



Massimo Raboni - Vincenzo Torretta
Giordano Urbini

INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE

Processi e impianti

[Scheda sul sito >](#)



- ✓ Parte I - Acqua: caratteristiche, trattamenti, processi biologici, schemi di impianti
- ✓ Parte II - Rifiuti: produzione, compostaggio, digestione anaerobica, termodistruzione
- ✓ Parte III - Aria: inquinamento atmosferico, modellistica di settore, trattamento delle emissioni
- ✓ Appendice A. Limiti di emissione degli scarichi idrici definiti dal D.Lgs. 152/2006

Massimo Raboni Vincenzo Torretta Giordano Urbini

INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE

Processi e impianti



Dario Flaccovio Editore

Massimo Raboni – Vincenzo Torretta – Giordano Urbini
INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE – Processi e impianti

ISBN 978-88-579-0352-1

© 2015 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: gennaio 2015

Raboni, Massimo <1981->

Ingegneria sanitaria ambientale : processi e impianti / Massimo Raboni, Vincenzo
Torretta, Giordano Urbini. - Palermo : D. Flaccovio, 2014.

ISBN 978-88-579-0352-1

I. Ingegneria sanitaria.

I. Torretta, Vincenzo <1964->. II. Urbini, Giordano <1945->

628 CDD-22 SBN Pal0274144

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Indice

Parte Prima Acqua

Introduzione. L'acqua da risorsa vitale e fattore di crisi	» 27
Capitolo 1. Caratteristiche delle acque	
1.1. Ciclo delle acque e inquinamento	» 31
1.1.1. Ciclo idrologico naturale delle acque.....	» 31
1.1.2. Modificazioni indotte dalle attività antropiche	» 33
1.2. Caratterizzazione qualitativa delle acque	» 35
1.2.1. Parametri di qualità	» 35
1.2.1.1. Parametri fisici e organolettici	» 35
1.2.1.1.1. Solidi totali, sospesi e disciolti	» 35
1.2.1.1.2. Torbidità	» 38
1.2.1.1.3. Colore	» 40
1.2.1.1.4. Odore e sapore.....	» 40
1.2.1.1.5. Temperatura	» 43
1.2.1.1.6. Conducibilità elettrica specifica	» 43
1.2.1.2. Parametri chimici e biochimici	» 44
1.2.1.2.1. Domanda biologica di ossigeno (BOD)	» 44
1.2.1.2.1.1. Definizione di BOD	» 44
1.2.1.2.1.2. La cinetica nel test del BOD	» 44
1.2.1.2.1.3. Tecniche di misura del BOD	» 46
1.2.1.2.1.4. Inoculo e acclimatamento.....	» 49
1.2.1.2.2. Domanda chimica di ossigeno (COD)	» 50
1.2.1.2.3. Carbonio organico totale (TOC)	» 51
1.2.1.2.4. Nutrienti	» 52
1.2.1.2.5. Durezza.....	» 54
1.2.1.2.6. Alcalinità	» 55
1.2.1.2.7. pH	» 56
1.2.1.2.8. Altri composti chimici.....	» 57
1.2.1.3. Parametri microbiologici.....	» 58
1.2.1.4. Campionamento delle acque	» 61
1.2.2. Qualità delle acque	» 63
1.2.2.1. Acque naturali e di approvvigionamento	» 63
1.2.2.2. Acque reflue civili.....	» 64
1.2.2.2.1. Sostanza organica (BOD e COD).....	» 64

1.2.2.2.2. Nutrienti (azoto e fosforo).....	»	65
1.2.2.2.3. Solidi	»	66
1.2.2.2.4. Altri inquinanti	»	66
1.2.2.2.5. Concentrazioni tipiche.....	»	67
1.2.2.3. Acque reflue industriali.....	»	67
1.3. Caratterizzazione quantitativa delle acque	»	70
1.3.1. Acque reflue civili	»	70
1.3.1.1. Portata giornaliera	»	70
1.3.1.2. Portate orarie	»	71
1.3.2. Liquami industriali	»	72
 Capitolo 2. Operazioni unitarie e definizione dei processi di trattamento		
2.1. Obiettivi della depurazione	»	75
2.2. Operazioni unitarie di trattamento e scelta dei processi di trattamento	»	75
2.2.1. Operazioni unitarie	»	75
2.2.2. Definizione dei processi di trattamento.....	»	77
 Capitolo 3. Trattamenti meccanici preliminari e sollevamento		
3.1. Scopo e tipologia dei trattamenti meccanici preliminari.....	»	81
3.2. Grigliatura/Stacciatura.....	»	81
3.2.1. Tipologie e caratteristiche	»	81
3.2.2. Dimensionamento	»	85
3.3. Dissabbiatura e disoleatura.....	»	85
3.3.1. Dissabbiatori a canale.....	»	85
3.3.2. Dissabbiatori a vortice	»	86
3.3.3. Dissabbiatori aerati	»	87
3.4. Equalizzazione-omogeneizzazione	»	88
3.4.1. Obiettivi e campi di impiego.....	»	88
3.4.2. Sistemi di agitazione-aerazione	»	89
3.4.3. Dimensionamento	»	92
3.5. Sollevamento	»	95
 Capitolo 4. Sedimentazione		
4.1. Obiettivi della sedimentazione e campi di impiego	»	97
4.2. Sedimentazione isolata	»	97
4.2.1. Teoria	»	97
4.2.2. Criterio di calcolo.....	»	100
4.3. Sedimentazione flocculenta.....	»	101
4.4. Sedimentazione di massa. Teoria del flusso solido.....	»	102
4.5. Tipologie di sedimentatori.....	»	105
4.6. Criteri di dimensionamento	»	110

Capitolo 5. Processi biologici per la depurazione: aspetti generali e classificazione

5.1. Cenni di microbiologia e biochimica delle acque	» 113
5.1.1. Ruolo dei microrganismi.....	» 113
5.1.2. Microrganismi di interesse nei sistemi di trattamento dei liquami....	» 114
5.1.3. Biochimica dei batteri	» 117
5.2. Principi generali dei processi biologici	» 118
5.2.1. Degradazione batterica controllata.....	» 118
5.2.2. Processi aerobici e anaerobici.....	» 118
5.3. Cinetica delle reazioni biologiche	» 124
5.3.1. Crescita cellulare.....	» 124
5.3.2. Rimozione del substrato.....	» 128
5.3.3. Consumo dell'ossigeno in processi aerobici.....	» 129
5.3.4. Fattori che influenzano la cinetica dei processi biologici	» 129
5.3.4.1. Ambito di validità della cinetica di Monod.....	» 129
5.3.4.2. Temperatura	» 130
5.3.4.3. Ossigeno disciolto	» 131
5.3.4.4. Carenza di elementi nutritivi	» 132
5.3.4.5. Qualità dell'ambiente chimico-fisico	» 132
5.4. Classificazione generale dei processi di depurazione	» 134

Capitolo 6. Processo biologico a fanghi attivi

6.1. Descrizione del processo	» 137
6.2. Modelli idrodinamici dei reattori	» 139
6.3. Carico del fango e curva teorica di conversione del substrato	» 141
6.3.1. Reattore a miscelazione completa.....	» 141
6.3.2. Reattore con flusso a pistone.....	» 146
6.4. Curva di conversione reale e criterio di calcolo del volume del reattore biologico.....	» 147
6.5. Produzione di fango di supero.....	» 148
6.6. Consumo di ossigeno.....	» 150
6.7. Fabbisogno di nutrienti.....	» 151
6.8. Nitrificazione.....	» 153
6.8.1. Principi della nitrificazione biologica	» 153
6.8.2. Cinetica della nitrificazione	» 154
6.8.3. Verifica della nitrificazione	» 155
6.8.4. Nitrificazione in impianti a due stadi.....	» 157
6.8.5. Produzione di biomassa in impianti con nitrificazione.....	» 157
6.9. Frazione attiva delle SSV	» 158
6.10. Grado di stabilizzazione del fango di supero	» 159
6.11. Dimensionamento del processo.....	» 160
6.11.1. Calcolo del volume della vasca di ossidazione.....	» 160
6.11.2. Calcolo della portata di ricircolo.....	» 164
6.11.3. Produzione di fango di supero.....	» 164
6.11.4. Fornitura di ossigeno	» 165

6.11.4.1.	Insufflazione d'aria mediante diffusori a bolle	» 167
6.11.4.2.	Aerazione meccanica mediante turbine superficiali	» 168
6.11.5.	Verifica dell'input di potenza	» 169
6.12.	Controllo del processo	» 169
6.12.1.	SVI – Sludge volume index	» 170
6.12.2.	Attività del fango	» 171
6.12.3.	Osservazioni microbiologiche	» 172
6.13.	Problemi di esercizio	» 173
6.13.1.	Carenza di ossigeno disciolto	» 174
6.13.2.	Cattiva sedimentabilità del fango	» 174
6.13.3.	Formazione di schiume	» 176
6.13.4.	Sovraccarico organico e sovraccarico idraulico	» 176
6.13.5.	Shock tossici	» 176
6.13.6.	Shock termici	» 177

Capitolo 7. Schemi di impianti completi e varianti del processo a fanghi attivi

7.1.	Ammissione delle acque di pioggia al trattamento	» 179
7.2.	Impianti di depurazione di grande potenzialità	» 181
7.2.1.	Schema generale	» 181
7.2.2.	Linea liquame	» 182
7.2.3.	Linea fanghi	» 183
7.2.3.1.	Pre-ispessimento	» 184
7.2.3.2.	Digestione anaerobica	» 185
7.2.3.3.	Post-ispessimento	» 190
7.2.3.4.	Disidratazione meccanica	» 190
7.2.4.	Smaltimento finale dei fanghi	» 193
7.3.	Impianti di piccola-media potenzialità	» 193
7.4.	Varianti del processo a fanghi attivi	» 195
7.4.1.	Impianti a ossigeno puro	» 195
7.4.1.1.	Ossigeno puro a confronto con ossigeno atmosferico	» 195
7.4.1.2.	Vantaggi e limiti dell'impiego dell'ossigeno puro	» 196
7.4.1.3.	Reattori a fanghi attivi con ossigeno puro	» 196
7.4.1.4.	Reattori termofili a ossigeno puro	» 197
7.4.2.	Impianti con processi biologici a membrana (MBR)	» 198
7.4.3.	Processo a fanghi attivi tipo Sequencing Batch Reactor (SBR)	» 201
7.4.3.1.	Processo SBR convenzionale	» 201
7.4.3.2.	Reattori biologici aerobici con biomassa granulare (AGSBR)	» 202
7.4.4.	Processo deep-shaft	» 203
7.4.5.	Processi a fanghi attivi per minimizzare la produzione di fango di supero	» 204
7.5.	Implementazione con trattamenti di affinamento	» 207

Capitolo 8. Processo biologico a fanghi attivi integrato con la rimozione dei nutrienti

8.1.	Esigenza di rimozione dei nutrienti.....	» 209
8.2.	Processi di denitrificazione	» 210
8.2.1.	Rimozione chimica e biologica dell'azoto.....	» 211
8.2.2.	Microbiologia e biochimica della denitrificazione biologica	» 212
8.2.3.	Alternative impiantistiche per la denitrificazione biologica	» 215
8.2.4.	Fattori limitanti e cinetica della denitrificazione	» 219
8.2.5.	Criterio di dimensionamento.....	» 220
8.2.5.1.	Volume del reattore di denitrificazione.....	» 220
8.2.5.2.	Miscelazione.....	» 221
8.2.5.3.	Produzione di fango di supero.....	» 221
8.2.6.	Osservazioni finali	» 221
8.3.	Processi di defosfatazione	» 222
8.3.1.	Rimozione chimica del fosforo.....	» 222
8.3.2.	Pre-trattamento	» 224
8.3.3.	Post-precipitazione.....	» 225
8.3.4.	Trattamento simultaneo.....	» 226
8.3.5.	Rimozione biologica	» 228

Capitolo 9. Impianti biologici a colture adese

9.1.	Processo a letti percolatori	» 233
9.1.1.	Principio operativo	» 233
9.1.2.	Tipologie impiantistiche e criterio di dimensionamento.....	» 237
9.1.2.1.	Percolatori tradizionali (a basso carico).....	» 239
9.1.2.1.1.	Con riempimento di pietrisco	» 239
9.1.2.1.2.	Con riempimento in materiale plastico	» 240
9.1.2.2.	Percolatori intensivi (ad alto carico)	» 242
9.2.	Biofiltrazione.....	» 243
9.2.1.	Principio di funzionamento.....	» 243
9.2.2.	Schema di processo	» 244
9.2.3.	Caratteristiche del mezzo di riempimento	» 245
9.2.4.	Lavaggio periodico	» 245
9.2.5.	Dimensionamento del letto biofiltrante.....	» 446
9.2.6.	Rimozione nutrienti.....	» 247
9.2.7.	Campi di applicazione.....	» 248
9.3.	Dischi biologici	» 248
9.3.1.	Caratteristiche generali	» 248
9.3.2.	Processi biologici MBBR (Moving Bed Biofilm Reactors)	» 250
9.3.3.	Processi biologici a fango attivo con letto sommerso fisso	» 251
9.4.	Letti fluidizzati	» 252

Capitolo 10. Altri processi biologici

10.1. Processi anaerobici di depurazione dei liquami	» 255
10.1.1. Alternative tecnologiche.....	» 255
10.1.2. Campi di applicazione	» 258
10.2. Processi biologici a doppio stadio	» 258
10.2.1. Doppio stadio a fanghi attivi	» 258
10.2.2. Doppio stadio a letti percolatori	» 259
10.2.3. Doppio stadio misto: percolatore intensivo + fango attivo	» 259
10.2.4. Doppio stadio misto: digestione anaerobica + fango attivo	» 260
10.3. Impianti di depurazione per piccole comunità	» 261
10.3.1. Tipologie di trattamenti	» 261
10.3.2. Fosse settiche.....	» 262
10.3.3. Vasche Imhoff	» 263
10.3.4. Pozzi perdenti e altri sistemi di dispersione nel sottosuolo.....	» 264
10.3.5. Stagni biologici.....	» 265
10.3.5.1. Principi operativi e classificazione	» 265
10.3.5.2. Tipologie di stagni biologici	» 266
10.3.5.3. Produzione ed estrazione del fango	» 268
10.3.5.4. Campi di applicazione.....	» 268
10.3.6. Fitodepurazione	» 269
10.3.6.1. Principio operativo e classificazione.....	» 269
10.3.6.2. Criteri di progettazione	» 271
10.3.6.3. Sistemi combinati.....	» 272

Capitolo 11. Trattamento combinato di liquami urbani e industriali

11.1. Vantaggi del trattamento combinato	» 275
11.2. Accettabilità degli scarichi industriali nella fognatura pubblica	» 276
11.2.1. Criteri generali di accettabilità	» 276
11.2.2. Compatibilità dello scarico con la fognatura.....	» 277
11.2.3. Compatibilità dello scarico con l'impianto di depurazione.....	» 279
11.2.4. Compatibilità dello scarico con il corpo idrico ricettore	» 280
11.3. Verifica della trattabilità biologica dei liquami industriali	» 281
11.3.1. Obiettivi e metodi di indagine	» 281
11.3.2. Metodi in discontinuo.....	» 281
11.3.2.1. Test per la valutazione degli indici di biodegradabilità ...	» 281
11.3.2.2. Test per la valutazione dell'indice di inibizione.....	» 285
11.3.2.3. Test per la valutazione degli effetti sull'attività biochimica	» 286
11.3.3. Metodi in continuo (impianto pilota)	» 287
11.3.3.1. Criteri di esercizio dell'esperienza pilota	» 287
11.3.3.2. Considerazioni sulla dimensione dell'impianto pilota	» 289

Capitolo 12. Chiari-flocculazione

12.1. Obiettivo della chiari-flocculazione	» 291
--	-------

12.2.	Principi della coagulazione-flocculazione.....	» 291
12.2.1.	Natura delle particelle colloidali	» 291
12.2.2.	Repulsione elettrostatica dei colloidali	» 293
12.2.3.	Meccanismi chimico-fisici della coagulazione e flocculazione	» 294
12.3.	Processo di chiari-flocculazione e criteri di dimensionamento	» 295
12.4.	Reattivi coagulanti e criteri di scelta	» 297
12.4.1.	Reattivi commerciali	» 297
12.4.1.1.	Coagulazione con solfato di alluminio.....	» 297
12.4.1.2.	Coagulazione con sali di ferro	» 298
12.4.1.3.	Coagulazione con calce.....	» 299
12.4.2.	Prove di jar-test	» 300
12.5.	Campi di applicazione	» 301

Capitolo 13. Filtrazione su mezzo granulare

13.1.	Obiettivo della filtrazione.....	» 305
13.2.	Tipologie di filtri e classificazione del mezzo filtrante.....	» 305
13.2.1.	Tipologie di filtri	» 305
13.2.2.	Classificazione del mezzo filtrante.....	» 307
13.2.3.	Intasamento e controlavaggio dei filtri.....	» 308
13.3.	Criteri di dimensionamento	» 309
13.4.	Campi di applicazione	» 310

Capitolo 14. Adsorbimento su carbone attivo

14.1.	Obiettivi dell'adsorbimento su carbone attivo	» 311
14.2.	Principi dell'adsorbimento su carbone attivo	» 311
14.2.1.	Isoterma di adsorbimento	» 311
14.2.2.	Struttura e proprietà del carbone attivo	» 312
14.2.3.	Fattori chimico-fisici che influenzano l'adsorbimento in fase liquida....	» 317
14.3.	Tecniche di impiego dei carboni attivi e criteri di dimensionamento	» 319
14.3.1.	Carbone attivo granulare	» 319
14.3.2.	Criteri di dimensionamento delle colonne a carbone attivo granulare	» 324
14.3.3.	Carbone attivo in polvere	» 326
14.3.4.	Criteri di dimensionamento degli impianti a carbone attivo in polvere	» 327
14.3.5.	Prestazioni di carbone attivo in polvere e granulare	» 328
14.4.	Rigenerazione del carbone attivo	» 329
14.5.	Campi di applicazione	» 332

Capitolo 15. Disinfezione

15.1.	Concetto e ruolo della disinfezione	» 333
15.2.	Decadimento dei microrganismi enterici nelle acque naturali e nei sistemi di depurazione	» 333
15.2.1.	Decadimento in acque naturali	» 333

15.2.2. Rimozione in impianti di trattamento acque e liquami	»	334
15.3. Tecniche e cinetica della disinfezione	»	336
15.3.1. Tecniche di disinfezione	»	336
15.3.2. Cinetica dei processi di disinfezione	»	336
15.4. Disinfezione con cloro e derivati	»	337
15.4.1. Cloro	»	337
15.4.1.1. Comportamento del cloro in acqua	»	337
15.4.1.2. Dosaggio del cloro e clorazione al breakpoint	»	338
15.4.2. Ipoclorito di sodio	»	340
15.4.3. Ipoclorito di calcio	»	340
15.4.4. Biossido di cloro	»	341
15.4.5. Sistemi di contatto	»	342
15.4.6. Formazione di sottoprodotti	»	343
15.4.6.1. Sottoprodotti della clorazione	»	343
15.4.6.2. Sottoprodotti del biossido di cloro	»	343
15.4.6.3. Rimozione del cloro residuo in eccesso	»	344
15.5. Disinfezione con ozono	»	344
15.5.1. Produzione e trattamento con ozono	»	344
15.5.2. Sottoprodotti dell'ozonizzazione	»	346
15.6. Disinfezione con acido peracetico	»	347
15.7. Disinfezione con raggi UV	»	347
15.8. Campi di applicazione della disinfezione	»	350
15.8.1. Campi di applicazione	»	350
15.8.1.1. Trattamento delle acque destinate all'uso potabile	»	352
15.8.1.2. Trattamento delle acque reflue civili	»	353
15.8.2. Standard di qualità microbiologici	»	354

Capitolo 16. Impianti di potabilizzazione di acque superficiali

16.1. Fonti idriche di approvvigionamento	»	355
16.2. Processi di trattamento delle acque sotterranee	»	356
16.2.1. Acque di falda profonda senza specifici contaminanti	»	356
16.2.2. Acque di falda con Fe^{2+} , Mn^{2+} e H_2S	»	357
16.2.3. Acque di falda con contaminanti organici	»	357
16.2.4. Acque contaminate da arsenico	»	358
16.3. Processi di potabilizzazione di acque superficiali	»	358
16.3.1. Schema di trattamento	»	358
16.3.2. La qualità delle acque potabili	»	360

Capitolo 17. Altri processi chimico-fisici

17.1. Controllo del pH	»	367
17.1.1. Reazioni acido-base	»	367
17.1.2. Schemi di processo. Criteri di dimensionamento	»	368
17.1.3. Campi di applicazione	»	370

17.2. Precipitazione chimica	» 370
17.2.1. Prodotto di solubilità	» 370
17.2.2. Schemi di processo. Criteri di dimensionamento	» 373
17.2.3. Campi di applicazione	» 374
17.2.3.1. Trattamento delle acque di approvvigionamento	» 374
17.2.3.2. Trattamento delle acque di rifiuto	» 375
17.3. Processi a scambio ionico	» 378
17.3.1. Resine scambiatrici di ioni e reazioni di scambio	» 378
17.3.2. Resine cationiche in ciclo sodico nei processi di addolcimento	» 380
17.3.3. Ciclo operativo	» 381
17.3.4. Criteri di dimensionamento dei processi a scambio ionico	» 382
17.3.4.1. Scelta del processo	» 382
17.3.4.2. Calcolo del volume di scambio	» 386
17.3.5. Campi di applicazione	» 389
17.4. Processi con membrane microporose	» 391
17.4.1. Classificazione generale dei processi con membrane microporose	» 391
17.4.2. La filtrazione su membrane microporose	» 392
17.4.2.1. Classificazione dei processi	» 392
17.4.2.2. Tipologie di membrane utilizzate	» 393
17.4.2.3. Osmosi inversa	» 397
17.4.2.4. Campi di applicazione	» 401
17.4.2.4.1. Acque di approvvigionamento	» 401
17.4.2.4.2. Acque di rifiuto	» 401
17.4.3. Processo di elettrodialisi	» 401
17.5. Processi di ossidazione e riduzione chimica	» 403
17.5.1. Principi dei processi di ossidazione-riduzione	» 403
17.5.1.1. Reazioni redox	» 403
17.5.1.2. Legge di Nerst. Potenziali di ossido-riduzione	» 405
17.5.2. Reattivi ossidanti e riducenti e relativo campo di impiego	» 411
17.5.2.1. Reattivi ossidanti	» 411
17.5.2.2. Reattivi riducenti	» 412
17.5.2.3. Misura del potere ossido-riducente di un'acqua	» 413
17.5.2.4. Campi di applicazione	» 415
17.5.2.4.1. Ossidazione chimica	» 415
17.5.2.4.2. Riduzione chimica	» 422
17.6. Altri processi (cenni)	» 423
Capitolo 18. Risparmio e riuso delle acque	
18.1. Scarsità di acqua sul pianeta	» 425
18.2. Esigenza di un nuovo approccio alla gestione integrata delle acque	» 426
18.3. Forme di riuso dei liquami e connessi limiti di qualità	» 426
18.3.1. Forme di riuso	» 426
18.3.2. Requisiti di qualità delle acque destinate al riuso	» 428
18.3.2.1. Obiettivi generali	» 428

18.3.2.2. Riuso irriguo	» 428
18.3.2.2.1. Requisiti microbiologici	» 429
18.3.2.2.2. Requisiti chimico-fisici	» 431
18.3.2.3. Riuso industriale	» 434
18.3.2.3.1. Riuso di effluenti esterni per scopi di raffreddamento	» 434
18.3.2.3.2. Riciclo delle acque di processo nelle singole industrie	» 440
18.3.2.3.3. Riciclo delle acque di processo mediante acquedotti industriali	» 440
18.3.2.4. Riuso dei liquami civili per scopi potabili	» 444
18.3.2.5. Processi di trattamento dei liquami civili per le diverse destinazioni d'uso	» 449

Capitolo 19. Prevenzione e risanamento dei corpi idrici superficiali

19.1. Classificazione generale dei fenomeni di inquinamento	» 453
19.2. Inquinamento estetico-organolettico	» 453
19.2.1. Descrizione e cause	» 453
19.2.2. Prevenzione e risanamento	» 454
19.3. Deossigenazione delle acque	» 455
19.3.1. Descrizione del fenomeno di inquinamento	» 455
19.3.1.1. Ossigeno disciolto nei corpi idrici	» 455
19.3.1.2. Bilancio dell'ossigeno (modello di Streeter & Phelps)....	» 457
19.3.1.2.1. Fattori che incidono sul bilancio	» 457
19.3.1.2.2. Consumo biochimico dell'ossigeno	» 459
19.3.1.2.3. Trasferimento dell'ossigeno (riossigenazione)	» 461
19.3.1.2.4. Produzione netta di ossigeno dell'attività algale	» 462
19.3.1.2.5. Consumo bentonico dell'ossigeno	» 463
19.3.1.2.6. Modello di bilancio semplificato di Streeter e Phelps	» 464
19.3.2. Prevenzione e risanamento	» 468
19.4. Eutrofizzazione	» 469
19.4.1. Cause ed effetti dell'eutrofizzazione	» 469
19.4.2. Classificazione dei laghi in base allo stato trofico	» 471
19.4.3. Stratificazione e ricircolazione: effetti sulla eutrofizzazione	» 472
19.4.4. Controllo dell'eutrofizzazione	» 474
19.4.5. Bilancio dei carichi di fosforo	» 475
19.4.5.1. Carichi localizzati e carichi diffusi	» 475
19.4.5.1.1. Carichi localizzati	» 475
19.4.5.1.1.1. Liquami domestici	» 475
19.4.5.1.1.2. Liquami zootecnici	» 476
19.4.5.1.1.3. Liquami industriali	» 476
19.4.5.1.2. Carichi diffusi	» 477
19.4.5.1.2.1. Pioggia	» 477

19.4.5.1.2.2. Residui organici naturali	» 477
19.4.5.1.2.3. Drenaggio di suolo non coltivato	» 477
19.4.5.1.2.4. Drenaggio di suolo coltivato	» 477
19.4.5.1.2.5. Drenaggio di aree urbanizzate	» 477
19.4.5.2. Iniziative per la limitazione dei carichi	» 477
19.4.6. Carichi critici di fosforo. Modello di Vollenweider	» 479
19.4.7. Tecniche di prevenzione e di risanamento	» 482
19.4.7.1. Tecniche di prevenzione	» 482
19.4.7.2. Tecniche di risanamento	» 483
19.5. Inquinamento microbiologico	» 486
19.5.1. Cause ed effetti	» 486
19.5.2. Tecniche di prevenzione del rischio sanitario	» 488
19.6. Inquinamento chimico	» 496
19.6.1. Cause ed effetti	» 496
19.6.2. Prevenzione e risanamento	» 498
19.7. Inquinamento termico	» 498
19.7.1. Cause ed effetti	» 498
19.7.2. Prevenzione	» 499

Parte Seconda Rifiuti

Introduzione. Evoluzione verso l'approccio integrato alla gestione dei rifiuti ...	» 505
---	--------------

Capitolo 20. Produzione, qualità e indirizzi di smaltimento dei rifiuti

20.1. Classificazione dei rifiuti	» 507
20.1.1. Definizione di rifiuto e classificazione generale	» 507
20.1.2. Rifiuti urbani	» 507
20.1.3. Rifiuti speciali	» 508
20.1.4. Codice CER e sotto-classificazione in rifiuti pericolosi e non pericolosi	» 508
20.2. Caratterizzazione dei rifiuti	» 510
20.2.1. Parametri di qualità	» 510
20.2.2. Qualità merceologica	» 511
20.2.3. Qualità chimico-fisica	» 511
20.2.3.1. Densità	» 512
20.2.3.2. Distribuzione della dimensione delle particelle solide	» 512
20.2.3.3. Umidità	» 512
20.2.3.4. Materiale combustibile e ceneri	» 512
20.2.3.5. Potere calorifico	» 513
20.2.3.6. Analisi chimica	» 514
20.2.4. Qualità biologica	» 515
20.3. Produzione di rifiuti urbani e rifiuti speciali	» 515

20.3.1. Produzione di rifiuti urbani	» 515
20.3.2. Produzione dei rifiuti speciali.....	» 515
20.4. Indirizzi di smaltimento.....	» 516
20.4.1. Smaltimento dei rifiuti urbani	» 516
20.4.2. Smaltimento dei rifiuti speciali	» 518
20.5. Schema di ciclo integrato di gestione dei rifiuti urbani.....	» 519

Capitolo 21. Compostaggio di matrici organiche

21.1. Introduzione.....	» 521
21.1.1. Generalità sul compostaggio	» 521
21.1.2. Evoluzione del compostaggio	» 523
21.2. Processo di compostaggio	» 525
21.2.1. Microbiologia e biochimica del compostaggio	» 525
21.2.2. Cinetica e fattori che influenzano il processo biologico	» 527
21.2.3. Criteri di dimensionamento del processo biologico	» 532
21.3. Matrici compostabili e produzione di compost	» 532
21.3.1. Matrici compostabili.....	» 532
21.3.2. Produzione di compost	» 536
21.4. Tecnologie di compostaggio	» 537
21.4.1. Schemi di processo	» 537
21.4.2. Tecnologie di pretrattamento.....	» 540
21.4.2.1. Triturazione-sfibratura	» 540
21.4.2.2. Vagliatura primaria	» 542
21.4.2.3. Miscelazione	» 543
21.4.3. Trattamento biologico	» 543
21.4.3.1. Bio-ossidazione in cumuli all'aperto	» 543
21.4.3.2. Bio-ossidazione accelerata in sistemi chiusi	» 544
21.4.2.3. Maturazione	» 548
21.4.4. Raffinazione	» 548
21.5. Controllo del processo e della qualità del compost.....	» 551
21.5.1. Controllo dell'andamento del processo	» 551
21.5.2. Limiti di qualità del compost.....	» 554
21.6. Presidi ambientali	» 556
21.6.1. Controllo delle emissioni gassose	» 556
21.6.2. Effluenti liquidi	» 558

Capitolo 22. Digestione anaerobica di matrici organiche e recupero di energia

22.1. Considerazioni generali sulla digestione anaerobica.....	» 559
22.1.1. Obiettivi del processo	» 559
22.1.2. Matrici organiche destinabili alla digestione anaerobica	» 559
22.2. Descrizione del processo	» 565
22.2.1. Biochimica e microbiologica della digestione anaerobica.....	» 565
22.2.1.1. Idrolisi enzimatica.....	» 566

22.2.1.2. Fermentazione acida (acidogenesi + acetogenesi).....	» 566
22.2.1.3. Fermentazione metanigena (o metanogenesi).....	» 567
22.2.2. Cinetica e fattori di controllo del processo.....	» 568
22.2.2.1. Cinetica.....	» 568
22.2.2.2. Fattori di controllo.....	» 569
22.3. Criteri di dimensionamento del processo.....	» 574
22.3.1. Calcolo del volume di digestione.....	» 574
22.3.2. Calcolo della produzione di biogas.....	» 575
22.3.3. Bilanci di materia e di energia.....	» 576
22.4. Tecnologie di digestione anaerobica.....	» 577
22.4.1. Tecniche di digestione.....	» 577
22.4.1.1. Temperatura di processo adottata.....	» 577
22.4.1.2. Livello di diluizione in acqua della matrice organica sottoposta al processo.....	» 578
22.4.2. Sistemi a due stadi e sistemi batch.....	» 580
22.4.2.1. Sistemi a due stadi.....	» 580
22.4.2.2. Sistemi batch.....	» 581
22.4.3. Schemi di processo.....	» 581
22.4.3.1. Fanghi organici di depurazione.....	» 581
22.4.3.2. Acque reflue concentrate.....	» 582
22.4.3.3. Frazione organica dei rifiuti solidi urbani.....	» 584
22.4.3.4. Liquefatti zootecnici.....	» 587
22.4.3.5. Matrici organiche composite (co-digestione).....	» 587
22.5. Produzione di biogas e recupero di energia.....	» 589
22.5.1. Produzione, depurazione, stoccaggio del biogas.....	» 589
22.5.1.1. Produzione.....	» 589
22.5.1.2. Depurazione e stoccaggio.....	» 591
22.5.2. Utilizzo energetico del biogas.....	» 593
22.6. Controllo del processo.....	» 594
22.7. Presidi ambientali e di sicurezza.....	» 595
22.7.1. Presidi ambientali.....	» 595
22.7.1.1. Emissioni gassose.....	» 595
22.7.1.2. Effluenti liquidi.....	» 596
22.7.2. Presidi di sicurezza.....	» 597
Capitolo 23. Termodistruzione dei rifiuti e recupero di energia	
23.1. Incenerimento e pirolisi.....	» 599
23.2. Campi di applicazione.....	» 600
23.2.1. Vantaggi e limiti della termodistruzione.....	» 600
23.2.2. Uso del combustibile solido secondario (CSS).....	» 602
23.3. Tipologie di forni di termodistruzione.....	» 604
23.3.1. Classificazione generale.....	» 604
23.3.2. Forni a griglia.....	» 604
23.3.3. Forni a tamburo rotante.....	» 608

23.3.4. Forni a piani multipli.....	» 609
23.3.5. Forni a letto fluido.....	» 613
23.3.6. Forni per rifiuti liquidi.....	» 616
23.3.7. Altri sistemi di termodistruzione.....	» 618
23.3.7.1. Forni elettrici.....	» 618
23.3.7.2. Forni a suola rotante.....	» 618
23.3.7.3. Forni al plasma.....	» 619
23.3.7.4. Reattori di ossidazione a umido (wet air oxidation).....	» 620
23.3.8. Forni di gassificazione.....	» 622
23.4. Sezioni di un impianto di termodistruzione.....	» 624
23.4.1. Ricevimento e stoccaggio rifiuti.....	» 625
23.4.2. Sezione di combustione.....	» 625
23.4.3. Sezione di recupero energia.....	» 626
23.4.4. Sezione di depurazione fumi.....	» 626
23.4.5. Opere complementari e accessorie.....	» 627
23.5. Dimensionamento delle sezioni di combustione e di recupero energetico.....	» 628
23.5.1. Sezione di combustione.....	» 628
23.5.1.1. Parametri della combustione.....	» 628
23.5.1.2. Camera di combustione primaria.....	» 630
23.5.1.3. Camera di post-combustione.....	» 632
23.5.1.4. Efficienza di combustione.....	» 633
23.5.1.5. Produzione di scorie e ceneri volanti.....	» 634
23.5.1.6. Bilanci di materia ed energia: calcolo delle portate di aria e fumi.....	» 634
23.5.2. Sezione di recupero energetico.....	» 640
23.5.2.1. Recupero di vapore in caldaia.....	» 640
23.5.2.2. Recupero di energia elettrica.....	» 641
23.6. Fattori di impatto ambientale.....	» 652
23.6.1. Diverse forme di impatto ambientale.....	» 652
23.6.2. Emissioni inquinanti in atmosfera.....	» 653
23.6.2.1. Classificazione generale degli inquinanti.....	» 653
23.6.2.2. Emissioni di macroinquinanti dalla termodistruzione dei RU.....	» 654
23.6.2.2.1. Polveri.....	» 654
23.6.2.2.2. Acidi alogenidrici.....	» 655
23.6.2.2.3. Ossidi di zolfo e azoto.....	» 656
23.6.2.3. Emissioni di microinquinanti inorganici dalla termodistruzione dei RU.....	» 657
23.6.2.4. Emissioni di microinquinanti organici dall'incenerimento dei RU.....	» 661
23.6.2.4.1. Microinquinanti organici diversi dalle diossine.....	» 661
23.6.2.4.2. Diossine.....	» 662
23.6.2.4.2.1. Chimica ambientale delle diossine.....	» 662
23.6.2.4.2.2. Fonti di diossine.....	» 664
23.6.2.4.2.3. Emissioni dall'incenerimento dei rifiuti... ..	» 666

23.6.2.4.2.3.1. Ruolo dei precursori	» 666
23.6.2.4.2.3.2. Ruolo dei parametri della combustione	» 667
23.6.2.4.2.3.3. Ruolo della post-combustione	» 668
23.6.2.4.2.3.4. Possibilità di riformazione delle diossine nelle ceneri volanti a valle della combustione	» 670
23.6.2.4.2.3.5. Fattori di emissione	» 671
23.7. Tecnologie di depurazione fumi	» 671
23.7.1. Limiti all'emissione	» 671
23.7.2. Rimozione del particolato	» 672
23.7.3. Rimozione dei gas acidi	» 674
23.7.4. Rimozione fine di mercurio e diossine	» 675
23.7.5. Rimozione di NO _x	» 677
23.7.6. Schema generale di trattamento fumi negli inceneritori di RU	» 678

Capitolo 24. Trattamento dei rifiuti industriali

24.1. Opzioni di trattamento	» 683
24.2. Sistema organizzativo dei centri specializzati nel trattamento dei rifiuti industriali	» 685
24.3. Controllo di qualità dei rifiuti	» 686
24.4. Stoccaggio dei rifiuti e preparazione al trattamento	» 688
24.4.1. Operazione di stoccaggio	» 688
24.4.2. Preparazione dei rifiuti al trattamento	» 690
24.5. Trattamenti chimico-fisici	» 690
24.5.1. Trattamenti di immobilizzazione di rifiuti solidi e fanghi	» 690
24.5.1.1. Scopo dei processi di immobilizzazione e classificazione	» 690
24.5.1.2. Processi con leganti inorganici	» 691
24.5.1.2.1. Processi a base di cemento o cemento/silicati	» 691
24.5.1.2.1.1. Meccanismi di immobilizzazione	» 691
24.5.1.2.1.2. Rifiuti trattabili	» 692
24.5.1.2.1.3. Processi brevettati	» 692
24.5.1.2.2. Processi a base di calce/silicati	» 693
24.5.1.2.3. Processi a base di argilla	» 694
24.5.1.3. Processo di vetrificazione	» 695
24.5.1.4. Processi con leganti organici	» 699
24.5.1.4.1. Uso di leganti termoplastici	» 699
24.5.1.4.2. Uso di leganti polimerici termoindurenti	» 700
24.5.1.5. Riutilizzo dei rifiuti immobilizzati	» 700
24.5.1.5.1. Aspetti generali del riutilizzo	» 700
24.5.1.5.2. Esempio di recupero delle scorie di incenerimento come conglomerato cementizio	» 701
24.5.2. Trattamenti di rifiuti e terre contaminate da composti organici alogenati	» 704

24.5.3.	Altri trattamenti chimico-fisici per rifiuti solidi e fanghi.....	»	706
24.5.4.	Trattamenti chimico-fisici di rifiuti liquidi	»	709
24.6.	Trattamenti termici	»	711
24.6.1.	Classificazione generale dei trattamenti termici	»	711
24.6.2.	Termodistruzione.....	»	712
24.6.3.	Essiccamento termico.....	»	715
24.6.4.	Wet-oxidation e supercritical water oxidation	»	719
24.6.5.	Evaporazione e distillazione.....	»	722
24.6.5.1.	Recupero di solventi esausti.....	»	722
24.6.5.2.	Recupero del mercurio metallico da fanghi, terre contaminate e rifiuti solidi.....	»	722
24.6.6.	Altri processi termici.....	»	724
24.6.6.1.	Desorbimento termico.....	»	724
24.6.6.2.	Estrazione in corrente di vapore.....	»	724
24.7.	Trattamenti biologici	»	724
24.8.	Trattamenti speciali	»	725
24.8.1.	Trattamento di apparecchiature contaminate da PCB	»	726
24.8.1.1.	Caratteristiche dei PCB e campi di impiego	»	726
24.8.1.2.	Tecniche di decontaminazione delle apparecchiature.....	»	728
24.8.1.2.1.	Sostituzione del liquido isolante	»	729
24.8.1.2.2.	Processi di dealogenazione chimica	»	729
24.8.1.3.	Altri processi di dealogenazione	»	731
24.8.1.4.	Smaltimento degli apparecchi contaminati a fine ciclo di vita	»	732
24.8.2.	Trattamento dei RAEE	»	734
24.8.2.1.	Classificazione dei RAEE e nuovo sistema di gestione... ..	»	734
24.8.2.2.	Trattamento dei RAEE: le componenti pericolose	»	735
24.8.2.3.	Trattamento dei RAEE: il processo di recupero-riciclaggio... ..	»	737
24.8.2.3.1.	Raccolta e accettazione nei centri di trattamento/smaltimento.....	»	738
24.8.2.3.2.	Selezione delle parti pericolose.....	»	738
24.8.2.3.3.	Smontaggio dei RAEE con recupero delle frazioni macro, destinabili al riciclaggio.....	»	739
24.8.3.	Trattamento e smaltimento di pile e batterie esauste	»	740
24.8.4.	Recupero dei rifiuti siderurgici per la produzione di conglomerato cementizio	»	743
24.8.5.	Recupero e smaltimento di oli lubrificanti esausti	»	745
24.8.5.1.	Recupero e riciclaggio come lubrificante	»	746
24.8.5.2.	Uso come combustibile.....	»	747
24.8.5.3.	Produzione di gasolio e altri idrocarburi.....	»	447
24.8.5.4.	Rigenerazione.....	»	748
24.8.5.5.	Termodistruzione	»	750
24.8.6.	Recupero e smaltimento degli oli vegetali esausti	»	750

Capitolo 25. La discarica controllata di rifiuti

25.1. Obiettivi del sistema di smaltimento	» 753
25.2. Classificazione delle discariche	» 753
25.3. Indagini preliminari alla progettazione	» 755
25.3.1. Vincoli relativi al sito	» 755
25.3.2. Indagini geologiche e idrogeologiche	» 756
25.3.3. Studio idrografico, idrologico e meteorologico	» 758
25.3.4. Aspetti urbanistici, paesaggistici e naturalistici	» 758
25.4. Tecniche alternative di costruzione	» 759
25.4.1. Sistema a trincea	» 759
25.4.2. Sistema a deposito progressivo	» 760
25.5. Criteri di progettazione	» 762
25.5.1. Impermeabilizzazione	» 762
25.5.2. Drenaggio e recupero del percolato	» 766
25.5.2.1. Produzione di percolato	» 766
25.5.2.2. Qualità del percolato in discariche di RU	» 769
25.5.2.3. Drenaggio e recupero del percolato	» 770
25.5.2.4. Riciclo del percolato	» 772
25.5.2.5. Depurazione del percolato	» 773
25.5.3. Produzione, captazione e qualità del biogas	» 774
25.5.3.1. Principi di biodegradazione dei rifiuti	» 774
25.5.3.2. Produzione specifica di biogas	» 775
25.5.3.3. Cinetica di produzione del biogas	» 776
25.5.3.4. Produzione cumulativa di biogas	» 777
25.5.3.5. Captazione del biogas	» 778
25.5.3.6. Qualità del biogas	» 781
25.5.3.6.1. Principali componenti	» 781
25.5.3.6.2. Microcomposti organici	» 781
25.5.4. Utilizzo energetico del biogas	» 784
25.5.4.1. Depurazione del biogas	» 784
25.5.4.2. Forme di utilizzo energetico	» 785
25.5.5. Sistemi di copertura e recupero della superficie delle discariche ..	» 786
25.5.5.1. Copertura definitiva	» 786
25.5.5.2. Coperture giornaliere e coperture provvisorie	» 788
25.5.5.3. Recupero della superficie	» 788
25.5.6. Altre opere e infrastrutture	» 788
25.6. Gestione post-chiusura	» 789
25.6.1. Monitoraggio ambientale	» 789
25.6.1.1. Obiettivi generali del monitoraggio	» 789
25.6.1.2. Monitoraggio delle acque	» 790
25.6.1.3. Monitoraggio dell'aria	» 791
25.6.1.4. Altre forme di monitoraggio	» 792
25.6.2. Verifica di compatibilità di rifiuti speciali diversi	» 793

Parte Terza Aria

Introduzione. Un'aria più salubre con le nuove strategie e le innovazioni Tecnologiche	» 797
 Capitolo 26. Inquinamento atmosferico	
26.1. Richiami normativi.....	» 799
26.1.1. Emissioni	» 799
26.1.2. Qualità dell'aria	» 800
26.2. Monitoraggio della qualità dell'aria	» 805
26.2.1. Classificazione delle stazioni	» 805
26.2.2. Individuazione dei punti di campionamento	» 806
26.2.2.1. Stazioni per la valutazione dell'esposizione della popolazione negli agglomerati	» 807
26.2.2.2. Stazioni per la valutazione dell'esposizione della popolazione in aree esterne agli agglomerati	» 809
26.2.2.3. Stazioni per la valutazione dell'esposizione degli ecosistemi e della vegetazione	» 810
26.2.3. Posizionamento su microscala.....	» 811
26.2.4. Sensori da posizionare in funzione della tipologia di campionamento	» 812
 Capitolo 27. Modellistica di settore	
27.1. Introduzione.....	» 815
27.2. Scenario 1 – Dispersione di inquinanti rilasciati da sorgenti lineari, sorgenti areali, sorgenti puntiformi non isolate.....	» 815
27.2.1. Impiego e campo di applicabilità	» 815
27.2.2. Scala spaziale e ambito territoriale.....	» 816
27.2.3. Scala temporale	» 816
27.2.4. Tipologia di sorgenti	» 816
27.2.5. Tipologia di inquinante	» 816
27.2.6. Tipologie di modelli applicabili	» 817
27.3. Scenario 2 – Dispersione di inquinanti rilasciati da sorgenti puntiformi anche isolate, areali e lineari relative al traffico extraurbano.....	» 818
27.3.1. Impiego e campo di applicabilità	» 818
27.3.2. Scala spaziale e ambito territoriale.....	» 818
27.3.3. Scala temporale	» 818
27.3.4. Tipologia di sorgenti	» 819
27.3.5. Tipologia di inquinante	» 819
27.3.6. Tipologie di modelli applicabili	» 819
27.4. Scenario 3 – Formazione e dispersione di inquinanti secondari	» 821
27.4.1. Impiego e campo di applicabilità	» 821

28.3.7. Rimozione di vapori organici	» 861
28.3.7.1. Classificazione generale dei processi utilizzabili.....	» 861
28.3.7.1.1. Rimozione per adsorbimento	» 862
28.3.7.2. Combustione termica catalitica	» 864
28.3.7.2.1. Combustione termica.....	» 864
28.3.7.2.2. Combustione catalitica	» 866
28.3.7.3. Condensazione	» 867
28.3.7.4. Filtrazione biologica	» 869
Appendice A. Limiti di emissione degli scarichi idrici definiti	
dal D.Lgs. 152/2006.....	» 873

Parte Prima

Acqua

Introduzione

L'ACQUA DA RISORSA VITALE A FATTORE DI CRISI

L'acqua è l'elemento dominante del pianeta Terra. Ricopre infatti la superficie terrestre per il 75% e tuttavia solo lo 0,62% è direttamente fruibile per gli usi vitali dell'uomo. Questa quota è costituita dalle acque dolci di superficie e del sottosuolo, mentre mari e oceani, in quanto salati, non sono idonei all'uso idropotabile come anche all'uso irriguo, non potendo così soddisfare la sete d'acqua e di cibo della popolazione mondiale in sensibile crescita. In realtà le moderne tecnologie a membrane microporose consentono interessanti recuperi di acqua dolce dalle acque saline però a costi accessibili solo a una quota risibile della popolazione mondiale.

Per una vasta fetta della popolazione mondiale la carenza di acqua e l'assenza di infrastrutture di base idrico-sanitarie (impianti di potabilizzazione e impianti di fognatura e depurazione) rappresenta un serio fattore sanitario e al tempo stesso limitante per lo sviluppo socio-economico. L'ONU indica che circa il 40% della popolazione mondiale soffre di queste carenze con una tendenza a salire al 65% nel 2025. In questa realtà, a causa dell'acqua contaminata o per carenza idrica, ogni anno muoiono al mondo ben 1.600.000 bambini. Tra le aree più critiche si segnalano il Nord-Africa, il Medio Oriente e l'Asia del Sud. L'acqua è vitale per tutte le attività dell'uomo, non solo quelle strettamente legate alla propria sopravvivenza. Pertanto, oltre all'uso idropotabile e irriguo, l'acqua serve per l'industria, per la produzione di energia, per le attività terziarie, per gli usi urbani e perciò una sua carenza si traduce in un freno allo sviluppo della comunità. Il trend di sviluppo in atto in molti Paesi al mondo impone dunque un sempre maggior consumo di acqua attraverso lo sfruttamento delle risorse idriche naturali. Sono però numerose le situazioni in cui la stessa risorsa è condivisa da più Paesi e quindi lo sfruttamento unilaterale porta a pericolose tensioni e competizione tra nazioni. L'ONU indica che questo rischio di contesa riguarda ben 180 aree del pianeta. Tra le più significative si citano:

- la contesa per le acque del fiume Nilo. I Paesi alle fonti (Etiopia, Uganda, Tanzania, Ruanda e Kenya) si sono ribellati all'antica supremazia egiziana sul fiume e ne rivendicano lo sfruttamento delle acque, dichiarando con forza che non intendono più rispettare i patti del 1929 (tra Egitto e potenze coloniali) e del 1959 che in pratica conferivano all'Egitto il controllo delle acque in tempo di secca e diritto di veto a qualsiasi opera sul fiume da parte di altri Paesi a monte. I cinque paesi hanno sottoscritto nel maggio 2010 un nuovo trattato nel

quale si prevede che tutti i paesi possano partecipare allo sfruttamento del fiume. Egitto e Sudan hanno rifiutato di aderire. In particolare da parte egiziana si afferma che “non si può chiedere agli egiziani di rinunciare alla loro cultura e tornare a vivere nel deserto perché voi vi volete impadronire del Nilo. Il fiume è l'unica nostra risorsa d'acqua mentre i Paesi che stanno a monte ne hanno tante altre che purtroppo non sono capaci di sfruttare appropriatamente”;

- la contesa delle acque dei fiumi Tigri ed Eufrate. L'Eufrate è, con 2.760 km di corso, il fiume più lungo dell'Asia occidentale e assieme al Tigri (1.900 km) delimita la regione detta Mesopotamia, culla di antiche civiltà quali i Babilonesi e gli Assiri. L'Eufrate riveste un ruolo di primaria importanza per le regioni di pianura che attraversa: fornisce acqua per l'irrigazione e nei periodi di piena inonda i territori circostanti le sue rive, fertilizzandoli. Nasce nella zona Nord-Est della Turchia e prima di gettarsi nel Golfo Persico attraversa la Siria e l'Iraq. La Turchia sta moltiplicando la costruzione di dighe per promuovere lo sviluppo del suo territorio centrale, l'Anatolia, (principalmente per la produzione di energia e per l'irrigazione), naturalmente riducendo progressivamente la disponibilità di acqua per i Paesi più a valle che manifestano una netta contrarietà a questa politica;
- la contesa per le acque in Medio Oriente. È questa un'area a forte scarsità di acqua. Un Paese come Israele dipende fortemente dalla sua disponibilità, tanto che è indicato come tra quelli che maggiormente ne promuovono il riuso. In questo Paese si contano anche importanti impianti per la dissalazione dell'acqua di mare. Tuttavia una quota rilevante del fabbisogno idrico è soddisfatta dalle acque del Fiume Giordano e dal lago di Tiberiade. Queste riserve idriche dipendono per la quasi totalità dagli immissari che scendono dalle alture del Golan, la regione più nord-orientale di Israele, conquistata alla Siria durante la Guerra dei sei giorni (giugno 1967), ufficialmente annessa da Israele ma rivendicata dalla Siria. Il fiume Giordano infatti nasce sul Monte Hermon per poi alimentare il lago di Tiberiade e infine disperdersi nel Mar Morto. Lo stesso lago di Tiberiade è alimentato da tanti altri immissari che discendono dalle alture del Golan.

In questo contesto si comprende l'importanza di sviluppare una politica mondiale dell'acqua, capace di dirimere le potenziali contese e assicurare un equilibrato accesso alla risorsa da parte di ogni Paese e ogni cittadino. L'argomento è in discussione da tanti anni e solo nel 2010 l'ONU è riuscito a realizzare un primo passo verso questa politica. Infatti, la Risoluzione ONU del 29 luglio 2010 dichiara per la prima volta nella storia il diritto all'acqua da parte di ogni persona come un diritto umano universale e fondamentale. Un

passaggio che ai più appare ovvio, ma che è stato oggetto di lunghi dibattiti nel passato giacché la comunità mondiale si era ancorata al concetto di “acqua” come “bisogno fondamentale” rifiutando di accoglierlo come “diritto fondamentale”, perché in quanto tale avrebbe significato che i Paesi maggiormente sviluppati avrebbero dovuto accollarsi gli oneri per l’accesso all’acqua dei Paesi più indigenti. La risoluzione del 2010 sottolinea che l’acqua potabile, oltre a essere un diritto di ogni uomo che è essenziale al pieno godimento della vita ed è fondamento indispensabile per godere di tutti gli altri diritti umani.

Si diceva che la risoluzione è solo un primo passo perché non è vincolante, ovvero afferma un principio (non un obbligo) secondo cui gli Stati sono chiamati ad attuare iniziative per garantire a tutti un’acqua potabile di qualità, accessibile a prezzi economici. È stata approvata dall’Assemblea Generale dell’ONU con 122 voti favorevoli, 41 astensioni e nessun contrario.

Capitolo 1

CARATTERIZZAZIONE DELLE ACQUE

1.1. Ciclo delle acque e inquinamento

1.1.1. Ciclo idrologico naturale delle acque

L'acqua è uno dei principali composti presenti in natura. Nella tabella 1.1 è rappresentata la distribuzione dell'acqua sull'intero pianeta. Appare che oltre il 97% della totale disponibilità d'acqua è rappresentato dagli oceani e come tale, per l'elevato contenuto salino, non è prontamente utilizzabile per molti scopi sia civili, che agricoli, che industriali.

Una quota residua superiore al 2%, costituita da formazioni di neve e ghiaccio, è anch'essa di difficile approvvigionamento. Come risultato si ha che soltanto una modestissima frazione del totale (lo 0,62%, costituito da acqua dolce contenuta in laghi, fiumi e falde) presenta caratteristiche di agevole approvvigionamento da parte dell'uomo.

Nella figura 1.1 è rappresentato il ciclo idrologico naturale dell'acqua.

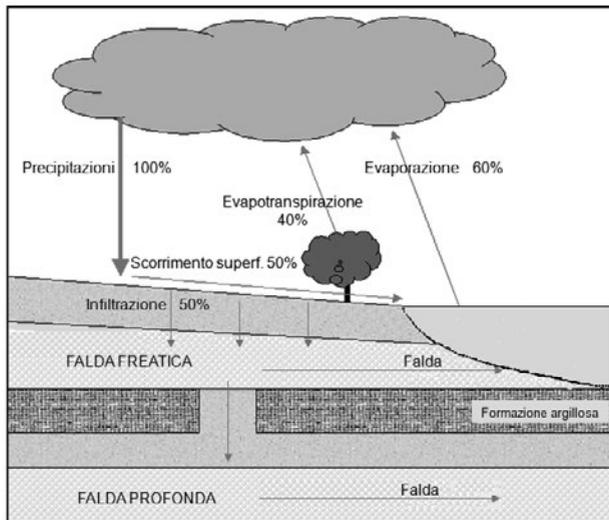


Figura 1.1. Ciclo idrologico naturale dell'acqua

L'acqua, allo stato di vapore, condensa nell'atmosfera formando le nubi che poi la restituiscono al suolo sotto forma di precipitazioni (pioggia, neve, grandine). Una volta raggiunto il suolo, l'acqua defluisce in parte sulla superficie, alimentando corsi d'acqua, laghi e oceani, e in parte si infiltra nel suolo, arricchendo l'acquifero sotterraneo, il quale, nel corso del suo lento movimento, va ad alimentare gli oceani o altri corpi idrici superficiali (fiumi e laghi).

L'acqua ha, infine, modo di ritornare in atmosfera, chiudendo così il ciclo naturale, tramite processi di evaporazione delle acque superficiali e di evapotraspirazione della vegetazione.

I tempi di sviluppo dei singoli fenomeni sono in alcuni casi molto brevi (precipitazioni, evaporazione), mentre in altri casi sono estremamente lunghi. Come si può constatare dalla tabella 1.1, il tempo di ricambio degli oceani, delle acque sotterranee e delle calotte polari raggiunge valori paragonabili ai tempi geologici. Ciò significa che un eventuale fenomeno di contaminazione persistente può risolversi naturalmente in tempi molto lunghi e per tutta questa durata una fonte pregiata di acqua destinata all'approvvigionamento idropotabile, come ad esempio sono le acque di falda, non può più essere captata per tale scopo.

Il passaggio da un anello all'altro del ciclo idrologico condiziona la qualità naturale dell'acqua. Considerando, ad esempio, come primo anello di tale ciclo, le condensazioni in atmosfera del vapore acqueo (nubi), si osserva come l'acqua sia praticamente allo stato distillato, con modeste impurità (pulviscolo atmosferico) che agiscono da nuclei di condensazione.

Tabella 1.1. Distribuzione dell'acqua sulla Terra

Località	Volume		Tempo di ricambio (y)
	(10 ³ km ³)	(%)	
Aree terrestri	125,00	0,0090	-
– Laghi	104,00	0,0080	7
– Laghi salati e mari interni	1,25	0,0001	7
– Fiumi	67,00	0,0050	0,031
– Umidità del suolo	8.350,00	0,6100	1
– Acque sotterranee (< 4000 m)	29.200,00	2,1400	1.330-5.000
– Calotte polari e ghiacciai	-	-	8.000
Totale	37.800,00	2,8000	-
Atmosfera (vapor acqueo)	13,00	0,0010	0,027
Oceani	1.320.000,00	97,3000	3
Totale generale	1.360.000,00	100,000 0	-

Successivamente, nel corso della precipitazione al suolo, sotto forma di pioggia o neve, l'acqua si arricchisce ulteriormente di pulviscolo e dei principali gas che compongono l'aria (ossigeno e azoto), i quali vengono solubilizzati. Nello strato più basso dell'atmosfera, in prossimità del suolo, la pioggia solubilizza anche l'anidride carbonica, che è presente a più alte concentrazioni dato l'elevato peso specifico. Inoltre, nel corso del dilavamento atmosferico, la pioggia subisce una prima naturale contaminazione microbiologica a opera dei microrganismi dispersi nell'aria. Nel corso dello scorrimento superficiale, l'erosione del suolo arricchisce notevolmente l'acqua di materiale solido sospeso e di microrganismi; nello stesso tempo, l'acqua esplica le sue

caratteristiche proprietà solventi portando in soluzione le componenti saline del terreno (solfati, cloruri, carbonati, ecc.). La frazione che penetra nel suolo, invece, subisce un effetto di filtrazione di tutti i materiali sospesi e quindi anche della flora microbiologica; nel contempo, si ha la progressiva solubilizzazione dei costituenti del sottosuolo, favorita dall'alto tempo di contatto e dall'elevata superficie interfacciale solido/liquido, con conseguente marcato aumento del contenuto salino dell'acqua. In particolare, un significativo contributo a questa azione solvente dell'acqua è dato dalla presenza, in forma disciolta, di anidride carbonica, come rappresentato dalle due seguenti caratteristiche reazioni di solubilizzazione di formazioni calcaree e ferruginose:



Pertanto, mentre le acque superficiali sono generalmente caratterizzate da elevati contenuti di solidi in sospensione e di flora microbiologica, le acque di falda sono caratterizzate da un alto contenuto di salinità e da una bassa presenza microbiologica e di solidi sospesi.

1.1.2. Modificazioni indotte dalle attività antropiche

Il bilancio idrico e la qualità dell'acqua, durante le varie fasi del ciclo idrologico naturale, subiscono modificazioni in rapporto alle attività dell'uomo e, in alcuni casi, in rapporto all'evolversi di particolari fenomeni di inquinamento naturale. Questi ultimi sono, di norma, limitati ad alcuni fenomeni localizzati, tra i quali spiccano fenomeni eruttivi di origine vulcanica che determinano significative contaminazioni dell'atmosfera (emissioni di anidride solforosa, di ossido di carbonio, pulviscolo, ecc.) e, conseguentemente, delle acque meteoriche. Viceversa, di portata ben più vasta sono le modificazioni indotte dall'attività dell'uomo, le quali investono sia la qualità dell'acqua, sia la sua disponibilità.

Le modifiche indotte sulla disponibilità di acqua sono connesse agli approvvigionamenti che, in linea generale, sono classificabili come indicato in figura 1.2.

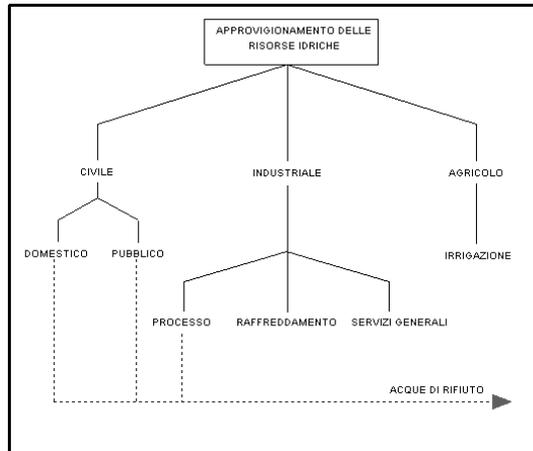


Figura 1.2. Classificazione generale degli usi dell'acqua approvvigionata dall'uomo

Gli usi civili dell'acqua rappresentano il complesso degli approvvigionamenti connessi ai centri urbani e, pertanto, rappresentano la somma degli usi domestici (strettamente legati alle esigenze igieniche e alimentari della popolazione) e degli usi pubblici, che comprendono numerosi servizi quali scuole, alberghi, ospedali, centri collettivi in genere, piscine, mercati, lavaggio strade, fontane, giardini pubblici, servizi antincendio, ecc.

Le modificazioni quantitative del ciclo naturale, in conseguenza dei citati approvvigionamenti, sono particolarmente sensibili per le acque di falda e, secondariamente, per le acque dolci superficiali.

Le modificazioni di qualità sono determinate dallo sversamento dei carichi inquinanti nell'ambiente e, in particolare, dalle cosiddette fonti dirette costituite dalle acque di rifiuto prodotte dalle attività civili e industriali.

Comunque, in questi ultimi anni, sono andate progressivamente segnalandosi, per la loro gravità, anche le fonti indirette di inquinamento delle acque, quali:

- la contaminazione atmosferica (emissioni di polveri e fumi acidi dovuti alla presenza di SO_2 , HCl , NO_x e idrocarburi, originate da combustioni domestiche o industriali, autoveicoli inclusi);
- lo smaltimento incontrollato di rifiuti sul suolo;
- l'impiego agricolo di pesticidi e fertilizzanti azotati che, a causa del trasporto meteorico, hanno causato, in molte aree, gravi fenomeni di contaminazione delle acque superficiali e, soprattutto, di falda a opera di atrazina, molinate, bentazone, simazina, nitrati e altri composti).

In tutti i casi, il veicolo dell'inquinamento è costituito dall'acqua meteorica (figura 1.3).

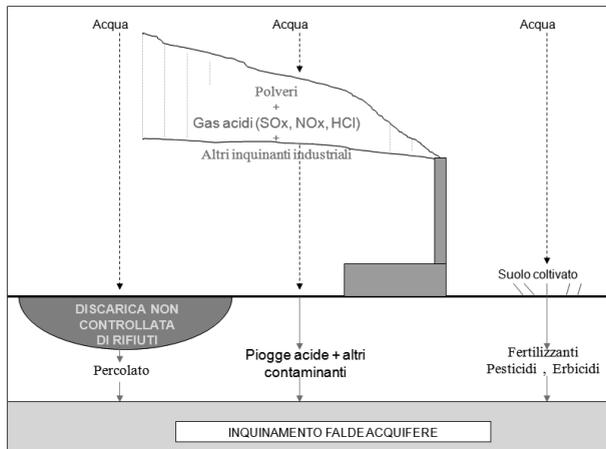


Figura 1.3. Fonti indirette di inquinamento delle acque

Va precisato che non tutte le modificazioni di qualità comportano obbligatoriamente una condizione di inquinamento; questa, infatti, si verifica solo se il livello delle modificazioni risulta tale da rendere l'acqua inadatta alle varie forme di fruizione (attuali o potenziali), o da alterare gli equilibri di vita animale e vegetale presenti.

Conseguentemente si comprende come per la definizione oggettiva dello stato di inquinamento di un'acqua sia indispensabile un termine di raffronto che è costituito dagli standard di qualità.

1.2. Caratterizzazione qualitativa delle acque

1.2.1. Parametri di qualità

1.2.1.1. Parametri fisici e organolettici

Fra i parametri fisici e organolettici vanno annoverati:

- solidi totali, sospesi e disciolti;
- torbidità;
- colore;
- odore;
- sapore;
- temperatura;
- conducibilità elettrica specifica.

1.2.1.1.1. Solidi totali, sospesi e disciolti

I solidi possono essere presenti nelle acque sia in forma sospesa che in forma disciolta. Inoltre, è possibile distinguere fra solidi organici e inorganici.

Nelle acque naturali, i solidi organici sono in genere composti da organismi biologici (cellule algali, microrganismi vari, ecc.) oppure da detriti vegetali; tra i solidi inorganici, invece, è comune la presenza di argille e altri costituenti naturali del suolo.

A questi materiali, che rappresentano i costituenti naturali delle acque, vanno aggiunti i solidi derivanti dall'attività antropica e in particolare, come già detto, quelli derivanti dallo sversamento delle acque di rifiuto.

In caso di liquami domestici, i solidi sono prevalentemente di carattere organico (materiale proteico); nel caso di liquami industriali, invece, i solidi presenti possono avere una natura prettamente organica (ad esempio liquami da industrie alimentari, zootecnia, ecc.) o prettamente inorganica (ad esempio liquami di industria galvanica).

Nella figura 1.4 è rappresentata schematicamente la classificazione dei solidi presenti in un'acqua.

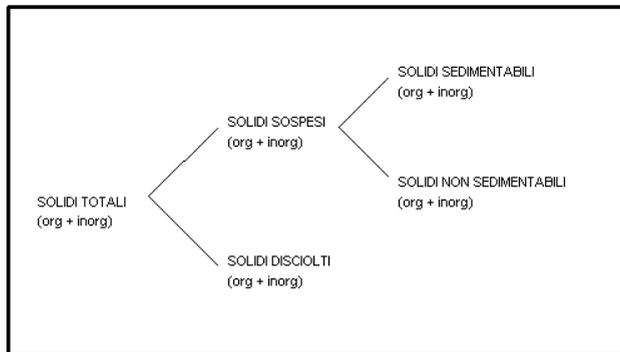


Figura 1.4. Caratterizzazione dei solidi presenti in un'acqua

La misura dei solidi totali viene effettuata con processi evaporativi, effettuati con stufe da laboratorio che portano il campione di liquame a secco, per poi procedere alla pesatura del residuo.

Il risultato viene espresso in mg di solido residuo/litro H₂O (mg l⁻¹). Per evaporare l'acqua è sufficiente una temperatura di 105 °C, appena superiore al punto di ebollizione. Di regola, però, si opera a 180 °C per fare evaporare anche l'acqua occlusa meccanicamente all'interno delle particelle solide.

Volendo distinguere il contenuto organico da quello inorganico, è sufficiente elevare la temperatura del residuo secco a 600 °C per 1 ora (operazione che viene eseguita in muffola). La frazione organica del residuo viene convertita in anidride carbonica, vapor d'acqua e altri gas che si disperdono in atmosfera. Il materiale residuo rappresenta il cosiddetto *residuo inorganico* o *residuo fisso* quantificabile mediante semplice pesatura. La differenza tra il residuo a 180 °C

e quello a 600 °C rappresenta pertanto la frazione organica, sempre espressa in mg l^{-1} . Pertanto si ha:

$$\text{residuo } 180 \text{ }^{\circ}\text{C} = \text{solidi totali}$$

$$\text{residuo } 600 \text{ }^{\circ}\text{C} = \text{solidi totali inorganici}$$

$$\text{residuo } 180 \text{ }^{\circ}\text{C} - \text{residuo } 600 \text{ }^{\circ}\text{C} = \text{solidi totali organici}$$

Nella realtà si constata che alcuni solidi inorganici si decompongono a temperatura inferiore a 600 °C, liberando gas. Il caso tipico è rappresentato dal carbonato di magnesio che, a 350 °C, si scinde in ossido di magnesio e anidride carbonica:



Analogo risultato può essere determinato da alcuni sali d'ammonio.

Queste alterazioni, in genere, non sono tali da ridurre la significatività del risultato analitico conseguito. Tuttavia, a stretto rigore scientifico, volendo tener conto anche di questi fenomeni, appare più corretto definire il residuo a 600 °C come *solidi totali non volatili* (STNV) e la differenza tra i due residui come *solidi totali volatili* (STV).

La determinazione dei solidi sospesi è basata sugli stessi principi: occorre, però, far precedere le determinazioni dei residui da una filtrazione del campione d'acqua allo scopo di separare i solidi sospesi da quelli totali.

Come si può constatare dalla figura 1.5, la classificazione dei solidi in un'acqua può anche avvenire sulla base delle dimensioni, che possono essere suddivise in 3 fasce:

- solidi disciolti: consistono in piccole molecole o ioni di dimensione inferiore a 10^{-6} mm;
- colloidali: sono piccole particelle in sospensione stabile (non decantano) di dimensione compresa tra 10^{-6} mm e 10^{-3} mm;
- solidi sospesi: particelle di dimensione superiore a 10^{-3} mm.

A stretto rigore, quindi, anche i colloidali farebbero parte dei solidi sospesi. Tuttavia, la discriminante a livello analitico è costituita dalla dimensione dei pori del filtro. Di norma sono impiegati filtri a membrana con fori da 1 μm o di poco inferiori (0,45 μm secondo le metodiche IRSA-CNR per le acque, adottate in Italia).

Per la determinazione dei solidi disciolti vengono analizzati i due residui, relativamente al filtrato (fase liquida passata attraverso il filtro).

La determinazione dei solidi sedimentabili viene effettuata in cono Imhoff (cono di vetro trasparente da 1.000 ml, graduato), nel quale il liquido viene mantenuto in

condizioni statiche per un tempo prefissato di 2 ore. Il risultato è rappresentato dal volume di fango sedimentato, espresso in ml per litro di campione (ml l^{-1}). Pertanto, mentre per tutti gli altri solidi la determinazione è di tipo gravimetrico (mg l^{-1}), per i solidi sedimentabili è di tipo volumetrico (ml l^{-1}).

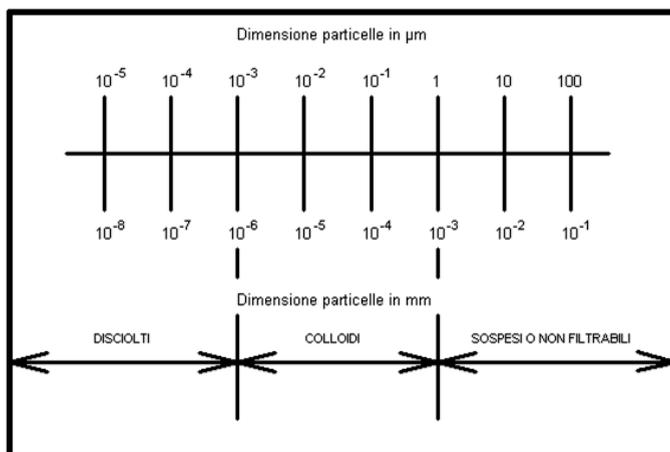


Figura 1.5. Classificazione dei solidi in acqua in base alle dimensioni

1.2.1.1.2. Torbidità

La torbidità viene misurata diffondendo raggi di luce attraverso il campione d'acqua e valutando gli effetti di assorbimento e diffusione, i quali sono tanto più pronunciati quanto maggiore è la presenza di solidi in sospensione. In questo senso la torbidità è direttamente correlata al contenuto di solidi sospesi, valutato con il metodo dei residui prima menzionato.

Occorre però precisare che, mentre per quest'ultima determinazione è ininfluenza la distribuzione di dimensioni delle particelle in sospensione, la stessa risulta invece fondamentale per la torbidità. Così, ad esempio, un sassolino in un campione d'acqua fornisce un riscontro significativo ai solidi sospesi e nessun riscontro alla torbidità. Se, però, esso viene finemente triturato e poi disperso in acqua, la torbidità assume valori significativi, senza che la massa dei solidi presente sia stata modificata.

La misura della torbidità è tipica delle acque naturali e di approvvigionamento perché a essa vengono direttamente correlati effetti indesiderati quali:

- incidenza sul gusto e sull'odore, specie se i solidi colloidali associati alla torbidità sono di natura organica oppure se costituiscono nuclei di sviluppo di organismi biologici;
- scarsa limpidezza con riflessi negativi per le principali fruizioni dell'acqua (ricreazione e approvvigionamento idropotabile) e per gli

organismi che svolgono reazioni fotosintetiche (alghe) e che vedono la propria attività limitata dalla scarsa penetrazione della luce solare. La misura della torbidità è effettuata per via fotometrica determinando la percentuale di luce, di una data intensità, che viene diffusa sulla perpendicolare del raggio incidente. Nella figura 1.6, è schematizzato il principio dello strumento impiegato (nefelometro).

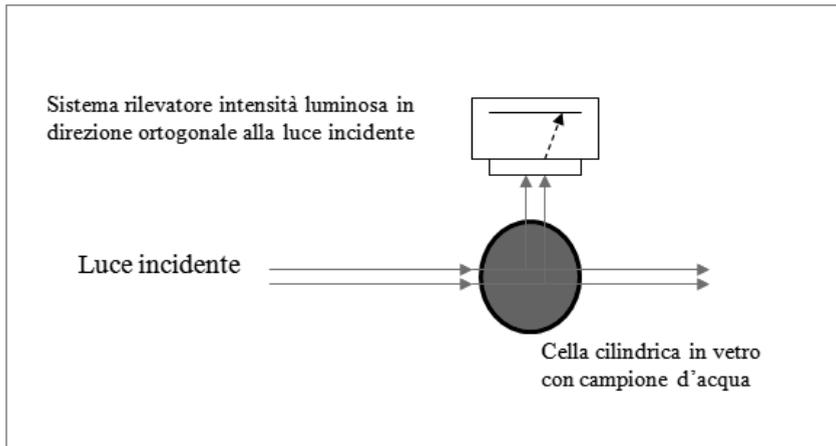


Figura 1.6. Schema di nefelometro per la misura della torbidità (vista in pianta)

In effetti, la misura viene espressa non in termini assoluti ma come comparazione con soluzioni standard di torbidità ottenute con sospensioni di silice (allo scopo è usualmente impiegata farina fossile) oppure con sospensioni di formazina.

La misura della torbidità può essere, pertanto, espressa come segue:

- unità di silice ($\text{mgSiO}_2 \text{ l}^{-1}$);
- unità di formazina (FTU), definita anche come NTU ovvero *Nephelometric Turbidity Unit*;
- unità Jackson (JTU), oggi in sostanziale disuso, basata sull'impiego di torbidimetri a candela di Jackson.

I fattori di conversione delle prime due unità sono:

$$\text{unità di silice/NTU} = 0,4$$

Valori limite tipici per le acque potabili sono ad esempio quelli espressi dalla Direttiva CEE 778/80 di $1 \text{ mgSiO}_2 \text{ l}^{-1}$ come valore guida (valore ideale a cui tendere) e $10 \text{ mg SiO}_2 \text{ l}^{-1}$ come concentrazione massima ammissibile¹.

¹ La direttiva di cui sopra è stata superata dalla nuova Direttiva 98/83/EC, recepita in Italia dal D.Lgs. 31/2000. Si esprime molto genericamente, abbandonando standard numerici e limitandosi a definire l'acqua "accettabile per il consumatore" (per odore, sapore, colore, torbidità).

1.2.1.1.3. Colore

L'acqua pura è incolore. Tuttavia le acque naturali possono assumere colorazioni più o meno lievi, sia per effetti naturali che per vere e proprie cause di inquinamento determinate da scarichi urbani e industriali. La colorazione naturale assume, in genere, toni giallo-marroni deboli ed è determinata da residui vegetali in stato di decomposizione, con formazione di tannini, acido umico e relativi umati.

Gli effetti della colorazione, indotta dagli scarichi urbani e industriali, possono essere diretti o indiretti.

Esempio tipico di colorazione indiretta è la colorazione verde dei bacini eutrofici, determinata dall'anomalo sviluppo algale che si verifica in conseguenza di esagerati apporti di sostanze nutrienti (fosforo, azoto).

I casi più tipici di colorazione diretta sono rappresentati dagli scarichi delle industrie tessili (tintorie), dell'industria cartaria, dell'industria chimica e di molti altri settori industriali.

La misura del colore viene effettuata per confronto con colori standardizzati. Sono di norma utilizzate soluzioni di platino-cobalto (cloroplatino potassico + cloruro di cobalto). Il risultato viene espresso in unità Hazen (ove la singola unità corrisponde a 1 mg l^{-1} di soluzione Pt-Co).

Per evitare interferenze, l'acqua viene prima filtrata per eliminare i solidi in sospensione.

Valori limite tipici per le acque potabili sono ad esempio quelli espressi dalla Direttiva CEE 778/80 di 1 unità Hazen come valore guida e 20 unità Hazen come concentrazione massima ammissibile.

Nel campo delle acque di rifiuto è diffusa l'applicazione di metodi di misura più grossolani quali "il numero di diluizioni occorrenti per rendere il colore non più percettibile". Si tratta di una tecnica basata sull'osservazione diretta di un campione d'acqua di spessore 10 cm (altezza d'acqua) contenuto in un prisma di vetro (la normativa italiana prevede, per lo scarico in acque superficiali, un limite di 20 diluizioni per rendere non più percettibile il colore).

1.2.1.1.4. Odore e sapore

La determinazione dei parametri di odore e sapore è tipica delle acque di approvvigionamento e, in particolare, delle acque potabili.

Molte sostanze organiche e inorganiche conferiscono odore e sapore alle acque. I composti inorganici, in genere, incidono più sul gusto, mentre svariati composti organici di origine naturale o antropica (apporto di acque di rifiuto) incidono sia sul sapore che sull'odore.

Anche la decomposizione biologica dei composti organici può dare luogo ad alterazioni di sapore e odore; un esempio particolare è rappresentato dalla

riduzione di composti solforati fino alla produzione di idrogeno solforato (H_2S), che conferisce alle acque un pessimo gusto e il caratteristico odore di uova marce. Anche diverse specie algali sono causa di alterazioni di sapore e odore, sia per effetti diretti che indiretti (prodotti di decomposizione).

La misura di odore e sapore può essere fatta attraverso la ricerca analitica (metodi cromatografici) delle specifiche sostanze, se ben identificabili.

Tuttavia, questa determinazione analitica non sempre rende ragione dei fenomeni di sapore e odore nel loro complesso e, in particolare, delle azioni sinergiche che possono essere esercitate da differenti composti.

Un test qualitativo, che può sopperire a questo inconveniente, si basa sulla percezione di odore e sapore da parte dell'uomo ed è costituito dal metodo del tasso di diluizione (TD), basato sul numero di diluizioni del campione con acqua distillata (ovvero sufficientemente priva di odore e sapore) necessarie per realizzare la scomparsa del fenomeno odoroso o di alterazione del sapore. Il giudizio viene espresso da un gruppo di esaminatori variabile da un minimo di 5 a un massimo di 10:

$$TD = \frac{B}{A} \quad (1.4)$$

dove

TD = tasso di diluizione

A = volume del campione d'acqua

B = volume di acqua di diluizione priva di odore.

La sensibilità degli esaminatori viene testata determinando il valore della soglia di percezione rispettivamente per l'alcool butilico (generalmente $1 \div 8 \text{ mg l}^{-1}$), nella valutazione dell'odore, e per una soluzione contenente $0,01 \text{ mg l}^{-1}$ di fenolo (alla quale vengono aggiunti $0,1 \text{ mg l}^{-1}$ di cloro libero), nella valutazione del sapore.

Per quanto riguarda l'odore, il risultato viene espresso anche come TON (*Threshold Odor Number*), così definito:

$$TON = \frac{A + B}{A} \quad (1.5)$$

Quindi, in presenza di un'acqua priva di odore, il TON vale 1.

La Direttiva CEE 778/80 sulle acque potabili fissava per odore e sapore dei valori guida (obiettivi cui tendere) pari a:

$$TD = 0 \quad (TON = 1)$$

e concentrazioni massime ammissibili pari a:

- odore:

$$TD = 2 \text{ (TON = 3)} \quad \text{per } T = 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$TD = 3 \text{ (TON = 4)} \quad \text{per } T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

– sapore:

$$TD = 3 \quad \text{per } T = 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$TD = 3 \quad \text{per } T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

I vari odori percepiti, inoltre, possono essere classificati, a seconda della loro natura, come illustrato nella tabella 1.2.

Tabella 1.2. Classificazione degli odori in base alla loro natura

Codice	Natura dell'odore	Descrizione dell'odore
A	Aromatico	Canfora, lavanda, limone, spezie
B	Balsamico	Fiori diversi
C	Chimico	
C _c	Cloro	Cloro libero
C _h	Idrocarburo	Petrolio e derivati
C _m	Medicinale o farmaceutico	Fenolo iodofornio
C _s	Solfureo	Idrogeno solforato
D	Sgradevole	-
E	Terroso	Terra umida
F	Fecale	Pozzo nero
G	Erboso	Erba pestata
M	Muffa	Cantina umida
V	Vegetale	Radici vegetali

Analogamente, i sapori possono essere classificati, a seconda della loro natura, come illustrato nella tabella 1.3.

Tabella 1.3. Classificazione dei sapori in base alla loro natura

Codice	Origine	Natura del sapore	Descrizione del sapore
Mb	Minerale	Bicarbonato sodico	Acqua gassata
Mg		Magnesiaco	Salato ed amaro
Mn		Metallico	Tracce di Fe o Cu
Ms		Salato	0,5 g l ⁻¹ di NaCl minimo
Oh	Organica	Idrocarburi	Petrolio e derivati
Om		Medicinale	Prodotti fenolici
Ot		Terra	-
Ov		Sostanze vegetali	Acque stagnanti

In tabella 1.4 sono riportati i limiti di percezione dei sapori.

Tabella 1.4. Limite di percettibilità dei sapori (concentrazione espressa in mg l⁻¹)

Sostanza	Nettamente percettibile	Debolmente percettibile	Non rilevabile
CaCl ₂ , NaCl	600	300	150
MgCl ₂	100	60	-
FeSO ₄	7	3,5	1,75
CuSO ₄	7	3,5	1,75
FeCl ₃	30	15	7,5
H ₂ S	1,15	0,55	0,30
H ₂ SO ₄	4	2	1
CaOCl ₂	0,5	0,2	0,05
Cl ₂	0,1	0,05	0,01

1.2.1.1.5. Temperatura

La conoscenza della temperatura è importante perché tale parametro non solo ha un effetto su tutte le reazioni chimiche e biochimiche che avvengono negli ambienti acquosi, ma ha anche un effetto sulla solubilità dell'ossigeno in acqua. La temperatura, inoltre, influenza la solubilità dei composti chimici e anche la densità dell'acqua. Come noto, la massima densità dell'acqua si ha a 4 °C, mentre decresce a temperature inferiori e superiori. Quest'aspetto determina gli effetti di stratificazione dei laghi profondi, come verrà esaminato in dettaglio in un apposito capitolo.

1.2.1.1.6. Conducibilità elettrica specifica

La conducibilità elettrica specifica rappresenta una misura approssimata dei solidi disciolti in acqua. Si basa sulla capacità dell'acqua di condurre elettricità in funzione della forza ionica del mezzo acquoso. La misura è molto semplice e si effettua impiegando un misuratore di conducibilità il cui funzionamento è basato sul principio del ponte di Wheatstone.

La misura standard si riferisce, di regola, ad una temperatura di 20 °C ed il risultato viene espresso in $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Come si è detto, la conducibilità elettrica specifica è solo approssimativamente correlata al contenuto di solidi totali disciolti, in quanto essa è influenzata dalla maggiore o minore ionizzazione dei sali disciolti e dalla mobilità degli ioni stessi. Inoltre, è influenzata anche dalla temperatura.

A livello indicativo, si riscontrano rapporti tra conducibilità elettrica specifica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) e solidi totali disciolti (mg l⁻¹) variabili tra 1 e 2.

1.2.1.2. Parametri chimici e biochimici

1.2.1.2.1. Domanda biologica di ossigeno (BOD)

1.2.1.2.1.1. Definizione di BOD

Il BOD (*Biological Oxygen Demand*) rappresenta una misura del contenuto di sostanza biodegradabile. Si tratta di una misura indiretta, giacché viene determinato il quantitativo di ossigeno consumato dalla flora batterica presente nell'acqua per ossidare i composti biodegradabili, i quali, di regola, sono composti organici (vengono trasformati biochimicamente in CO_2 e H_2O). Vi sono, tuttavia, esempi in cui il substrato ossidato dai batteri è costituito da sostanza inorganica; il caso più noto è l'ossidazione dell'ammoniaca a nitriti e poi a nitrati a opera dei cosiddetti *batteri nitrificanti* appartenenti alle specie *nitrosomonas* e *nitrobacter*:



La misura del BOD si basa, dunque, su un processo biochimico aerobico (presenza di sufficienti concentrazioni di ossigeno disciolto in acqua) espletato da una flora batterica già presente nel campione d'acqua (ad esempio liquami domestici, liquami di allevamenti zootecnici) o inocolata appositamente qualora assente (vasta casistica dei liquami industriali).

1.2.1.2.1.2. La cinetica nel test del BOD

In considerazione della grande varietà di reazioni biochimiche coinvolte nell'ossidazione dei substrati complessi presenti nei liquami, nonché della moltitudine di specie batteriche coinvolte, risulta praticamente impossibile un'esatta descrizione sia delle reazioni, sia dell'espressione cinetica. In prima approssimazione, nel test del BOD si assume generalmente valida una cinetica del primo ordine, cioè caratterizzata da una velocità di degradazione proporzionale alla concentrazione di BOD:

$$r = K \cdot B \quad (1.7)$$

dove

r = velocità di rimozione del BOD ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)

B = concentrazione istantanea di BOD (mg l^{-1})

K = costante cinetica (d^{-1}).

Giacché la misura del BOD viene effettuata mediante prova *batch* in bottiglia, si ha:

$$r = -\frac{dB}{dt} \text{ e quindi } \frac{dB}{dt} = -K \cdot B \quad (1.8)$$

La costante cinetica K è influenzata dalla temperatura e dalla tipologia del liquame (maggiore per substrati più facilmente biodegradabili). Integrando l'equazione differenziale di cui sopra tra il tempo iniziale $t=0$ e quello generico t , cui corrispondono rispettivamente il BOD totale (B_0) inizialmente presente nel liquame e il BOD residuo (B), risulta:

$$B = B_0 \cdot e^{-Kt} \quad \text{ovvero} \quad B = B_0 \cdot 10^{-K't} \quad (1.9)$$

in cui $K' = K/2,3$.

L'ossigeno consumato nel processo ossidativo ha un andamento complementare, essendo:

$$C = B_0 - B = B_0 \cdot (1 - e^{-Kt}) \quad \text{ovvero} \quad C = B_0 - B = B_0 \cdot (1 - 10^{-K't}) \quad (1.10)$$

dove

C = consumo di ossigeno (mg l^{-1}).

La rappresentazione della curva relativa all'ossigeno progressivamente consumato (C) è riportata in figura 1.7.

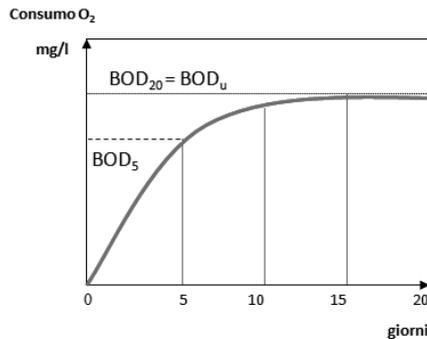


Figura 1.7. Andamento del consumo di O₂ nel tempo

La curva tende asintoticamente al valore BOD_{ultimo} (consumo totale di ossigeno) che per un liquame civile equivale al BOD_{20} .

La temperatura gioca un ruolo fondamentale nella cinetica delle biotrasformazioni: nel campo di sopravvivenza delle specie batteriche ($4\div 30$ °C circa), l'incremento della costante cinetica K avviene secondo la seguente legge (legge di Arrhenius modificata):