

Segunda edición

BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL DE AGUAS Y AGUAS RESIDUALES

César Lazcano Carreño



ECO E
EDICIONES



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS

Contenido



Prólogo	XXIX
Presentación	XXXI
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Los seres vivos en los ambientes acuáticos	3
Generalidades	3
La célula	4
Definición	4
Composición química.....	4
Carbohidratos.....	4
Proteínas	10
Lípidos	16
Ácidos nucleicos	19
Otros componentes químicos del protoplasma celular	26
Conceptos básicos de enzimología	27
Cinética química	27
Orden de una reacción	29
Las enzimas	30
Clases de enzimas	31

Especificidad enzimática.....	31
Cinética enzimática	31
Actividad enzimática	35
Energía y metabolismo	36
Generalidades	36
Primera ley de la termodinámica	36
Segunda ley de la termodinámica	37
Formas de energía que usan los organismos vivos	37
Energía luminosa	37
Potencial eléctrico	38
Oxidación biológica	39
Mecanismos de la oxidación biológica de la materia orgánica	39
Reacciones de óxido-reducción	40
Metabolismo.....	40
Catabolismo	40
Anabolismo (biosíntesis)	44
Fotosíntesis	44
Los virus	46
Generalidades.....	46
Características de los virus	47
Tipos de virus	48
Virus animales y humanos	48
Virus de bacterias o bacteriófagos	52
Virus de plantas	59
Taxonomía y caracterización de los seres vivos	59
Generalidades	59
Procariotes.....	61
Forma y tamaño de las células procarióticas	62
Estructura de la célula procariótica	63
Nutrición en procariotes	69
Crecimiento microbiano	71
Factores para el crecimiento de los procariotes	73
Cinética del crecimiento microbiano en reactores	74
Dominio Archaea	79
Arqueas halofílicas extremas	80
Arqueas sulfatorreductoras	80
Arqueas que carecen de pared celular	81
Arqueas extremotermófilas	81

Arqueas metanogénicas	82
Dominio Bacteria	86
Bacterias patógenas	86
Bacterias que originan infecciones gastrointestinales	86
Bacterias que originan enfermedades emergentes y oportunistas patógenas en aguas	93
Bacterias indicadoras de la calidad del agua	99
Dominio Eukaria	135
Estructura de la célula eucariota	135
Reino Protista	136
Reino fungi	150
Reino Plantae	153
Reino Animalia	157
Capítulo 3. Ecología de los ambientes acuáticos	165
Generalidades	165
Los ecosistemas acuáticos	167
Autodepuración de los ecosistemas acuáticos	169
Factores que intervienen en el proceso de autodepuración	170
Fases de la autodepuración	173
Termodinámica de los ecosistemas acuáticos	174
Principios básicos de ecología aplicados a la termodinámica de los ecosistemas	174
Crecimiento y desarrollo de los ecosistemas	178
Definición termodinámica de exergía	179
El ciclo hidrogeológico	180
Balance hidrológico	184
Los ciclos biogeoquímicos	185
Ciclo del carbono	187
Ciclo del nitrógeno	187
Fijación de N	189
Amonificación	193
Nitrificación	193
Desnitrificación	195
Asimilación del amonio	197
Reducción disimilatoria de nitrato a amonio	198
Proceso Anammox	198
Uso del proceso Anammox en el tratamiento de aguas residuales	200

Ciclo del fósforo	201
Meteorización	202
Solubilización	202
Asimilación	202
Precipitación	202
Mineralización.....	202
Remoción de fósforo en plantas de tratamiento	203
Microorganismos que contribuyen con la precipitación química	204
Ciclo del azufre	204
Oxidación del azufre elemental	206
Reducción del sulfato	206
Capítulo 4. Evaluación de la calidad biológica de las aguas.....	209
Generalidades.....	209
Evaluación de la salud de los ecosistemas y su relación con la salud del hombre y la biota	210
Aspectos generales para el control y vigilancia de las fuentes de agua	212
Uso de bioindicadores y biomarcadores en problemas de salud de los ecosistemas	214
Clasificación de los biomarcadores	215
Biomarcadores de la condición fisiológica	215
Biomarcadores de la condición celular	215
Biomarcadores específicos para metales	215
Las algas como bioindicadores de la calidad de los ecosistemas acuáticos	216
Uso de macroinvertebrados bentónicos como indicadores en cuerpos de agua	217
Principales biomarcadores usados en los monitoreos de ecosistemas acuáticos	219
Biosensores obtenidos por ingeniería genética para el monitoreo de fuentes de agua	224
Biosensores automatizados para análisis de aguas	224
Biosensores bacterianos en contaminación con petróleo	227
Capítulo 5. Características de las aguas residuales	231
Generalidades.....	231
Definición	232
Clases de aguas residuales	232
Aguas residuales domésticas	232
Aguas residuales municipales	233

Aguas residuales industriales	233
Aguas residuales agropecuarias o agroindustriales	233
Aguas residuales de origen minero-metalúrgico	233
Aguas pluviales	234
Características físicas de las aguas residuales	234
Sólidos	234
Sólidos totales (ST).....	234
Temperatura	236
Color.....	236
Olor	237
Transmitancia.....	237
Características químicas de las aguas residuales	237
pH	237
Alcalinidad.....	238
Carbohidratos	239
Proteínas	239
Lípidos.....	239
Nitrógeno.....	239
Fósforo	240
Oxígeno disuelto (OD).....	240
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	241
Demanda química de oxígeno (DQO)	247
Carbono orgánico total (COT)	249
Carga orgánica en los desagües domésticos	249
Características biológicas de las aguas residuales	250
Modelos de reactores biológicos en el tratamiento de aguas residuales	250
Tipos de reactores biológicos	253
Reactores básicos de crecimiento en suspensión	253
De flujo discontinuo	253
De flujo en pistón	254
De flujo continuo y mezcla completa.....	255
Reactores de película fija	257
De lecho relleno	257
De lecho fluidizado (FBR).....	257
Contactor biológico rotatorio (RBC)	258
Capítulo 6. Introducción al tratamiento de aguas residuales	261
Generalidades	261
Objetivos del tratamiento de las aguas residuales	262

Procesos operacionales y unitarios en sistemas de tratamiento de aguas residuales	263
Biodegradabilidad de la materia orgánica en las aguas residuales	265
Importancia de las moléculas de H ₂ y acetato en el proceso de metanogénesis	269
Capítulo 7. Lagunas de estabilización	271
Generalidades	271
Descripción del proceso	271
Clasificación de las lagunas de estabilización	272
Lagunas aerobias	272
Lagunas facultativas.....	275
Lagunas anaeróbicas.....	275
Lagunas anóxicas	276
Lagunas aireadas.....	276
Objetivos del tratamiento por medio de lagunas de estabilización	277
Ventajas del uso de lagunas de estabilización.....	278
Desventajas del uso de lagunas de estabilización	279
Factores que influyen los diseños y funcionamiento de las lagunas de estabilización	279
Viento	279
Temperatura	280
Precipitaciones	281
Tiempo de retención hidráulico (TRH).....	281
Radiación solar	281
Las algas	283
Las bacterias	283
Evaporación	283
Área superficial	284
Cortocircuitos	284
Mezcla	284
pH	284
Materiales tóxicos	285
Oxígeno disuelto (OD).....	285
Nutrientes	285
Cálculos básicos para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	285
Diseño de lagunas anaeróbicas	286
Ejemplo de dimensionamiento y diseño de lagunas anaeróbicas.....	288

Diseño de lagunas facultativas	289
Modelo ecológico en lagunas facultativas	290
Proceso de remoción de patógenos	294
Modelo de mezcla completa y cinética de primer orden	295
Parámetros de diseño de lagunas facultativas	295
Ejemplo de diseño y dimensionamiento de lagunas facultativas	302
Diseño de lagunas aireadas de estabilización	304
Ecuación para el dimensionamiento de lagunas aireadas facultativas	304
Ecuación para el dimensionamiento de lagunas aireadas de mezcla completa	304
Remoción de la DBO	304
Requerimientos de oxígeno	306
Concentración de biomasa en la laguna	307
Producción de lodos	307
Clarificación y depuración del efluente	308
Optimización del diseño de lagunas aireadas	308
Ejemplo de diseño y dimensionamiento de lagunas aireadas	308
Capítulo 8. Lodos activados.....	313
Generalidades.....	313
Aspectos biológicos en los reactores para lodos activados	315
Floc de lodos activados y biofloculación	315
Presencia de bacterias.....	317
Presencia de hongos	319
Presencia de protozoarios y rotíferos	319
Oxidación de la materia orgánica en el tanque de aireación	322
Sedimentación de lodos.....	322
Determinación del índice volumétrico de lodos (SVI).....	323
Remoción de patógenos	324
Sistema convencional de lodos activados.....	324
Parámetros de diseño de reactores para lodos activados	325
Principales problemas que ocurren en sistemas de lodos activados.....	331
Técnicas de control de sistemas de lodos activados	336
Respirometría	337
Tipos de respirómetros	339
Ventajas de la respirometría	341
Ensayo de toxicidad.....	341
Ejemplo de diseño de reactores para lodos activados.....	342

Capítulo 9. Reactores de película biológica fija	345
Biofiltros	345
Generalidades.....	345
El empaque	347
Características del empaque	347
Tipos de empaque	348
Clasificación de los biofiltros	349
Biología de los biofiltros percoladores	350
Ventajas de los biofiltros	352
Desventajas de los biofiltros	352
Criterios de diseño de biofiltros	353
Parámetros de diseño en biofiltros sin recirculación.....	354
Parámetros de diseño en biofiltros con recirculación	355
Problemas operativos en biofiltros	361
Biodiscos	363
Cinética del tratamiento en biodiscos	364
Dimensionamiento de biodiscos	366
Ventajas de los sistemas RBC	367
Capítulo 10. Tratamiento anaeróbico	369
Generalidades	369
Microbiología del proceso anaeróbico.....	370
El proceso de hidrólisis	370
El proceso de acidogénesis]	371
El proceso de acetogénesis	371
El proceso de metanogénesis	372
Granulación	374
Reactores anaeróbicos	376
Generalidades	376
Ventajas de los reactores anaeróbicos.....	376
Desventajas de los reactores anaeróbicos	376
Requisitos para un buen tratamiento	377
Tipos de reactores anaeróbicos	378
Reactores de primera generación	378
Reactores de segunda generación.....	379
Reactores de tercera generación	381
Remoción de DQO y producción de metano	381

Principales sistemas anaeróbicos usados en tratamiento de aguas residuales	381
Tanque séptico	381
Tanque Imhoff.....	383
Filtro anaeróbico	386
Reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos (UASB)	388
Reactor granular expandido y manto de lodos.....	392
Reactor de lecho fluidizado	392
Reactor de lecho expandido	393
Capítulo 11. Reúso de aguas residuales	395
Generalidades.....	395
Factores favorables para el reúso o reciclaje de aguas residuales	396
Reúso en agricultura.....	397
Experiencias en el uso de aguas residuales en agricultura en diversas partes del mundo	399
Algunas sugerencias para el uso adecuado de aguas residuales agricultura	404
Reúso en piscicultura	405
Reúso en la recarga del acuífero	406
Reúso como agua potable	406
Adendas	409
Abreviaturas y símbolos usados en el texto	423
Glosario de términos	429
Referencias Bibliográficas.....	491

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructuras de diferentes monosacáridos	6
Figura 2. Estructuras de tres disacáridos importantes: lactosa, sucrosa y maltosa.....	7
Figura 3. Estructura de un trisacárido	8
Figura 4. Cadena de monosacáridos que conforman la amilosa en el almidón, el glucógeno, la celulosa y la estructura de la quitina	9
Figura 5. Estructura de un aminoácido y unión de dos por medio del enlace peptídico.....	11
Figura 6. Estructura primaria de las proteínas	14
Figura 7. Estructura secundaria de una proteína β -laminar	14
Figura 8. Estructura terciaria de las proteínas	15
Figura 9. Estructura globular y cuaternaria de la hemoglobina	16
Figura 10. Estructura química de un triglicérido	17
Figura 11. Esqueleto estructural del ciclopentanooperhidrofenantreno.....	17
Figura 12. Estructura química de un fosfolípido.....	18
Figura 13. Fórmulas químicas de las bases nitrogenadas que conforman el ADN	19
Figura 14. Estructura química de un nucleótido y nucleósido	20
Figura 15a. Nucleótido A.....	20
Figura 15b. Conformación y estructura de la doble hélice de la molécula de ADN.....	21
Figura 16. Modelo de replicación del ADN	22
Figura 17. Nucleótidos del ARN.....	23
Figura 18. Estructura terciaria de una molécula de ARNt	25
Figura 19. Estructura bipolar de la molécula de agua	26
Figura 20. Gráfico de la energía de activación en una reacción química	28
Figura 21. Gráfico de una reacción típica de orden cero	29
Figura 22. Gráfico de una reacción típica de primer orden	30
Figura 23. Gráfico de una reacción típica de segundo orden.....	30
Figura 24. Esquema de una reacción enzimática.....	32
Figura 25. Modelo cinético de Monod.....	33
Figura 26. Estructura molecular del adenosín trifosfato (ATP).....	40
Figura 28. Modelo de respiración aeróbica	41
Figura 29. Modelo de fermentación con producción de etanol	42
Figura 30. Modelo de respiración anaeróbica.....	43

Figura 31. Modelo de proceso respiratorio por desnitrificación	43
Figura 32. Modelo de acoplamiento del catabolismo y anabolismo mostrando el papel del ATP. (Adenda)	410
Figura 33. Esquema simplificado del ciclo de Calvin	46
Figura 33a. Micrografía del virus humano de la hepatitis E por microscopía electrónica	50
Figura 34. Estructura del fago	54
Figura 35. Imagen tridimensional de la placa basal del bacteriófago	54
Figura 36. Micrografía de barrido electrónico que muestra células de <i>E. coli</i> con partículas de fago adheridas a su superficie	55
Figura 37. Ciclo lítico y lisogénico del fago	56
Figura 38. Árbol filogenético con los tres dominios aceptados con base en las comparaciones secuenciales del ARNr: Bacteria, Archaea y Eukarya	60
Figura 39. Formas de la célula procariótica	62
Figura 40. Estructura de una célula procariótica típica	64
Figura 41. Diferencias estructurales entre las células Gram positivas y Gram negativas	66
Figura 42. Curva típica de crecimiento microbiano	72
Figura 43. Modelo cinético para crecimiento de bacterias, según Monod.....	75
Figura 44. Modelo experimental de la capacidad de formación de biomasa	78
Figura 45. Imagen de <i>Methanobacterium formicicum</i> por inmuno fluorescencia indirecta con sonda calibrada de anticuerpos específicos	82
Figura 46. Imagen de <i>Methanobrevibacter smithii</i> por inmunofluorescencia indirecta con sonda calibrada de anticuerpos específicos	83
Figura 47. Imagen de <i>Methanococcus maripalidus</i> por inmunofluorescencia indirecta con sonda calibrada de anticuerpos específicos	83
Figura 48: Imagen de <i>Methanospirillum hungatei</i> por inmunofluorescencia indirecta con sonda calibrada de anticuerpos específicos	84
Figura 49. Micrografía de <i>Methanosarcina barkeri</i>	85
Figura 50. Micrografía de <i>Methanothrix thermophyla</i>	85
Figura 51. Micrografía de <i>Salmonella</i> sp, mostrando sus flagelos peritricos	87
Figura 52. Micrografía de <i>Shigella</i> sp.....	89
Figura 53. Micrografía de <i>Vibrio cholerae</i>	91
Figura 54. Representación esquemática de <i>H. pylori</i> en la mucosa del estómago	96
Figura 55. Micrografía de <i>Campylobacter jejuni</i>	97

Figura 56. Micrografía de <i>Spirochaeta</i> americana, aislada de sedimentos de un lago en California del norte.....	101
Figura 57. Micrografía de <i>Bdelovibrio</i> mostrando su ciclo de alimentación como depredador bacteriano	101
Figura 58. Micrografía de <i>Zoogloea ramigera</i>	102
Figura 59. Micrografía de <i>Acinetobacter</i> sp.	103
Figura 60. Micrografía de <i>Bacteroides fragilis</i> del intestino humano	104
Figura 61. Micrografía de <i>Chromatium</i> sp.....	104
Figura 62. Micrografía de <i>Thiocapsa</i> sp.	105
Figura 62a. Estructura química de la microcistina	108
Figura 63. Micrografía de <i>Anabaena ambigua</i> mostrando los heterocistos.....	109
Figura 64. Micrografía de <i>Nostoc</i> sp.	110
Figura 65. Micrografía de <i>Prochloron</i> sp.	110
Figura 66. Esquema tridimensional del consorcio <i>Chlorochromtium aggregatum</i>	111
Figura 67. Micrografía de <i>Acidithiobacillus ferroxidans</i> de biolixiviación de minas.....	112
Figura 68. Micrografía de <i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	113
Figura 69. Micrografía de <i>Galionella</i> sp., bacteria del fierro que crea un filamento que se adhiere a las superficies.....	114
Figura 70. Micrografía por fluorescencia de <i>Nitrosococcus</i> sp.	115
Figura 71. Micrografía de <i>Prostheco bacter fusiformis</i>	116
Figura 72. <i>Caulobacter</i> dividiéndose asimétricamente en una célula hija móvil (con flagelo) y la otra célula hija forma el tallo.....	116
Figura 73. Micrografía de <i>Sphaerotilus natans</i> , bacteria filamentosa que se encuentra en plantas de lodos activados	117
Figura 74. Micrografía de <i>Leptothrix ochracea</i> , bacteria que remueve arsénico proveniente de los relaves mineros.....	118
Figura 75. Micrografía de <i>Crenothrix</i> sp.	118
Figura 76. Micrografía electrónica de <i>Cytophaga hutchinsonii</i> desarrollada en papel de filtro de celulosa.....	119
Figura 77. Micrografía de <i>Thiothrix</i> sp. observada al microscopio en contraste de fase	120
Figura 78. Micrografía de <i>Beggiatoa</i> sp. mostrando acumulación de granulos de azufre	120
Figura 79. Micrografía en contraste de fase de <i>Saprospira</i> sp., bacteria filamentosa de aguas naturales.....	121
Figura 80. Micrografía de <i>Leucothrix mucor</i>	122
Figura 81. Micrografía de <i>Staphylococcus aureus</i> : cocos Gram positivos	122

Figura 82. Micrografía de <i>Streptococcus</i> sp.	123
Figura 83. Micrografía de <i>Bacillus subtilis</i> mostrando las endosporas	123
Figura 84. Micrografía de la bacteria reductora del azufre <i>Desulfotomaculum nigrificans</i>	124
Figura 85. Micrografía de <i>Arthrobacter</i> sp. mostrando bacilos de formas diferentes (pleomorfismo)	124
Figura 86. Micrografía de <i>Bifidobacterium</i> sp., que ayudan en los procesos fermentativos en la producción de yogur	125
Figura 87. Micrografía de <i>Mycobacterium avium</i> , que produce la tuberculosis en aves	125
Figura 88. Micrografía de <i>Nocardia asteroides</i> mostrando células alargadas con septas y esporas circulares	127
Figura 89. Micrografía de <i>Rhodococcus jostii</i> con inclusiones poli-p en el protoplasma	127
Figura 90. Micrografía de <i>Pseudonocardia spinosa</i>	127
Figura 91. Micrografía de <i>Nocardioides albus</i>	128
Figura 92. Micrografía de <i>Frankia alni</i> mostrando las hifas vegetativas septadas y las vesículas	128
Figura 93. Micrografía de <i>Actinoplanes</i> sp.	129
Figura 94. Micrografía de <i>Micromonospora</i> sp.	129
Figura 95. Micrografía de <i>Actinomyces</i> sp. mostrando sus hifas septadas y las esporas	130
Figura 96. Micrografía de <i>Streptosporangium</i> sp. mostrando los micelios vegetativos y los esporangios	131
Figura 97. Micrografía de <i>Actinomadura</i> sp.	131
Figura 98. Clave para la identificación de organismos filamentosos con gránulos de azufre en lodos activados	132
Figura 99. Clave para la identificación de organismos filamentosos sin gránulos de azufre Gram (+) en lodos activados	133
Figura 100. Clave para la identificación de organismos filamentosos sin gránulos de azufre Gram (-) en lodos activados	134
Figura 102. Estructura de una célula eucariótica típica	135
Figura 103. Micrografía de <i>Pediastrum</i> sp. mostrando sus colonias en disposición cenobial	137
Figura 104. Micrografía de <i>Euglena</i> sp.	138
Figura 105. Diferentes especies de algas del grupo de las Crisófitas	139
Figura 106. Diferentes especies de algas del grupo de las Pyrrofitas	139
Figura 107. Micrografía de <i>Giardia intestinalis</i>	140
Figura 108. Micrografía de una ameba ingiriendo un <i>Paramecium</i>	141
Figura 109. Micrografía de una Vorticella (ciliado)	142

Figura 110. Quiste de <i>Entamoeba histolytica</i> mostrando los cuatro núcleos.....	143
Figura 111. Micrografía de <i>Achantamoeba</i> sp.	144
Figura 112. Micrografía de <i>Naegleria fowleri</i>	145
Figura 113. Ciclo biológico de <i>Naegleria</i> y <i>Achantamoeba</i> (Adenda).....	416
Figura 114. Micrografía de <i>Balantidium coli</i>	146
Figura 115. Micrografía de quistes de <i>Giardia intestinalis</i> y ooquistes de <i>Cryptosporidium</i> sp. por inmunofluorescencia usando anticuerpos monoclonales	148
Figura 116. Ciclo biológico de <i>Cyclospora cayetanensis</i> (Adenda).....	417
Figura 117. Micrografía de <i>Saccharomyces cerviciae</i> mostrando las yemas.....	150
Figura 118. Fotografía de Basidiomicetos también llamados setas u hongos de sombrerillo	151
Figura 119. Micrografía de <i>Neurospora crasa</i> (hongo del pan) mostrando sus ramificaciones.....	151
Figura 120. Micrografía de <i>Mucor</i> sp. mostrando los esporangios maduros ...	152
Figura 121. Esporotallo de <i>Allomyces arbuscula</i> con restos de esporas	152
Figura 122. Micrografía de <i>Aspergillus niger</i> mostrando los esporangios y sus ramificaciones.....	153
Figura 123. Micrografía de <i>Penicillium notatum</i> mostrando sus conidióforos...	153
Figura 124. Fotografías que muestran a la especie llamada jacinto (<i>Eichornia crassipes</i>) en forma individual, con poco crecimiento en la superficie de la laguna y crecimiento cubriendo buena parte del lago	154
Figura 125. Fotografías que muestran la lenteja de agua (<i>Lemna gibba</i>).....	155
Figura 126. Fotografías de los pantanos de Villa (Chorrillos, Lima, Perú) mostrando diferentes tipos de vegetación	155
Figura 127. Ciclo biológico de <i>Fasciola hepatica</i> , modificado de CDC-dpdx (Adenda).	418
Figura 128. Ciclo biológico de <i>Taenia solium</i> donde se destaca la fase de cisticerco en humanos (Adenda).....	419
Figura 129. Anatomía de un rotífero Monogononta	160
Figura 130. Fotografía de un nematodo de vida libre	161
Figura 131. Moluscos gasterópodos del género <i>Physa</i>	162
Figura 132. Copépodo de agua dulce	164
Figura 133. Modelo conceptual de las principales fuerzas que fluyen en un ecosistema de agua dulce.....	169
Figura 133a.Efectos de la carga orgánica sobre el oxígeno disuelto	172
Figura 133b.Efectos de la contaminación sobre los organismos acuáticos Fases de la autodepuración.....	173
Figura 134. Modelo termodinámico de un ecosistema.....	180

Figura 135. Principales componentes y relaciones del ciclo hidrológico	183
Figura 136. Balance hídrico en la superficie de la tierra	185
Figura 137. Ciclo del carbono.	187
Figura 138. Esquema del ciclo del N.	188
Figura 139. Nódulos de la raíz de una planta de guisante (leguminosa), que contienen en simbiosis las bacterias fijadoras de N (<i>Rhizobium</i> sp.)	190
Figura 140. Transferencia de electrones en el proceso de fijación de nitrógeno atmosférico	192
Figura 141. Ingreso del proceso Anammox en el ciclo del N	199
Figura 142. Principales especies de planctomicetales relacionadas filogenéticamente y que intervienen en el proceso ANAMMOX (Adenda).	199
Figura 143. Esquema del ciclo del fósforo	201
Figura 144. Esquema del ciclo del azufre.....	205
Figura 145. Distribución filogenética de diferentes tipos de microorganismos que metabolizan el azufre.....	207
Figura 146. La integridad ecológica en equilibrio con los tres componentes esenciales.....	210
Figura 147. Configuración de un biosensor mostrando biorreconocimiento, interfase y elementos de transducción	225
Figura 148. Sistema AWACSS, incluyendo inmunofluorescencia total (TIRF) ...	226
Figura 149. Sistema carbonato en el agua	238
Figura 150. Estabilización de la materia orgánica (DBO) con formación de células nuevas y productos finales	241
Figura 151. DBO carbonácea y autotrófica	242
Figura 152. Relaciones entre consumo de oxígeno, crecimiento microbiano y remoción de carbono orgánico	243
Figura 153. Curva de DBO en función del tiempo, relacionando L_t y L	247
Figura 154. Representación esquemática del tratamiento de agua residual en un reactor	252
Figura 155. Descripción del proceso en un reactor biológico.....	252
Figura 156. Modelo de un reactor tipo batch.....	253
Figura 157. Reactor tipo pistón	254
Figura 158. Modelo dinámico de reactor de flujo continuo y mezcla completa	255
Figura 159. Reactor de lecho fluidizado	258
Figura 160. Contactor biológico rotatorio (RBC)	259

Figura 161. Cámara de rejas de la planta de tratamiento de la ciudad de Pisco (Perú)	265
Figura 162. Biodegradabilidad de la molécula de glucosa por medio de respiración aeróbica	267
Figura 163. Biodegradabilidad de la molécula de glucosa por fermentación y respiración anaerobia.....	268
Figura 164. Biodegradabilidad de biopolímeros por metanogénesis.....	270
Figura 165. Distribución de los organismos fotosintéticos con la temperatura en lagunas de estabilización.....	281
Figura 166. Variación de la velocidad de la fotosíntesis en función de la temperatura e intensidad de la radiación solar	282
Figura 167. Variación de la proporción de H_2S , HS^- y $S=$ con el pH en solución acuosa	287
Figura 168. Relación de sinergismo entre las algas y las bacterias en la estabilización aerobia de la materia orgánica	290
Figura 169. Perfil de oxígeno y potencial redox en lagunas facultativas	291
Figura 170. Modelo ecológico de una laguna facultativa.....	294
Figura 171. Modelo de laguna facultativa de mezcla completa.....	295
Figura 172. Modelo de laguna aireada	304
Figura 173. Solución gráfica de la relación S_0/S con respecto al tiempo de retención (ecuación 111)	306
Figura 174. Esquema de un sistema de lagunas aireadas primarias y secundarias.....	310
Figura 175. Remoción de material orgánico en función del tiempo en un sistema estacionario de lodos activados	314
Figura 176. Modelo de reactor biológico de lodos activados.....	315
Figura 177. Modelo de formación de los flocs en lodos activados, propuesto por Higgins (1997)	316
Figura 178. Presencia de microorganismos en lodos activados, en sucesión ecológica	321
Figura 179. Modelo de remoción de la materia orgánica en un reactor con aireación de lodos activados	323
Figura 180. Curva de crecimiento ideal para lodos activados en un reactor tipo estacionario (batch).....	325
Figura 181. Modelo del proceso de lodos activados de mezcla completa con recirculación.....	329
Figura 182. Diagrama de flujo para la revisión de un proceso de lodos activados	336
Figura 183. Gráficas que representan la tasa de respiración por los microorganismos y la tasa de consumo de oxígeno	338

Figura 184. Esquema de un respirómetro para mediciones de parámetros cinéticos	338
Figura 185. Observación del efecto tóxico en ensayos de respirometría usando muestras de lodos activados y muestra de referencia	342
Figura 186. Esquemas de un filtro biológico típico.....	346
Figura 187. Muestra de grava que puede ser usada como soporte en biofiltros...	348
Figura 188. Empaque estructurado a base de cerámica para ser usada en biofiltros.....	349
Figura 189. Formación de biopelícula en el soporte del biofiltro	350
Figura 190. Modelo de los procesos biológicos en las piedras biofiltro RB-100 ...	351
Figura 191. Fotografía de un filtro biológico típico.....	353
Figura 192. Modelo de biofiltro sin recirculación. Se supone flujo de pistón y tasa de remoción de DBO	354
Figura 193. Modelo cinético de biofiltros con recirculación Ofuente	356
Figura 194. Modelo de biofiltros	358
Figura 195. Esquema de un sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de biodiscos	364
Figura 196. Modelo cinético en biodiscos.....	364
Figura 197. Proceso biológico en anaerobiosis.....	373
Figura 198. Vista microscópica de lodo granular de tratamientos anaeróbicos....	375
Figura 199a. Esquema representativo de un tanque séptico.....	379
Figura 199b. Esquema representativo de un tanque Imhoff.....	379
Figura 200a. Modelo de reactores anaerobios: filtro anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos (UASB)	380
Figura 200b. Modelo de reactores anaerobios: filtro anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos (UASB)	380
Figura 201. Esquema de un corte del fondo de sedimentador de un tanque Imhoff.....	384
Figura 202. Corte de un tanque Imhoff que muestra algunas características de diseño del digestor	386
Figura 203. Esquema representativo de un reactor UASB convencional con sello hidráulico que mantiene el nivel de agua requerido en la cámara de gas	389
Figura 204. Representación esquemática de un reactor anaerobio de lecho fluidizado	394
Figura 205. Vista panorámica de la PTAR Shafdan, de 45 ha, que incluye pretratamiento, reactores biológicos y clarificadores	399
Figura 206. Cultivos en el proyecto Copare-Tacna (Perú)	402

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los monosacáridos de acuerdo con el número de átomos de C.....	5
Tabla 2. Ácidos grasos que se encuentran en la naturaleza.....	17
Tabla 3. Tipos de respiración en microorganismos.....	44
Tabla 4. Ejemplos de algunos virus de interés general.....	51
Tabla 5. Diferencias entre los procariotes Gram + y Gram -	65
Tabla 6. Organismos que causan diferentes tipos de infecciones al hombre, de origen hídrico-alimentario.....	97
Tabla 7. Inventario de agua en la superficie terrestre.....	184
Tabla 8. Principales géneros y especies bacterianas que forman nódulos con leguminosas.....	189
Tabla 9. Proteobacterias que forman nódulos con leguminosas.....	191
Tabla 10. Condiciones que favorecen la nitrificación en el tratamiento de aguas residuales	194
Tabla 11. Condiciones que favorecen la desnitrificación en el tratamiento de aguas residuales	196
Tabla 12. Efecto de diferentes iones presentes en los efluentes de aguas residuales sobre la actividad de Anammox	200
Tabla 13. Principales reacciones bioquímicas y los organismos que participan en el ciclo del nitrógeno (adenda)	421
Tabla 13a. Presiones sobre los ecosistemas de agua dulce	211
Tabla 14. Principales grupos de macroinvertebrados bentónicos que se usan como bioindicadores de la calidad del agua.....	218
Tabla 15. Biosensores bacterianos para monitorear contaminantes del petróleo	228
Tabla 16. Efectos de los contaminantes presentes en aguas residuales.....	243
Tabla 17. Características típicas de un desagüe doméstico	245
Tabla 18. Algunos compuestos parcialmente oxidables por el dicromato en medio ácido	248
Tabla 19. Aporte de DBO y DQO para diferentes tipos de desagües y mezcla completa	250

Tabla 20. Principales procesos operacionales en tratamiento de aguas residuales	264
Tabla 21. Consumo de H ₂ en reacciones anaeróbicas	270
Tabla 22. Diseño de valores de cargas volumétricas de DBO en porcentaje de remoción de DBO en lagunas anaeróbicas a varias temperaturas	288
Tabla 23. Valores del coeficiente de reducción bacteriana Kb (d ⁻¹)	299
Tabla 24. Distribución de bacterias heterotróficas aeróbicas en lodos activados	318
Tabla 25. Causas y efectos de los problemas que se originan por la separación de los sólidos en las plantas de lodos activados	333
Tabla 26. Relación de microorganismos filamentosos identificados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTAR I) con las principales variables de operación	334
Tabla 27. Clasificación de los procesos en lodos activados según la carga	337
Tabla 28. Características que deben cumplir los filtros según las cargas	349
Tabla 29. Recomendaciones para mantener en estado operativo un sistema de biofiltros.....	362
Tabla 30. Componentes del biogás en función del sustrato utilizado	374
Tabla 31. Factores de capacidad relativa de acuerdo con diferentes temperaturas para tanques Imhoff	385
Tabla 32. Tiempo requerido para la digestión de lodos en un tanque Imhoff de acuerdo con la temperatura	386
Tabla 33. Tiempos de retención hidráulicos recomendados según temperatura y caudales.....	388
Tabla 34. Parámetros de diseño en plantas anaeróbicas tipo UASB.....	390
Tabla 35. Comparación de rendimientos obtenidos en Tacna con efluentes de lagunas aireadas rendimiento con aguas blancas Rendimiento en t/ha	402
Tabla 36. Rendimiento obtenido en México con aguas negras y aguas blancas Rendimiento en t/ha	402
Tabla 37. Categorías para el reúso de aguas residuales.....	403
Tabla 38. Directrices recomendadas para el reúso de aguas en agricultura	404

Prólogo



Cuando cuidas y proteges el agua, proteges la vida

La vida es agua, bailando al son de las macromoléculas.

Albert Szent-Györgyi

Lo que tenemos que cuidar y mejorar permanentemente es nuestro planeta Tierra (ecosfera), no solo a partir de las instituciones de gobierno o privadas, sino de todos los que habitamos en ella, con la única idea de revertir el deterioro ambiental originado principalmente por el desarrollo industrial, pero también debido a nuestros hábitos de contaminar el aire, el suelo y el agua.

Hemos llegado al extremo en los procesos de deforestación y combustión de carbono y los efectos ya están presentes en Sudamérica, debido también a la emisión de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático y al deshielo de los glaciares en los polos. De igual manera, la construcción de presas y reservorios aumentan el deterioro de los ecosistemas ocasionando la pérdida de la biodiversidad, etc.

Todos estos factores han deteriorado la calidad de las fuentes naturales de agua impidiendo su explotación para diversos usos; por tanto, todos estos factores se han convertido en un círculo vicioso que si no se detiene a tiempo llegará a un punto sin retorno.

Aún es posible revertir los impactos ambientales negativos pero para ello se requiere de mucho esfuerzo por parte de las autoridades gubernamentales para evitar problemas más graves como: sequías, inundaciones, enfermedades epidémicas que afectarían tanto al hombre como a los animales y plantas —y que de hecho ya existen en diversas partes del mundo—, entre otros.

La educación ambiental debe empezar en el hogar y en la edad preescolar. La educación inicial, primaria y secundaria deben ir acompañadas, durante todos los años, de cursos y talleres acerca del tema ambiental, y deben ser especialmente recreativos para desarrollar en los educandos una conciencia ecológica para la preservación del medio ambiente, el uso correcto del agua para consumo humano y la conservación de las fuentes naturales con una adecuada cultura del agua.

El libro *Biotecnología ambiental de aguas y aguas residuales* está dedicado principalmente a los estudiantes de ciencias e ingeniería en las carreras de biología, ingeniería ambiental, química, ingeniería sanitaria y algunas carreras tecnológicas; a los profesores universitarios e investigadores en el campo ambiental, así como a cualquier persona que desee ampliar sus conocimientos en los temas que se tratan.

Muchos lectores se preguntarán por qué este libro de biotecnología aborda la problemática del agua existiendo en la literatura una gran variedad de textos y tratados para cada tema. La respuesta es muy sencilla: se debe a que la mayoría de los textos profundizan adecuadamente en cada tópico o tema en forma aislada, dejando de lado la interrelación e interpretación de los aspectos biológicos que ocurren en los procesos de ingeniería, sin tener en cuenta, por ejemplo, los desarrollos metabólicos de los microorganismos que contribuyen con el proceso y las mejoras que se pueden realizar con el manejo adecuado tanto del mundo de la ingeniería como el biológico, dando lugar a la bioingeniería gracias al uso de herramientas adecuadas que ahorren esfuerzos y sean económicamente beneficiosas.

La biotecnología aplicada en estos procesos corresponde y depende de la habilidad y conocimientos de los profesionales para seleccionar aquellas alternativas que den los mejores resultados, incluyendo los avances biotecnológicos y teniendo en cuenta los costos y la preservación del medio ambiente.

En un libro como este es imposible abarcar todas las herramientas para las mejoras biotecnológicas, por lo que resultan necesarios los conocimientos de biología molecular, bioquímica, matemáticas e ingeniería genética. Sin embargo, se ha abordado en varios capítulos el tratamiento biológico de las aguas residuales, porque es un problema que afrontan todos los países de América Latina y el Caribe y al que se debe dar solución en el mediano plazo, a fin de minimizar las enfermedades endémicas y epidémicas, disminuyendo la tasa de morbimortalidad que afecta principalmente a los niños y a las personas de la tercera edad.

Investigando, aplicando y desarrollando programas de tratamiento biológico del agua estaremos cuidando nuestro más preciado recurso natural.

César Lazcano Carreño
Esther Lazcano Carreño

Presentación



América Latina está representada por los países de habla hispana de los que Perú forma parte como país proveniente de una cultura milenaria, en la que los pobladores de la época incaica manejaban los problemas de “ingeniería” y “biotecnología” de forma sorprendente, pues la agricultura era suficiente para una población de más de 15 millones de habitantes, con sembrados principalmente de maíz, papa, oca, etc. En conjunto con la ganadería conformada por los camélidos sudamericanos, era posible alimentar a esta vasta población, sin dejar de lado la pesca y la caza de animales salvajes para complementar la alimentación. Igualmente, la ingeniería hidráulica de la época estaba bastante adelantada; se habían construido acueductos y canales con transporte de agua a grandes distancias, que hoy se pueden apreciar en algunas ruinas asentadas en diversas partes de Perú, como Tambomachay, en la ciudad de Cusco.

Actualmente, Perú tiene una población de 28 millones de habitantes asentados principalmente en la zona costera. Lima, la capital, alberga la tercera parte de la población, pero tiene graves problemas en los ecosistemas acuáticos, los cuales se vienen deteriorando día a día por los vertimientos de aguas residuales sin tratar o con tratamientos deficientes, originando sobrecostos en la producción de agua potable por el uso de estos sistemas como fuentes de abastecimiento, contaminación de cultivos cuando el riego se realiza con desagües crudos o con tratamientos deficientes, etc. Cuando los efluentes se vierten en el océano Pacífico, la contaminación de las aguas costeras es inminente e impide la pesca artesanal y algunos

deportes acuáticos como la natación y la recreación poblacional. En un enfoque claro, los efluentes con tratamiento parcial o sin tratamiento en descarga directa generan contaminación de cultivos por el uso de las aguas para riego de terrenos de cultivo y contaminación marina.

La problemática de Perú con respecto a las deficiencias en el tratamiento de las aguas servidas es común en todos los países de la región, con ligeras diferencias, por lo que existe la necesidad de establecer criterios —que es lo que básicamente se desarrolla en el libro— que permitan una mejora en la disposición de aguas residuales, cuidado del medio ambiente para preservar los ecosistemas acuáticos, y educación permanente en todos los niveles educativos, así como el cumplimiento de la legislación vigente; esto mejorará la calidad de vida de las poblaciones, principalmente de las más pobres y con menos recursos.

Este libro incluye un estudio detallado de los diferentes aspectos biotecnológicos que se conjugan con el ambiente y tienen su aplicación en el tratamiento biológico de las aguas residuales en general; para ello se detallan inicialmente los conceptos básicos de biología, teniendo en cuenta los avances recientes y las ubicaciones taxonómicas de los seres vivos de acuerdo con las nuevas propuestas, utilizando el término Dominio para los tres grandes grupos de seres vivos: Archaea, Bacteria y Eukaria, con el fin de diferenciar mejor las actividades funcionales que cumple cada grupo en los ecosistemas acuáticos y su labor principal en los sistemas de tratamiento biológico.

Utilizando el Manual de bacteriología de Bergey se ha podido identificar a los diferentes organismos (bacterias y arqueas) de acuerdo con las funciones que cumplen en el metabolismo, crecimiento y reproducción en los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales y el papel en cada proceso, lo cual es de gran utilidad para un buen diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento.

Se incluye el capítulo “Ecosistemas acuáticos”, en el cual se analizan las características más importantes de un ecosistema en relación con las leyes de la termodinámica, y se adopta el término “exergía” en los ecosistemas como un nuevo concepto que permite conocer la utilización mínima de energía para producir el máximo trabajo, considerando que un ecosistema acuático es un sistema abierto. Asimismo, se da énfasis a los principales ciclos biogeoquímicos en un ecosistema acuático, para lo cual se han elaborado, en forma didáctica, las principales reacciones en cada uno de los ciclos que son de utilidad para una mejor comprensión de los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales; también se ha introducido en el ciclo del nitrógeno un nuevo componente que corresponde al complejo Anammox, que representa un cortocircuito en el proceso de desnitrificación, con ahorro de tiempo y energía y de gran aplicabilidad en los sistemas que mencionamos.

Un aspecto importante de este libro corresponde al capítulo “Evaluación de la calidad de las aguas”, en el cual se incluyen temas innovadores como el biomonitorio, bioevaluación y biocriterio, además de diferentes métodos con bioindicadores.

Finalmente, el tema central del libro corresponde al tratamiento biológico de aguas residuales, en el cual se exponen los aspectos importantes de los reactores biológicos y su aplicabilidad en los sistemas de tratamiento. Los procesos biológicos ampliamente tratados corresponden a los sistemas de lagunaje, extensamente difundidos en los países de América Latina y el Caribe, los sistemas de tratamiento por lodos activados, métodos de reciente implementación en Perú por sus costos elevados, los filtros biológicos y los biodiscos. El capítulo final corresponde al reúso de aguas residuales como ejemplos de aplicabilidad de los efluentes tratados y las experiencias en los diferentes países de América y Europa.

Dedico este libro principalmente a los estudiantes de ciencias e ingeniería para que aborden los temas que les sean útiles en sus cursos de biotecnología, tratamiento de aguas residuales, química ambiental, etc., y a los tecnólogos que trabajen o estudien temas de biotecnología ambiental. Asimismo, este libro resulta práctico y útil para los profesores de los cursos mencionados; como libro de consulta para los investigadores y para toda persona que desee tener un conocimiento sobre los temas que se incluyen o deseen ampliar sus conocimientos al respecto.

BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL DE AGUAS Y AGUAS RESIDUALES



Incluye

Los ecosistemas acuáticos de la costa pacífica de América del Sur se han venido deteriorando en los últimos años por los vertimientos descontrolados de aguas residuales no tratadas o con tratamientos deficientes. Dichos efluentes han contaminado terrenos de cultivo, generado sobrecostos en la producción de agua potable e impedido el desarrollo de la pesca artesanal y turismo costero. Esta es una realidad preocupante para todos los países de la región y requiere de la fijación de criterios sólidos sobre disposición de aguas.

- Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales, y reactores biológicos en su tratamiento.
- Biomonitoreo, bioevaluación, biocriterios y bioindicadores en evaluación de calidad de aguas.
- Métodos de tratamiento de aguas residuales (lagunas de estabilización, lodos activados, reactores de película biológica fija, tratamiento anaeróbico).

Al transitar de la biología a la ingeniería, este libro llena un vacío en la bibliografía sobre tratamiento de aguas en América Latina. En este sentido, luego de introducir al lector a los ecosistemas acuáticos, sus principales ciclos biogeoquímicos y los seres vivos que allí habitan (*Archaea*, *Bacteria* y *Eukaria*), la calidad biológica de las aguas y las aguas residuales, el autor describe los procesos de tratamiento de aguas contaminadas y su reúso en agricultura y piscicultura a partir de experiencias exitosas en América y Europa.

Biotechnología ambiental de aguas y aguas residuales es un texto guía para estudiantes de carreras de nivel tecnológico, pregrado y posgrado en Biología, Ingeniería Ambiental, Química e Ingeniería Sanitaria, y como texto de consulta para investigadores y profesionales de estas áreas en todos los países de la región.

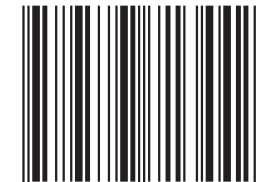
Colección: Ingeniería y salud en el trabajo

Área: Ingeniería ambiental

ECOE
EDICIONES

www.ecoediciones.com

ISBN 978-958-771-344-2



9 789587 713442

e-ISBN 978-958-771-345-9