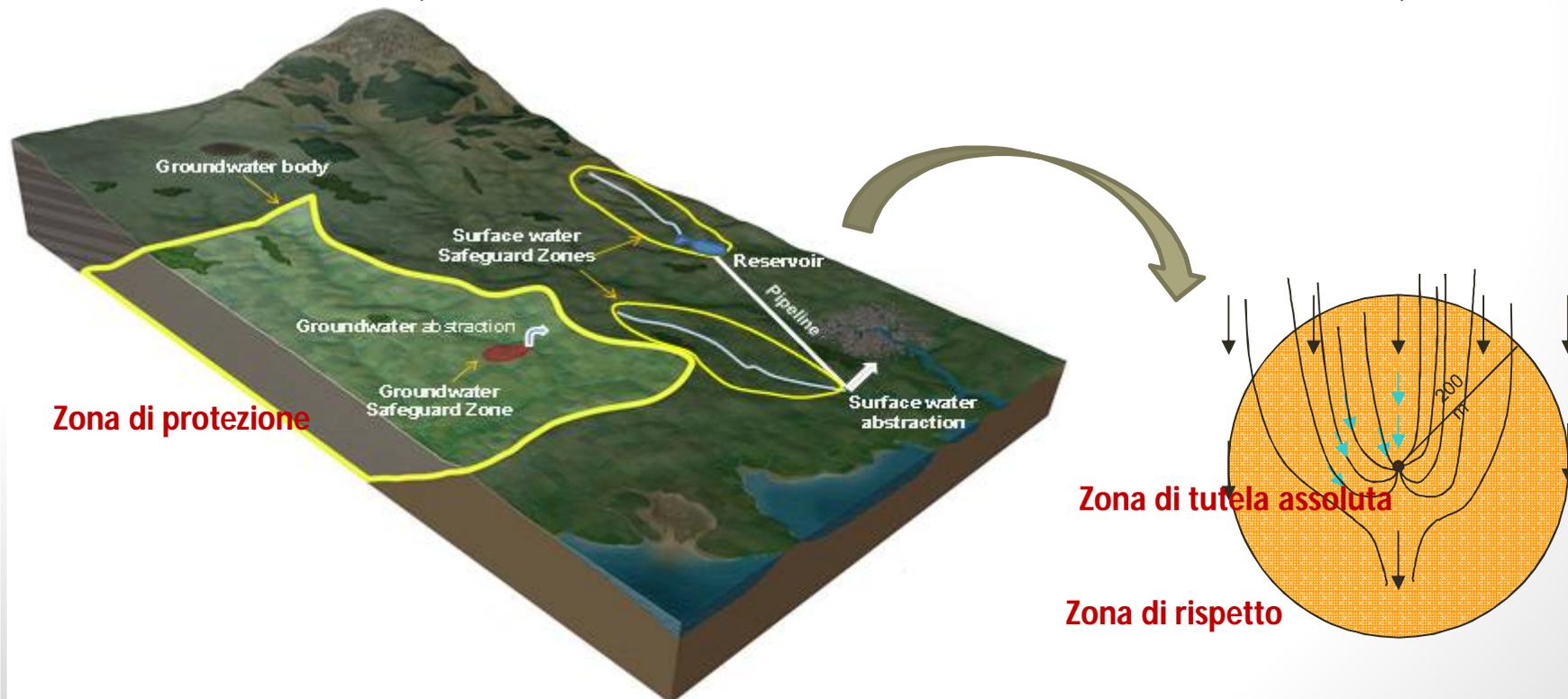
Acque territoriali: sono analizzate solo le sostanze immesse da attività antropiche o incidenti

D.lgs. 152/2006 e s.m.i.: aree di salvaguardia delle acque superficiali/sotterranee destinate al consumo umano

Aree individuate dalle Regioni su proposta delle Autorità d'ambito per mantenere/migliorare le caratteristiche di tali acque e per la tutela dello stato delle risorse

Classificazione:

- ZONE DI TUTELA ASSOLUTA (≥ 10 m dalla captazione/derivazione)
- ZONE DI RISPETTO (≥ 200 m dalla captazione/derivazione salvo disciplina regionale)
- ZONE DI PROTEZIONE (all'interno dei bacini imbriferi e delle aree di ricarica della falda)



D.lgs. 152/2006 e s.m.i.: classificazione di acque dolci per la produzione di acque potabili

Tabella 1/A: requisiti per la classificazione

N	Parametro	Unità di misura	A1		A2		A3	
			G	I	G	I	G	I

Elenco di 46 parametri:
chimico-fisici, organolettici, organoclorurati, tensioattivi, fenoli, HC e OC, IPA, pesticidi, O₂, NO₃⁻, F⁻, CN⁻, Cl⁻, N-kjeldahl, elementi pesanti

G: valore guida
I: valore imperativo

- A1:** trattamento fisico semplice + disinfezione
- A2:** trattamento fisico e chimico normale + disinfezione
- A3:** trattamento fisico e chimico spinto + affinamento + disinfezione
- >A3:** uso in via eccezionale previo trattamento avanzato

Deroghe ai limiti di Tab. 1/A:

- per inondazioni / catastrofi naturali
- in condizioni meteo/geografiche particolari (alcuni parametri)
- per arricchimento naturale
- nei laghi con profondità < 20 m, rinnovo acqua > 1 anno, senza scarichi (alcuni parametri)

Parametri regolamentati dal D.lgs. 31/2001

Metalli e metalloidi:

da **falda**, da **cessioni**, da **processo**

Parametro	Valore parametrico
Al	200 µg/L
As	10 µg/L
Cd	5,0 µg/L
Cr	50 µg/L
Cu	1,0 mg/L
Fe	200 µg/L
Hg	1,0 µg/L
Mn	50 µg/L
Ni	20 µg/L
Sb	5,0 µg/L
Se	10 µg/L
Pb	10 µg/L
V	140 µg/L

Anioni:

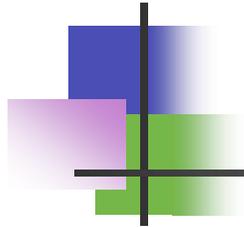
da **falda**, da attività **industriali** o **agricole/scarichi**

Parametro	Valore parametrico
B	1,0 µg/L
Cl ⁻	250 mg/L
CN ⁻	50 µg/L
F ⁻	1,50 mg/L
NO ₂ ⁻	0,50*# mg/L
NO ₃ ⁻	50# mg/L
SO ₄ ²⁻	250 mg/L

* 0,10 mg/L all'uscita di impianti di trattamento

$$\# \sum_{NO_2}^{NO_3} \frac{C}{VP} \leq 1$$

Parametri regolamentati dal D.lgs. 31/2001



Organici da attività industriali/agricole

Parametro	Valore parametrico
Benzene	1 µg/L
Benzo[a]pirene	0,010 µg/L
Altri 4 PAHs	0,10 # µg/L
1,2-dicloroetano	3,0 µg/L
Tricloroetilene + Tetracloroetilene	10 µg/L
Antiparassitari	0,10*/0,50** µg/L

benzo[b]fluorantene, benzo[k]fluorantene, benzo[ghi]perilene, indeno[1,2,3-cd]pirene

* singola molecola (eccetto aldrina, dieldrina, eptacloro ed eptacloro epossido: 0,030 µg/L)

** totale

Sottoprodotti della disinfezione

Parametro	Valore parametrico
BrO ₃ ⁻	10 µg/L
ClO ₂ ⁻	200 µg/L
NO ₂ ⁻	• 0,50* mg/L
THM	30 µg/L

* 0,10 mg/L all'uscita di impianti di trattamento

Cessione da materiali organici

Parametro	Valore parametrico
Acrilammide	0,10 µg/L
Epicloridrina	0,10 µg/L
CVM	0,5 µg/L

Parametri regolamentati dal D.lgs. 31/2001

Altri parametri chimici

Parametro	Valore parametrico
NH ₄ ⁺	0,50 mg/L
Na ⁺	200 mg/L
D _{tot}	15-50 °F
Residuo 180°C	≤ 1500 mg/L
pH	6,5-9,5
χ a 20°C	2500 μS/cm
Colore	accettabile
Odore	accettabile
Sapore	accettabile
Torbidità (superficiali)	≤ 1,0 NTU
Kubel	5,0 mg/L
TOC	no anomalie
Disinfettante	≥ 0,2 mg/L

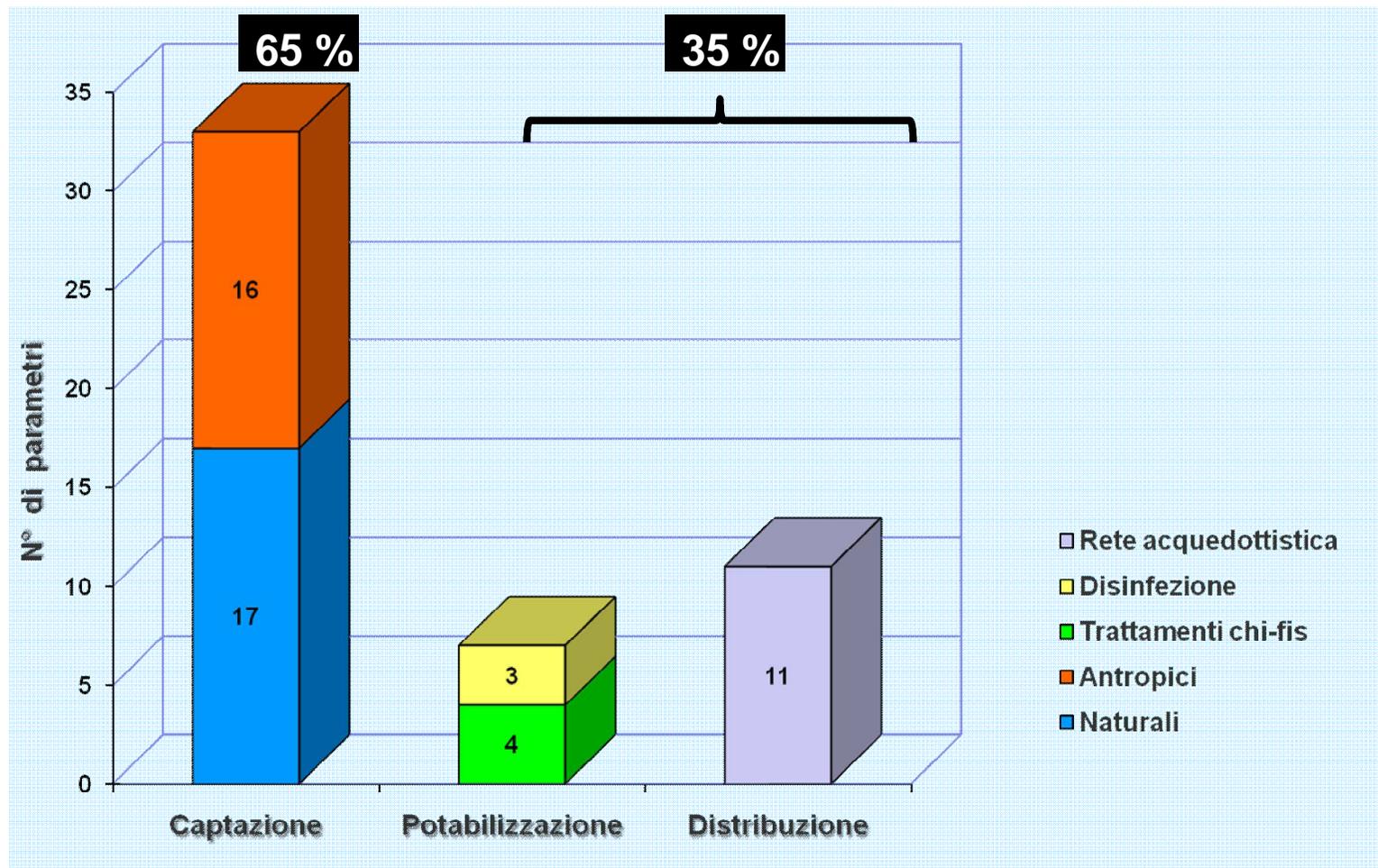
Parametri microbiologici

Parametro	Valore parametrico
E. coli	0 UFC/100 mL
Enterococchi	0 UFC/100 mL
Clostridium perfringes	0 UFC/100 mL
Colonie a 22°C	No anomalie
Coliformi a 37°C	0 UFC/100 mL

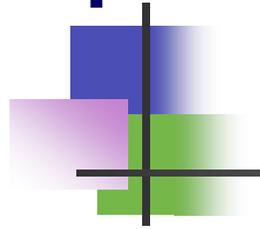
Radioattività

Parametro	Valore parametrico
Trizio	100 Bq/L
Dose tot eccetto ³ H	0,10 mSv/y

Origine dei contaminanti regolamentati dalla dir 98/83/EC



Contaminanti/inquinanti emergenti per le acque destinate al consumo umano



Correlati ad una produzione e ad un consumo massivi

- Prodotti per l'igiene personale
- Farmaci veterinari, ormoni e farmaci per l'uomo
- Pesticidi
- Cr(VI)

Correlati all'uso di nuove tecnologie

- MTBE nelle benzine
- Ritardanti di fiamma
- Composti diossino-simili
- Nanomateriali

Correlati all'uso di reagenti/materiali in acquedottistica

- Impurezze metalliche in disinfettanti, coagulanti, ...
- Monomeri, metalli, amianto rilasciati da tubazioni
- DBPs (clorito, clorato, nitrosammina, nitrito, aloacetici, alochetoni, ...)

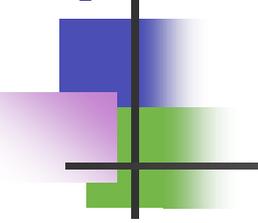
Divenuti critici per il cambiamento di normative / VG sanitari

- As, Ni, Pb
- Trielina, percloroetilene
- V
- U, Rn

Correlati ai cambiamenti climatici

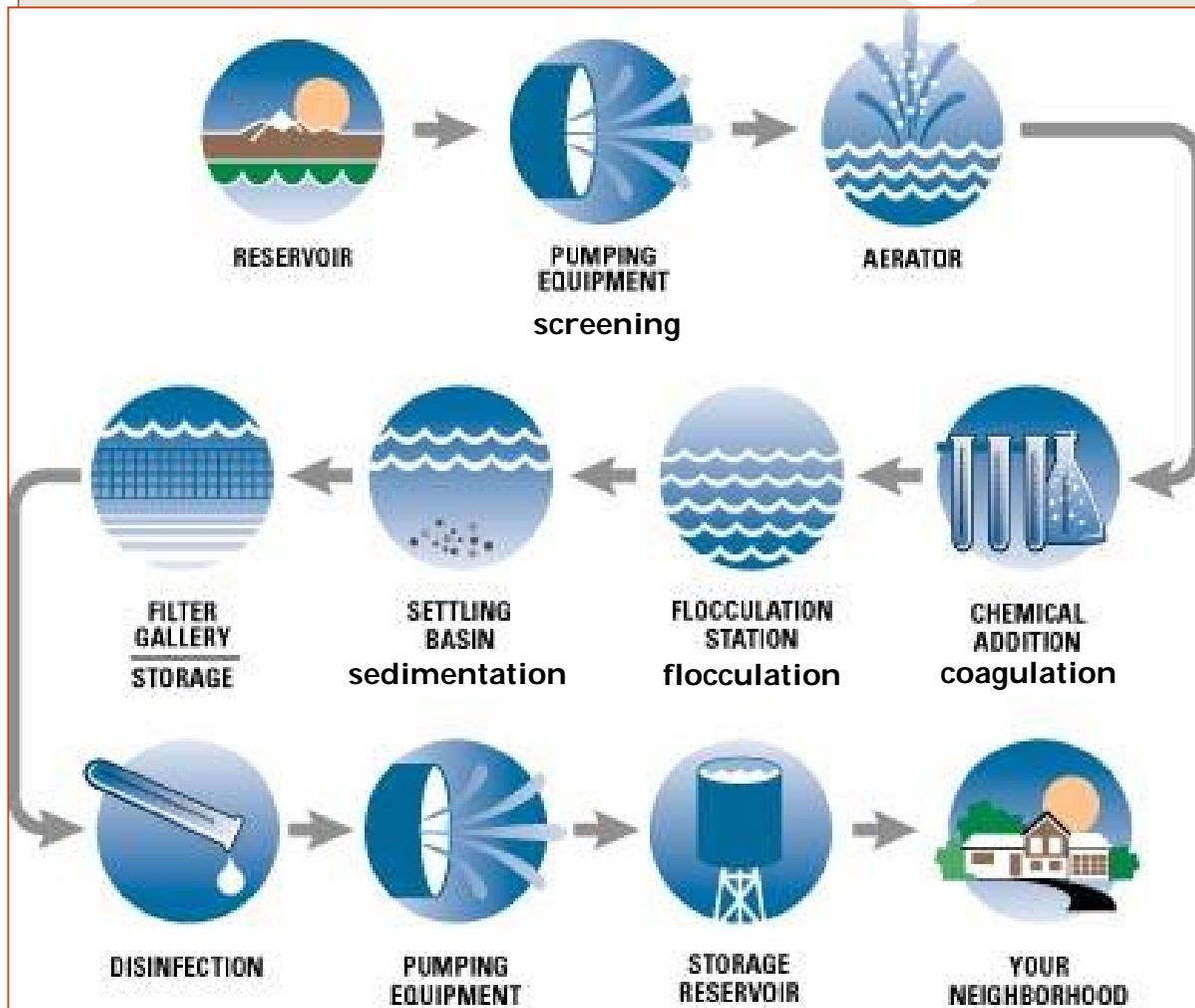
- Cianotossine

Patogeni e biocontaminanti emergenti per le acque destinate al consumo umano



- Protozoi *Giardia lamblia* e *Cryptosporidium*
- Batteri *Legionella pneumophila*
- Norovirus
- Ricrescita algale e biofilm

Trattamento convenzionale per la potabilizzazione di un'acqua superficiale

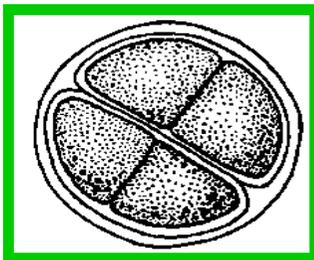


Esempio di trattamento

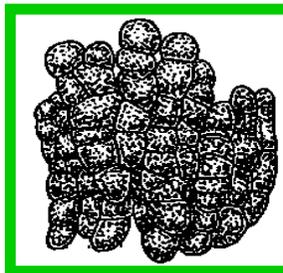
**Rimozione di cianobatteri/cianotossine
da acque superficiali**

Cianobatteri

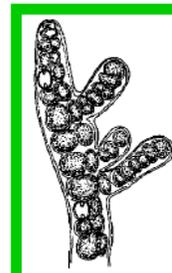
- Organismi procarioti fotosintetici (alghe blu-verdi)
- Dotati di differente morfologia
- In grado di fissare l'azoto
- Diffusi, persistenti e resistenti
- 150 generi noti, di cui 40 producono tossine (in UE: *Planktothrix rubescens*, *Microcystis* sp., *Aphanizomenon* sp., *Anabaena* sp.)



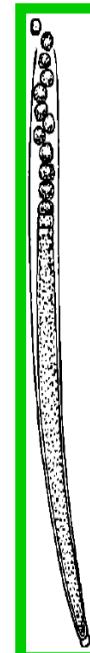
unicellular,
isopolar



unicellular,
heteropolar



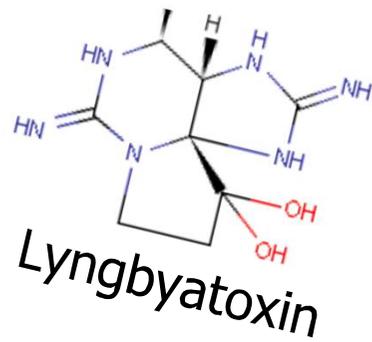
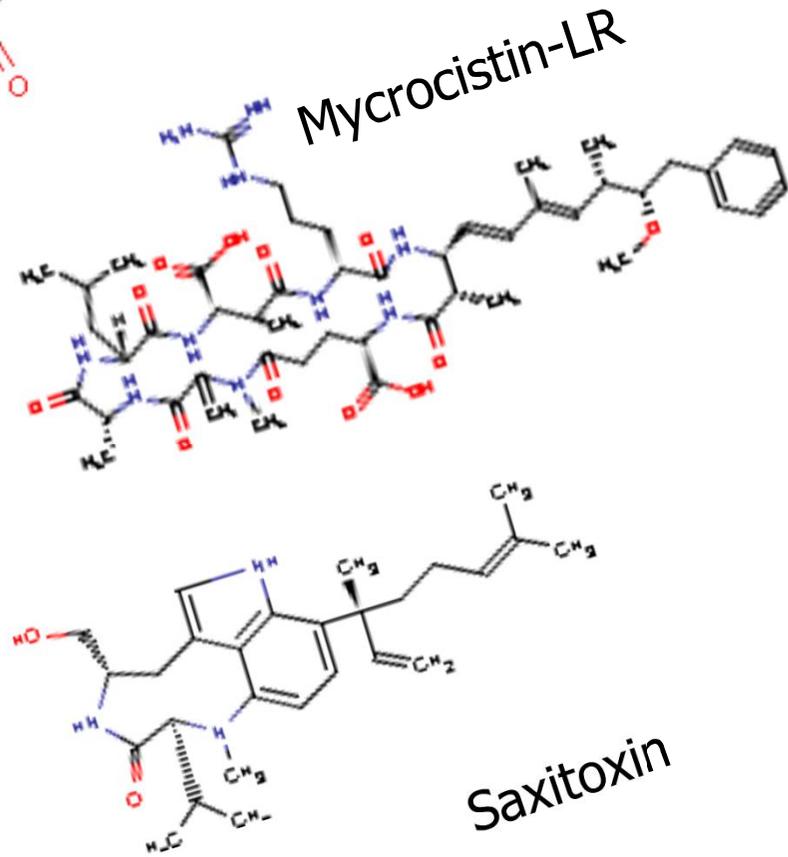
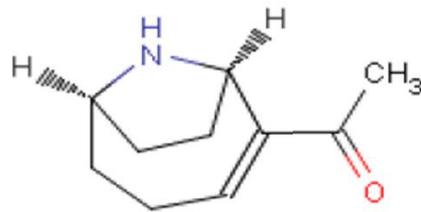
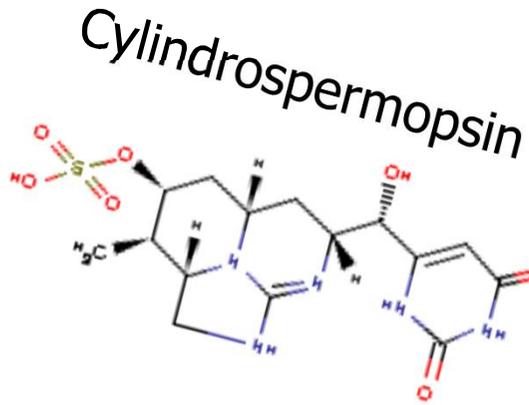
multicellular,
trichal (cysts)



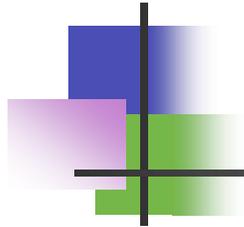
multicellular,
trichal

Cianotossine

80 specie di microcistina identificate ad oggi



Effetti tossicologici delle cianotossine



Microcistina LR

Effetti avversi	Epatotossicità, dermatossicità, neurotossicità, possibile cancerogenicità
VG - WHO	1,0 µg/l (intra+intercellulare, provvisorio per carenza di dati)
Background	80% TDI (40 ng/Kg b.w.) per patologie epatiche
VP - DWD	Non previsto (si applica il principio di sussidiarietà) In Italia VG di 1,0 µg/l

Cilindrospermina

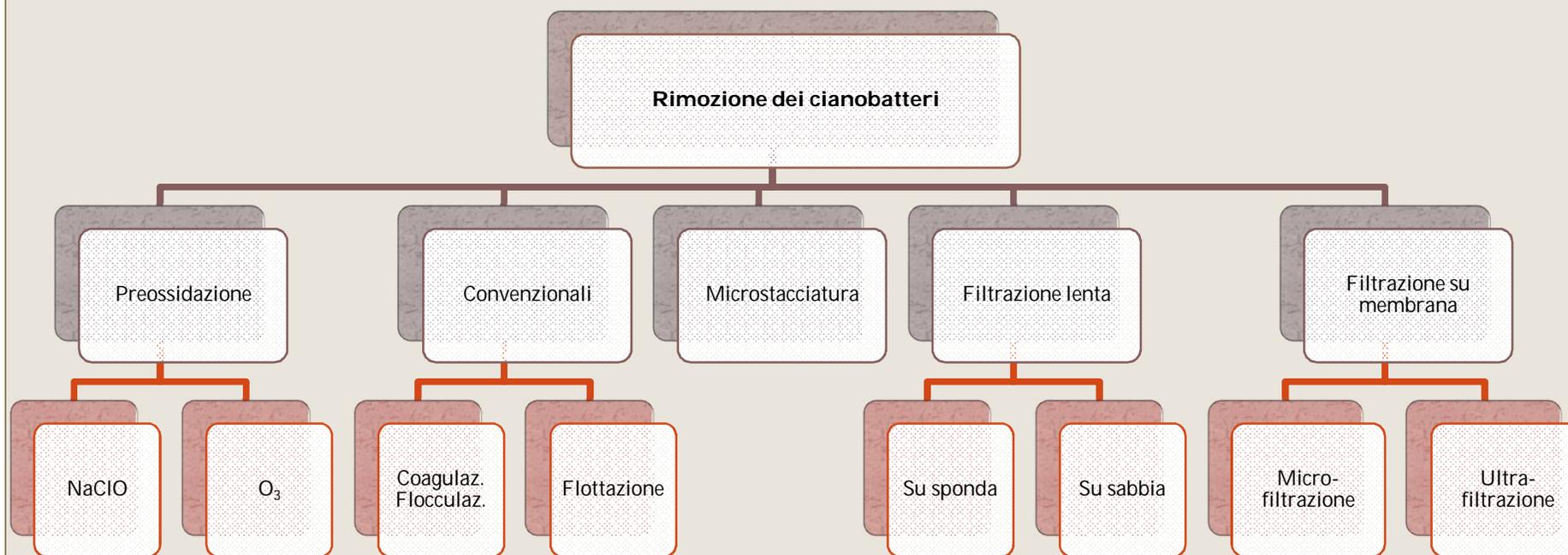
Effetti avversi	Epatotossicità, dermatossicità, neurotossicità, possibile cancerogenicità
VG - WHO	Non previsto, proposto 1,0 µg/l (intra+intercellulare); 3,0 µg/l in Nuova Zelanda; 15 µg/l in Brasile
Background	90% TDI (30 ng/Kg b.w.)
VP - DWD	Non previsto (si applica il principio di sussidiarietà)

Strategie di contenimento del rischio



- Utilizzo totale o parziale di una **fonte alternativa** di approvvigionamento non contaminata da cianobatteri
- **Spostamento del punto di presa** per minimizzare la captazione di strati fortemente contaminati da cianobatteri
- **Trattamento dell'acqua** per rimuovere i cianobatteri e/o le loro tossine

Trattamenti dell'acqua: rimozione dei cianobatteri



Rimozione dei cianobatteri



Preossidazione

- Migliora la coagulazione di cellule algali di alcune specie di cianobatteri
- Può causare danni di entità variabile alle pareti cellulari (**lisi cellulare**)
- La conc. residua di ossidante deve garantire la **totale distruzione della tossina** rilasciata dalla lisi cellulare



Rimozione dei cianobatteri



Coagulazione e flocculazione

- L'efficacia dipende dalla tipologia e dalla forma delle cellule algali presenti: un'elevata motilità e una geometria allungata e filamentosa possono compromettere la coagulazione dei fiocchi
- Indicazioni contrastanti sul coagulante e sul polielettrolita: da ottimizzare mediante jar test e verifiche in impianto



Rimozione dei cianobatteri



Coagulazione e flocculazione (cont.)

- Valutare l'entità della **lisi cellulare** causata dall'agitazione meccanica dopo l'aggiunta dei reagenti
- Una volta confinati nel flocculato i cianobatteri perdono la loro vitalità, muoiono e possono **rilasciare le tossine intracellulari** nell'acqua circostante: entro 24 h occorre isolare il fango e il suo supernatante fino alla completa degradazione delle tossine

Rimozione dei cianobatteri



Flottazione ad aria o gas disciolti

- Efficace nella rimozione di elevati contenuti algali, soprattutto nel caso in cui siano presenti specie con vacuoli gassosi
- L'efficienza del processo (55-100%) dipende dal tipo di alga ed è influenzata dalle condizioni operative che devono essere ottimizzate
- Necessità di ampi spazi per essere implementata in scala reale

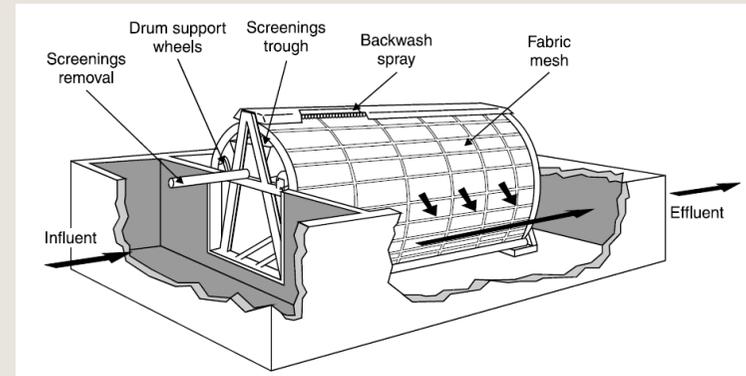


Rimozione dei cianobatteri



Microstacciatura

- Trattamento più efficiente della grigliatura fine (fori da 20-40 μm)
- Rimuove solidi biologici e minerali dall'acqua superficiale
- Rimuove le alghe multicellulari o filamentose, ma è meno efficace contro specie unicellulari
- Impiegabile come pretrattamento prima della filtrazione lenta su sabbia e della coagulazione

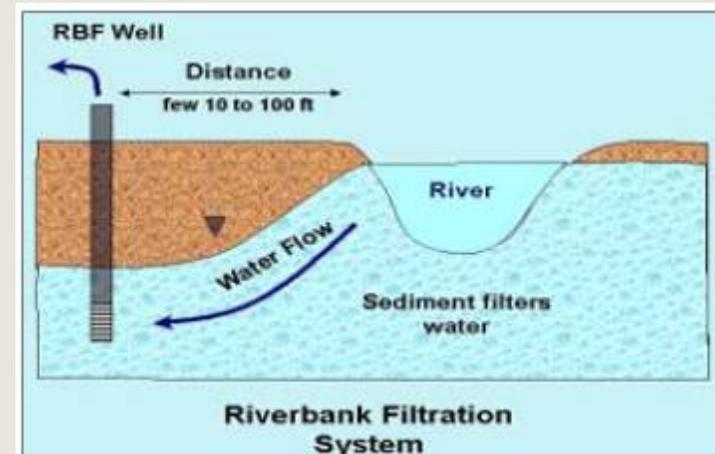


Rimozione dei cianobatteri



Filtrazione lenta attraverso la sponda di un fiume/lago

- L'acqua viene prelevata da un corso superficiale utilizzando **pozzi trivellati** a $\approx 20-200$ m dalla riva
- Il particolato sospeso in acqua viene **filtrato della sponda**, costituita da sabbia, ghiaia e pietrisco



Rimozione dei cianobatteri



Filtrazione lenta attraverso la sponda di un fiume/lago (cont.)

- Molti contaminanti solubili vengono rimossi per **adsorbimento** o per **biodegradazione nel biofilm** presente nei primi centimetri del letto filtrante
- Rimuove cianobatteri e alcune tossine in soluzione quando il **tempo di percorrenza dell'acqua** dal fiume/lago al pozzo è **sufficientemente lungo** (fino ad alcuni mesi)
- Il **mescolamento del permeato con acque sotterranee** di diversa origine determina la diluizione delle tossine non trattate

Rimozione dei cianobatteri



Filtrazione lenta su sabbia

- Trattiene quasi completamente le cellule algali e, per azione del biofilm, alcune tossine extracellulari
- Efficacia in parte compromessa dalla ricrescita algale al di sopra del letto filtrante



Rimozione dei cianobatteri



Filtrazione lenta su sabbia (cont.)

- Le prestazioni raggiungibili sono influenzate da:
 - Torbidità dell'acqua in ingresso: valori >10 NTU possono causare l'ostruzione del letto filtrante e favoriscono la ricrescita algale
 - Velocità di filtrazione: influenza la perdita di carico del letto filtrante e la qualità dell'eluato (prevenire rapide fluttuazioni $>20\%$ del valore di esercizio)
 - Raschiatura superficiale della sabbia: per rimuovere lo strato di Schmutzdecke e i primi 2 cm di sabbia; il livello del letto è poi ripristinato aggiungendo sabbia pulita; si attende un periodo di maturazione del letto filtrante (3-4 gg), durante il quale la velocità di flusso viene incrementata gradualmente scartando l'eluato prodotto o inviandolo in testa ad un altro filtro

Rimozione dei cianobatteri



Filtrazione su membrana

	ionic	molecular		macromolecular	microparticle		macroparticle	
Size, microns		0.001	0.01	0.1	1.0	10	100	1000
Approximate molecular weight	100	1,000	20,000	100,000	500,000			
	aqueous salts metal ions		viruses		bacteria			
		Humic acids			algae			
		aquatic NOM ¹			cysts		sand	
				clays	silt			
Separation processes	reverse osmosis							
		nanofiltration			microfiltration			
			ultrafiltration			conventional filtration		

Rimozione dei cianobatteri



Filtrazione su membrana

- Rimozione dei cianobatteri con membrane per micro e ultrafiltrazione
- La distribuzione dimensionale dei pori varia in funzione del produttore (0,1 - 3 μm per la microfiltrazione; 0,002 - 0,2 μm per l'ultrafiltrazione) e deve essere attentamente selezionata



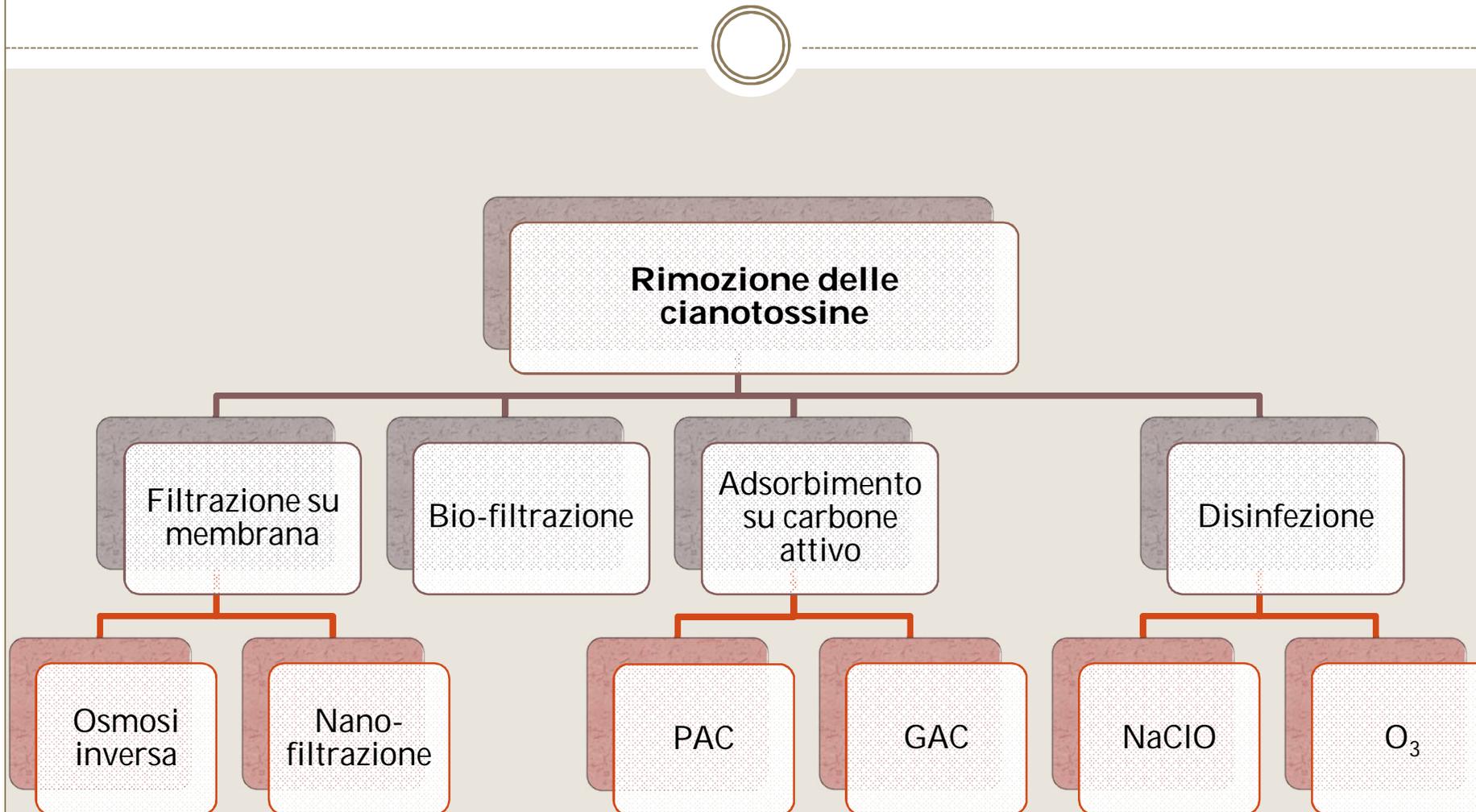
Rimozione dei cianobatteri



Filtrazione su membrana (cont.)

- Sia la micro che l'ultrafiltrazione **non trattengono** le tossine rilasciate da cellule algali danneggiate dal flusso attraverso la membrana e dal gradiente di pressione applicato
- **Frequenti controlavaggi** riducono il rischio del rilascio di tossine dalla massa algale
- Rispetto ai sistemi pressurizzati quelli a **membrana sommersa** riducono il **rischio di rilascio di tossine**: si evita il pompaggio dell'acqua a monte della membrana; il gradiente di pressione è più contenuto
- In caso di bloom algali importanti, filtrazioni spinte possano comportare fenomeni di **clogging** con conseguenti aumenti dei gradienti di pressione e difficoltà di esercizio della stazione di filtrazione

Trattamenti dell'acqua: rimozione delle cianotossine



Rimozione delle cianotossine



Adsorbimento su carbone attivo in polvere (PAC)

- Aggiunto prima della coagulazione o durante la sedimentazione; rimosso dall'acqua con la massa dei fiocchi o per filtrazione; smaltito con i fanghi o l'acqua di controlavaggio
- Impiego limitato al periodo della fioritura algale per contenere i costi di esercizio



Rimozione delle cianotossine



Adsorbimento su carbone attivo in polvere (PAC) (cont.)

- I tempi di contatto sono limitati per sfruttare completamente la capacità totale di adsorbimento
- Il dosaggio immediatamente prima o durante la coagulazione può ridurre la sua efficacia per interazione con i fiocchi
- Il sito più idoneo di immissione è rappresentato da una vasca di contatto a monte della coagulazione o dalla condotta che collega il punto di presa all'impianto di trattamento
- Competizione della NOM: conc. NOM \gg conc. tossine (3 ordini di grandezza)

Rimozione delle cianotossine



Tossina	Tossina µg/l	PAC mg/l	Tipologia di PAC
Microcistina mLR	1-4	12-25	Vegetale attivato chimicamente; Minerale con molti mesopori
Microcistina mLA	1-4	30-≥50	Vegetale attivato chimicamente; Minerale con molti mesopori
Microcistina mYR	1-4	10-20	Vegetale attivato chimicamente; Minerale con molti mesopori
Microcistina mRR	1-4	8-15	Vegetale attivato chimicamente; Minerale con molti mesopori
Cilindrospermopsina	1-4	10-30	Vegetale attivato chimicamente; Minerale con molti mesopori
Saxitossina	5-10	30-35	Vegetale attivato con vapore
Anatossina A	1-4	12-25	Vegetale attivato chimicamente; Minerale con molti mesopori

Tempo di contatto: 1 h; NOM ≤ 5 mg/l

Rimozione delle cianotossine



Adsorbimento su carbone attivo granulare (GAC)

- Impiegato tra il trattamento convenzionale e la post-disinfezione o nella filtrazione primaria in sostituzione della sabbia o dell'antracite o anche in aggiunta alla sabbia stessa
- E' posto all'interno di adsorbitori a letto fisso realizzati installando serbatoi ad-hoc o convertendo filtri rapidi a gravità preesistenti

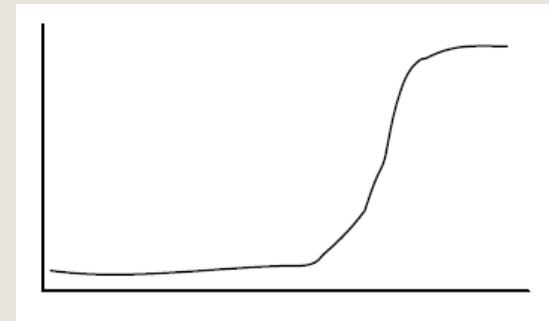


Rimozione delle cianotossine



Adsorbimento su GAC (cont.)

- Il letto tende progressivamente a saturarsi formando un fronte di adsorbimento che avanza progressivamente nel tempo; quando il fronte raggiunge l'uscita del letto si registra la caratteristica **curva di breakthrough**
- Il **tempo necessario alla saturazione** del GAC dipende dal tipo di carbone impiegato, dalla conc. e dalla natura della NOM e dal tempo di residenza nel letto vuoto
- Al decrescere della **velocità di flusso** si osserva un incremento dell'efficienza di adsorbimento e la riduzione dell'ampiezza del fronte di adsorbimento



Rimozione delle cianotossine



Adsorbimento su GAC (cont.)

- La **capacità adsorbente** dipende dalle caratteristiche del GAC e delle tossine da rimuovere e dal metodo di attivazione del GAC
- Quando il filtro a carbone attivo non è più in grado di trattenere le cianotossine, il GAC deve essere **rigenerato termicamente** o **sostituito**
- Per la **scelta del GAC** effettuare test comparativi di efficacia per la rimozione delle tossine presenti all'ingresso dell'impianto
- Tutti gli adsorbitori a GAC **sviluppano attività biologica** che può essere esaltata mediante preozonizzazione o incremento del tempo di residenza
- L'attività biologica produce biomassa che deve essere controllata con **frequenti controlavaggi**: ciò può ridurre la vita operativa del GAC per abrasione meccanica

Rimozione delle cianotossine



Filtrazione su membrana

- Le MC sono ritenute dalle membrane impiegate nell'osmosi inversa e nella nanofiltrazione
- Le STx, la ATx-a e la CYL sono rimosse solo dalle membrane per osmosi inversa
- Permeano le tossine più piccole in presenza di pori più larghi o se l'integrità della membrana è compromessa
- Difficilmente applicabile agli impianti di grandi dimensioni per la complessità gestionale

Rimozione delle cianotossine



Disinfezione

Disinfettante	Efficacia	Osservazioni
NaClO	CYL > MC >> STx; ATx-a inerte mYR > mRR > mLR > mLA	competizione con NOM
NH ₂ Cl	inefficace	
ClO ₂	inefficace	
O ₃	CYL > MC > ATx-a >> STx	pH > 8; con. > 0,3 mg/l per ≥ 5 min competizione con NOM e Alk
H ₂ O ₂	inefficace	efficace con O ₃ e UV
KMnO ₄	efficace verso CYL, MC, ATx-a	Pochi dati disponibili
UV	inefficace	

MC: microcistine, STx: saxitossine, CYL: cilindrospermopsina, ATx-a: anatoxina A

Rimozione delle cianotossine



Trattamenti biologici

- Le MC e la CYL sono sensibili alla biodegradazione
- Solo alcuni microrganismi sono in grado di degradare le tossine algali
- Tutti i GAC funzionano anche come biofiltri dopo alcune settimane dalla loro messa in esercizio
- E' richiesto un periodo di acclimatazione del biofilm (fase di latenza) durante il quale le tossine non sono degradate
- La biodegradazione è **inibita** dalla disinfezione, da temperature $<10^{\circ}\text{C}$, da tempi di residenza <10 min
- Al momento la bio-filtrazione **non è considerata una barriera efficace** tranne che nella filtrazione lenta attraverso la sponda di un fiume/lago

Efficacia relativa dei trattamenti



Trattamento	CB	MC	STx	CYL	ATx-a
Coagulazione, flocculazione	+	-	-	-	-
Flottazione	++	-	-	-	-
Microstacciatura	++	-	-	-	-
Filtrazione su sponda	+++	+	+	+	+
Filtrazione lenta su sabbia	+++	+	-	-	-
Microfiltrazione	++	-	-	-	-
Ultrafiltrazione	+++	-	-	-	-
Nanofiltrazione	N/A	++	++	++	++
Osmosi inversa	N/A	+++	+++	+++	+++

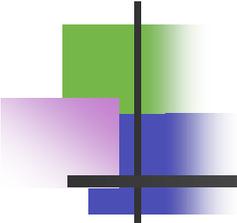
CB: cianobatteri, MC: microcistine, STx: saxitossine, CYL: cilindrospermopsina, ATx -a:anatosina A

Efficacia relativa dei trattamenti



Trattamento	CB	MC	STx	CYL	ATx-a
PAC	N/A	+++	+++	+++	+++
GAC	N/A	++++	++++	++++	++++
Biofiltrazione	+	+	+	+	+
Cl2	++	+++	++	+++	-
NH2Cl	-	-	-	-	-
ClO2	-	-	-	-	-
O3	++	+++	+	+++	+++
H2O2	-	-	-	-	-
KMnO4	-	+	+	+	+
UV	-	-	-	-	-

CB: cianobatteri, MC: microcistine, STx: saxitossine, CYL: cilindrospermopsina, ATx-a: anatoxina A



Grazie per l'attenzione

Enrico Veschetti

*Reparto di Igiene delle Acque Interne
Istituto Superiore di Sanità*

enrico.veschetti@iss.it

