



Laboratório Gestão Ambiental de Reservatórios - LGAR

Ecologia Microbiana (Parte 1)

Ricardo Motta Pinto-Coelho

Depto. Biologia Geral

Bases Teóricas

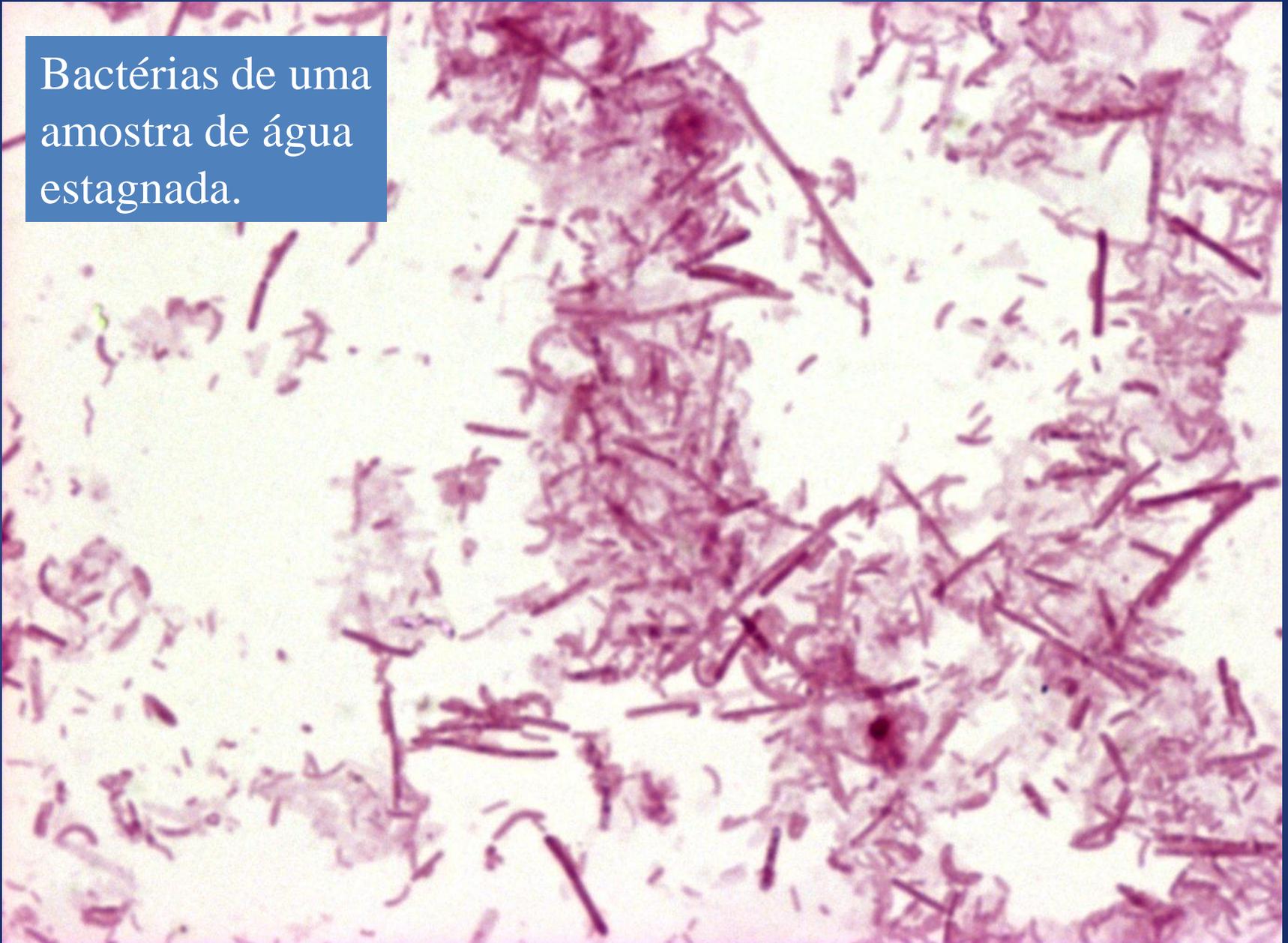
O conhecimento sobre o significado ecológico das bactérias e suas diferentes funções (não só como decompositores) tem se expandido muito ao longo das últimas duas décadas. As bactérias, ao contrário das algas e demais organismos heterotróficos, apresentam uma grande variedade de estratégias metabólicas e daí a sua importantes em diferentes “cenários” ecológicos. Para se entender o significado ecológico das bactérias devemos conhecer os diferentes tipos de metabolismo desses microorganismos, como por exemplo: bactérias fototróficas, bactérias quimiolitotróficas e bactérias quimiorganotróficas.

Bactérias fototróficas estão concentradas em camadas restritas na coluna d'água, já que em maioria são anaeróbicas obrigatórias e ao mesmo tempo necessitam de luz. Elas possuem uma eficiência fotossintética superior às algas e sua atividade metabólica não produz oxigênio e sim enxôfre. Em alguns casos, a produção dessas bactérias pode atingir cerca de 30% da produção primária total. Entretanto, por estarem confinadas a zona anaeróbica, esta produção bacteriana é, em geral, pouco consumida pelos demais heterótrofos do lago.

Bactérias quimiolitotróficas são importantes na ciclagem de nutrientes (exemplos: N,S,Fe e Mn). Obtém energia oxidando ligações inorgânicas reduzidas (H_2S , NH_4), mas para isto necessitam viver em regiões onde haja abundância de certos aceptores de elétrons tais como o CO_2 , NO_3 e SO_4 .

Bactérias quimiorganotróficas sobrevivem dos detritos orgânicos ou seja, fixam o carbono a partir da energia liberada pela oxidação de compostos orgânicos.

Bactérias de uma amostra de água estagnada.



Bactérias e Detritos

Wetzel (1972) define **detrito** como sendo a soma do carbono orgânico particular mais o carbono orgânico dissolvido (COD), já que existe um elevado grau de interdependência entre estes dois compartimentos. As bactérias podem assimilar tanto o **carbono particulado (COP)** quanto o **carbono solúvel (COD)**. Elas utilizam diretamente o COD ou então agem sobre o COP que é atacado externamente por exoenzimas. O carbono solúvel normalmente é composto por uma fração considerada lábil: carboidratos, proteínas e lipídeos e de outra fração dita refratária (de difícil decomposição) onde a lignina, celulose, polifenóis e ácidos fúlvicos são alguns de seus componentes.

O tempo médio de regeneração destes compostos em regiões temperadas supera os 800 anos. O COD é composto por cerca de 80% de compostos refratários e de 10% de compostos lábeis. O carbono orgânico dissolvido (DOC) apresenta diferentes proporções em elementos essenciais. Em lagos europeus, o COD que chega a um lago (alóctone) tem C:N em torno de 50:1, enquanto o COD autóctone tem uma relação C:N ao redor de 12:1.

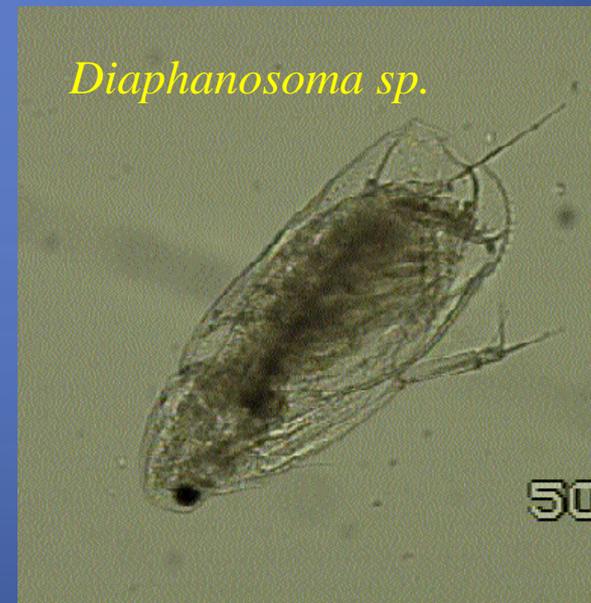
Em sistemas tropicais, pode haver grandes alterações nessas razões. Bactérias pequenas e de crescimento rápido podem ser a principal fonte de alimentação de muitos rotíferos, tais como *Keratella*, e cladóceros importantes no zooplâncton tropical, tais como *Diaphanosoma* (Gliwicz, 1977; Starkweather, 1980). Em muitos ecossistemas lacustres, tal como no famoso Lake Erken na Suécia, onde Nauwerck (1963) realizou um dos estudos mais importantes sobre as interações tróficas em ecossistemas, as bactérias são a fonte principal de energia para os consumidores primários (via cadeia de detritos). Esta interpretação dos dados de campo feita por Nauwerck gerou grande controvérsia na literatura por anos seguidos (Cushing, 1976, Knoechel, 1977, Lewis, 1977).

Organismos do Zooplâncton tropical tidos como eficientes consumidores de bactérias de vida livre.

Keratella cochlearis



Diaphanosoma sp.



Densidades, biovolumes e biomassas de bactérias em Ambientes epicontinentais (mod.a partir de Wetzel, 2001)

	Densidade	Biovolume	Biomassa
Ambientes Oligotróficos	$\times 10^6 \text{ cel.ml}^{-1}$	μm^3	g.m^{-3}
Lago Baikal (Rússia)	0,20		
Lago Lawrence (Michigan, USA)	2-6	0,09-0,35	0,28
Lago Fryxell (Antarctica)	0,54-4,5	0,13-0,39	
Lagos Mesotróficos			
Lago Biwa, bacia norte (Japão)	1,6-3,4	0,02-0,20	
Lago Ladoga (Rússia)	0,2-1,2		
Lagos Eutrófico			
Lago Valencia (Venezuela)	0,1-1,4		
Bodensee (Alemanha)	0,5-10,8		
Lagos salinos africanos	3,7-360,0		
Reservatórios			
Kakhov (Rússia)	4,0	0,47	1,90
Kiev (Rússia)	4,1	0,84	3,35
Arlington (Texas, USA)	11,0	0,16	0,172
Valores Médios			
Ambientes oligotróficos	0,50	0,2-0,4	0,15
Ambientes mesotróficos	1,00	0,4-1,2	0,70
Ambientes eutrófico	3,70	0,5-0,9	2,30

Ecologia Microbiana

A visão clássica do papel ecológico das bactérias aquáticas baseia-se no paradigma de que as bactérias, ao lado dos fungos, desempenham um papel fundamental como organismos decompositores e remineralizadores nos diversos ecossistemas (Figura 1).

visão clássica do papel ecológico das bactérias

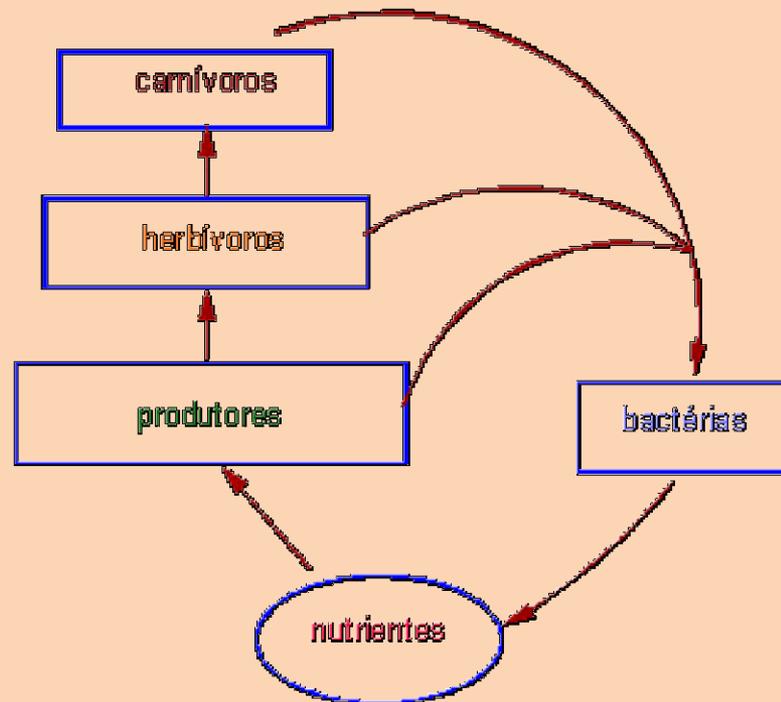


Figure 1 Visão clássica do papel ecológico das bactérias que apenas estariam restritas a uma função como agentes decompositores de matéria orgânica.

Pesquisas recentes, mostraram que nas regiões abissais marinhas, perto das fontes termais (*vulcanic vents*) ricas em minerais, principalmente em compostos nitrogenados reduzidos tais como os sulfetos, os organismos obtém sua comida a partir de relações com bactérias quimiolitotróficas (simbionticas) que ao oxidar os sulfetos e outros minerais reduzidos obtem a energia para fixar o carbono. Na foto abaixo, vemos o verme tubular vermelho *Riftia* sp. que é um dos principais componentes dessa comunidade abissal (foto cortesia do Scripps Inst, USA). Na foto vê-se ainda um consumidor, um caranguejo.



Bactérias quimiolitotróficas aeróbicas

Bactérias nitrificantes

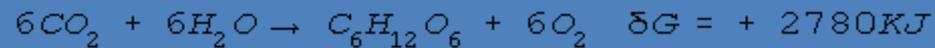
Nitrosomonas oxida a amônia a nitrito



Nitrobacter oxida o nitrito a nitrato



Com esta energia, as bactérias acima são capazes de assimilar o CO_2 (quimiolitotrofia) da seguinte maneira:

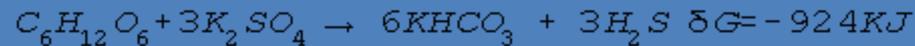


A condição essencial para que estes processos acima ocorram é uma boa aeração, uma boa tamponagem da água e suficiente aporte de amônia na coluna d'água.

Bactérias quimioorganotróficas anaeróbicas

Algumas bactérias têm a capacidade de utilizar o oxigênio ligado ao nitrito, nitrato e sulfato para a oxidação anaeróbica de moléculas orgânicas. Esta oxidação anaeróbica libera energia. Algumas bactérias são facultativas anaeróbicas podendo usar tanto o oxigênio livre quanto aquele ligado às moléculas de nitrogênio (nitrato). Exemplos desta categoria seriam algumas espécies do gênero *Pseudomonas* (*P. fluorescens*, *P. aeruginosa*).

opção I



opção II



A segunda opção é um exemplo de desnitrificação que pode ter aplicação prática em tratamento de água uma vez que, por este mecanismo, o nitrato pode ser eliminado da água. *Desulfovibrio desulfuricans* utiliza o oxigênio ligado ao sulfato.

Table I Bactérias decompositoras de substâncias de difícil decomposição.

Bactéria	Substância
<i>Cytophaga sp. e Sporocytophaga sp.</i>	celulose
<i>Pseudomonas sp.</i>	lignina
<i>Achromobacter</i>	quitina
<i>Micrococcus sphaeroides</i>	benzol
<i>Vibrio cuneata</i>	fenol
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	petróleo

Bactérias oxidantes do H₂S

As bactérias sulfurosas despigmentadas (*Beggiatoa*, *Thiothrix* e *Thiobacillus*) são as responsáveis pela oxidação microbiana do enxôfre sumarizada a seguir.



A energia obtida no processo acima é, a seguir, utilizada para fixar o CO₂ (quimiotrofia). *Thiobacillus* é obrigatoriamente quimiolitotrófica enquanto que as outras bactérias citadas podem utilizar opcionalmente ligações orgânicas como fonte de carbono (bactérias heterotróficas). Quando o aporte de O₂ e de H₂S é suficientemente alto, ou seja, na interface entre as zonas aeróbicas e anaeróbicas na coluna d'água, estas bactérias podem se multiplicar de modo maciço formando extensas camadas de microorganismos nos corpos d'água.

Bactérias oxidantes do metano e de outras ligações de Hidrogênio

Neste grupo podem ser incluídas as *Knallgasbakterien*, que obtém energia através da oxidação de hidrogênio elementar.



A ativação do hidrogênio elementar se processa através da enzima **hidrogenase**

Metanogênese (via organotrofia)

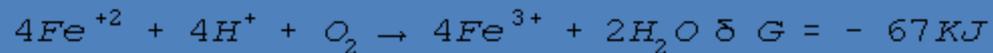
As bactérias formadoras de metano (CH_4), ou metanogênicas (organotróficas), podem utilizar de outras ligações C-1. Os principais exemplos são: *Pseudomonas methanica*, *Methylomonas methanoxidans*. As bactérias metanogênicas anaeróbicas podem – opcionalmente- utilizar substratos orgânicos sendo chamadas, portanto, de bactérias litotróficas facultativas.

Um composto orgânico que pode ser eventualmente utilizado por estes organismos é o metanol.

A atividade das bactérias metanogênicas pode influenciar de modo decisivo o balanço de oxigênio e de carbono de um lago. Em certos lagos as atividades destas bactérias pode eliminar o conteúdo de oxigênio dissolvido da água em apenas 48 horas. No lago Tanganika, na África, cerca de 10% da produção primária é devido à atividade destas bactérias (Schwoerbel, 1984).

Bactérias oxidantes do Ferro e Manganês (aeróbicas)

Certas bactérias podem oxidar Fe^{2+} ou Mn^{2+} solúveis na água gerando hidratos marron-escuros (como em alguns reservatórios da região metropolitana de BH), como é o caso do reservatório de Serra Azul.



Estas bactérias necessitam de águas com alto teor de ligações reduzidas de Fe e Mn, suficiente aporte de CO_2 na água e meio ácido (pH ao redor de 2.5). Estas condições são freqüentemente encontradas em águas subterrâneas. Os exemplos mais comuns são *Thiobacillus*, *Leptothrix*, *Siderocystis*, *Gallionella ferruginea*, *Siderobacter*, *Naumanniella*, *Siderococcus* e *Metallogenium*. *Thiobacillus* é quimiolitotrófico. *Leptothrix crassa* é mixotrófica e pode utilizar carbono orgânico se o aporte de Fe e Mn reduzido é insuficiente. *Siderocapsa* é entretanto obrigatoriamente heterotrófica e assimila o carbono a partir de substâncias orgânicas encontradas associadas aos hidratos oxidados. Não se sabe ainda, com detalhes, se as outras bactérias podem utilizar ou não outros substratos orgânicos.



A foto ilustra a concentração de bactérias ferruginosas próximo ao leito do rio Jacaré, próximo a cidade de Quirinópolis (GO), bacia do rio Paranaíba, na área de influência do reservatório de São Simão (MG/GO). À direita, em baixo, uma folha de Embaúba (*Cecropia*) parcialmente decomposta pelos microorganismos presentes.

Bactérias quimiolitotróficas anaeróbicas

Bactérias denitrificantes (redutoras do nitrato)

A redução do nitrato é sempre um dos principais eventos observados sempre que condições redutoras se estabelecem na coluna d'água. O nitrato é utilizado como acceptor de hidrogênio. Doadores de H⁺ são neste caso o próprio hidrogênio elementar como é, por exemplo, observado em *Paracoccus denitrificans*.



Em alguns casos, ligações inorgânicas do enxôfre poderão ser oxidadas e assim permitir a redução do nitrato. Como acceptores para o oxigênio do nitrato, são utilizados o ácido sulfúrico ou o tiosulfato



Bactérias redutoras do sulfato (anaeróbicas)

Algumas cepas de *Desulfovibrio desulfuricans* podem ser quimiolitotróficas facultativas e reduzem sulfatos, sulfitos, bissulfitos, tiosulfatos e tetracionatos com o uso de hidrogênio elementar e com ganho de energia. No caso abaixo temos a redução do sulfato a sulfeto muito comum em águas com pouco oxigênio. O gás sulfídrico dá um odor característico a essas águas (cheiro de “ovo podre”).



Bactérias formadoras de metano (anaeróbicas)

Estas bactérias transferem, graças à enzima hidrogenase que possuem, o hidrogênio ao gás carbônico que se transforma em metano e, através deste processo, ganham energia.

Exemplos desta categoria seriam: *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanobacillus* e *Methanococcus*

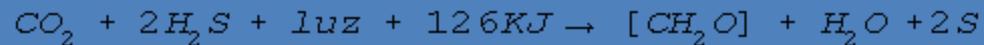


Outros doadores de hidrogênio podem ser ácidos graxos, alcoóis e até o monóxido de carbono. A formação de metano passa a ser importante em lagos, rios e principalmente brejos, toda vez que um **déficit de oxigênio** dissolvido é formado. A produção de metano é estreitamente correlacionada com a **deposição de material orgânico**, uma vez que os restos orgânicos nos sedimentos anaeróbicos são utilizados por bactérias produtoras de hidrogênio elementar tendo o CO_2 como acceptor de prótons (H^+). O gás metano atua no **“efeito estufa”**, por absorver preferencialmente as radiações solares na faixa espectral do 'vermelho longo'. O metano, dessa forma, também está relacionado com o aumento da temperatura na atmosfera terrestre. Pesquisas do Instituto COPE (UFRJ) conduzidas nos principais **reservatórios tropicais do Brasil** (Três Marias, Serra da Mesa e Sobradinho) demonstraram que esses ambientes emitem grandes quantidades de metano para a atmosfera, um impacto ecológico de reservatórios ainda pouco conhecido. Nos trópicos, grande produção de metano também tem sido observada nos campos húmidos como aqueles onde se cultiva o arroz mas, de um modo geral, pouco se sabe sobre as atividades destas bactérias. Talvez elas sejam responsáveis pela rápida reciclagem (*turnover*) de matéria orgânica nos sedimentos de lagos tropicais hipereutróficos, como é o caso da Lagoa da Pampulha.

No lago Mendota, cerca de 54% do carbono presente nos sedimentos é remobilizado novamente pelas bactérias metanogênicas (Schwoerbel, 1984). As bolhas contendo metano regenerado nos sedimentos de um lago têm pelo menos três efeitos básicos: a) levam consigo, além do metano, outras substâncias orgânicas solúveis para o epilimnion; b) contribuem para o consumo de oxigênio nas camadas superiores devido à oxidação de CH_4 a CO_2 e c) elas propiciam a regeneração de carbono na coluna d'água. Em certos lagos, onde o ciclo do metano foi intensamente estudado (i.e. Lago 227 na Área Experimental de Lagos no Canadá), as taxas de formação de metano foram responsáveis por mais de 54% do total de carbono assimilado no Lago. Em outros lagos desta mesma região, a produção diária de metano variou entre 65 e 230 $\text{mgC/m}^2\cdot\text{d}$.

Bactérias fotossintetizantes

Estas bactérias pertencem, juntamente com as cianobactérias (algas verde-azuladas), aos unicelulares procariontes fotossintetizantes. As principais bactérias desta categoria são as Rhodospirillales, Chromatiaceae (bact. sulfo- e não sulfo-purpúreas), Chlorobiaceae (bact. sulfo-esverdeadas) e Chloroflexaceae. As cromatiáceas são representadas principalmente pelos gêneros *Thiocapsa*, *Thiospirillum*, *Chromatium* e *Lamprocystis*. Já os gêneros *Chlorochromatium*, *Chlorobium*, *Pelodyction* e *Chlorobacterium* são Chlorobiáceas. E *Rhodopseudomonas*, *Rhodospirillum* e *Rhodomicrobium* pertencem às Rhodospirillaceae. Este último grupo possui a bacterioclorofila "a +b", as chlorobiáceas possuem as bacterioclorofilas "a"- "c"- "d" e as cromatiáceas bacterioclorofila "a+b". As cianobactérias assemelham-se metabolicamente às plantas superiores já que utilizam a água como doador de hidrogênio (fotossíntese oxigênica). As cromatiáceas utilizam o H₂S como doador-H e o oxidam a ácido sulfúrico ou então ao estado elementar do enxôfre.



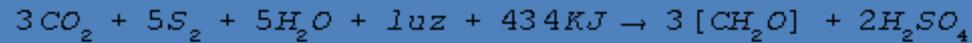


25 um

Bactéria Fotossintetizante

Rhodospirillum sp.

As clorobiáceas oxidam o H₂S ou o enxôfre elementar a ácido sulfúrico



A fotossíntese bacteriana desenvolve-se em **ambiente anaeróbico e não há liberação de oxigênio**. Estes microorganismos estão comumente presentes em profundidades caracterizadas por condições anaeróbicas e redutoras na coluna d'água e onde ainda exista algum aporte de radiação luminosa. Eles formam placas bacterianas de pequena espessura. As rodospiriláceas também estão restritas às zonas anaeróbicas mas precisam de doadores orgânicos de hidrogênio. Algumas de suas espécies (i.e. *Rhodospirillum rubrum*) podem crescer também em condições aeróbicas e no escuro. A reação fotossintética destas bactérias pode ser sumarizada da seguinte maneira:



onde X é uma determinada substância orgânica. Estas bactérias possuem a capacidade de absorver radiações nos dois extremos da luz visível (vermelho longo e azul). A fotossíntese bacteriana tem um significado secundário na produção de sistemas pelágicos por estar restrita, em princípio, a uma estreita faixa na coluna d'água. Em alguns lagos temperados do Japão, esta contribuição varia entre 9-25% da produção primária total dependendo da oferta em H₂S e da extensão e localização de suas zonas anaeróbicas. Em lagos meromíticos ou hipersalinos esta contribuição pode chegar a 80-90% do total da produção primária.

Fixação do Carbono no “Escuro”

Outra interessante característica ecológica das bactérias é a sua capacidade de fixação de carbono (CO_2), comumente referida como fixação no escuro. Vários organismos heterotróficos podem absorver certa quantidade de CO_2 e utilizá-la em processos de carboxilação. Isto normalmente ocorre nas mitocôndrias dos eucariontes ou em certas regiões do citoplasma dos procariontes. A este processo dá-se o nome de reação anaplerótica. São reações de complementação do déficit de carbono que originam-se no ciclo do ácido cítrico através da biossíntese de moléculas orgânicas complexas. Sorokin (1965) demonstrou que as bactérias aeróbicas podem fixar entre 1.5 e 7.5% do CO_2 que produzem enquanto as bactérias anaeróbicas podem fixar até cerca de 37% deste CO_2 . Resta frisar, no entanto, que a fixação no escuro não é privativo das bactérias.

Importância ecológica das bactérias

As novas metodologias para estimar o estudo das bactérias, principalmente a incorporação de timidina (H_3^+) e o método DAPI (epifluorescência), ajudaram a demonstrar claramente que o papel ecológico das bactérias **não limita-se à sua capacidade em remineralizar nutrientes**. Pelo contrário, esta função em muitos lagos é prioritariamente exercida pelo zooplâncton através da sua excreção de amônia e ortofosfato. A principal função das bactérias pode ser sintetizada através da noção do "**elo**" ou "**alça**" **microbiana** (*microbial loop*).

O microbial loop pode ser entendido como o **conjunto de processos e rotas** pelos quais energia e matéria flui a partir de exudados celulares (**matéria orgânica dissolvida**) liberados pelas algas fitoplanctônicas, dentre outros. Estes **exudados são absorvidos ativamente pelas bactérias**. Desta maneira, recursos importantes são disponibilizados aos consumidores por uma via antes desconhecida.

O elo microbiano é basicamente um conjunto de **rotas tróficas**, baseado na predação de bactérias livres na coluna d'água por flagelados heterotróficos que, por sua vez, servem de alimento para os ciliados. O zooplâncton que, na maioria dos casos, consome bactérias com baixa eficiência, pode então se alimentar facilmente de organismos maiores tais como os ciliados. Na realidade, segundo o modelo de rotas tróficas proposto pelo elo microbiano, o principal agente remineralizador na zona pelágica dos mares e grandes lagos seria o zooplâncton.

O estudo do elo microbiano demonstrou ainda a importância do **picoplâncton** autotrófico composto basicamente por células de procariontes fotossintetizantes, tais como *Synechococcus* spp. (Weisse, 1994).

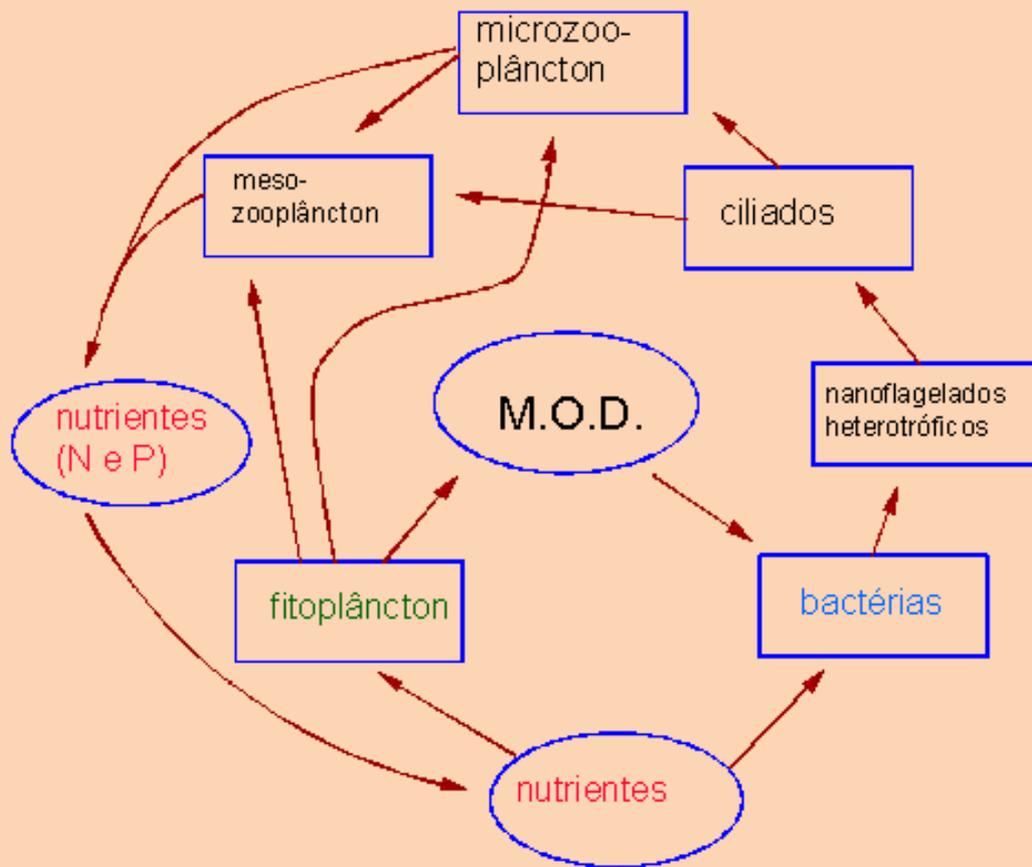
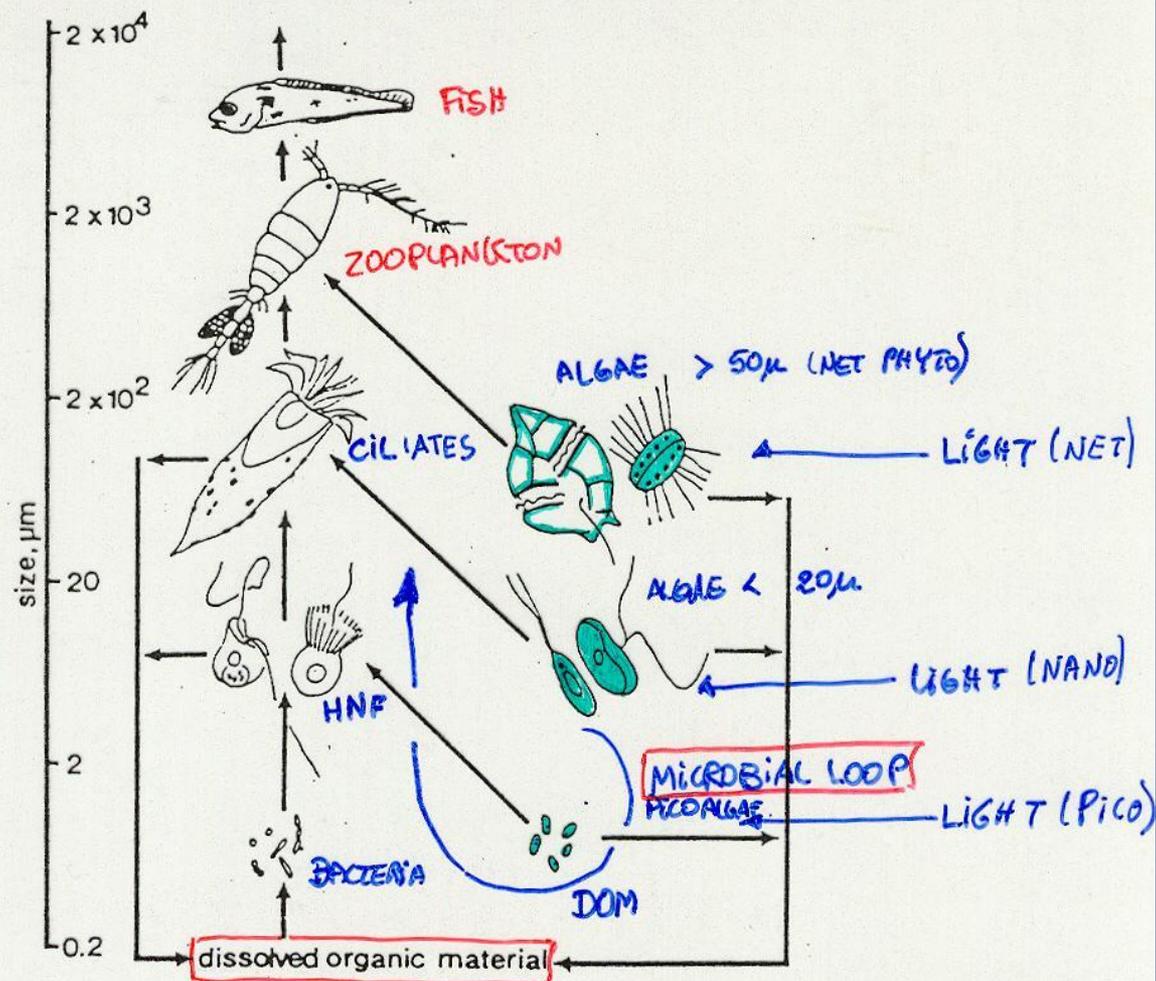


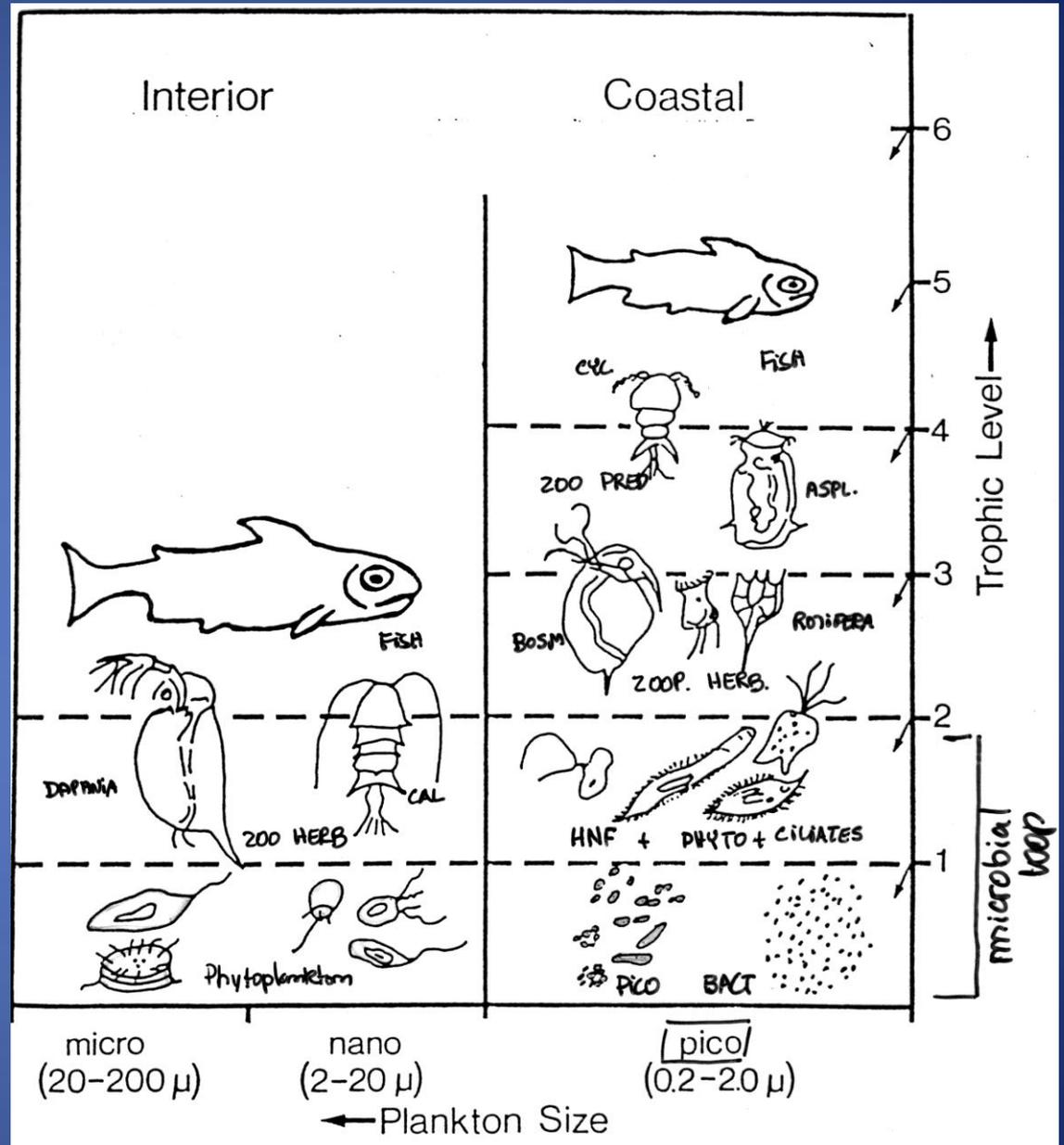
Figure 2 Visão atualizada do papel ecológico de bactérias aquáticas que competem com os produtores primários por nutrientes e destas obtêm ainda a matéria orgânica dissolvida.

Elo Microbiano

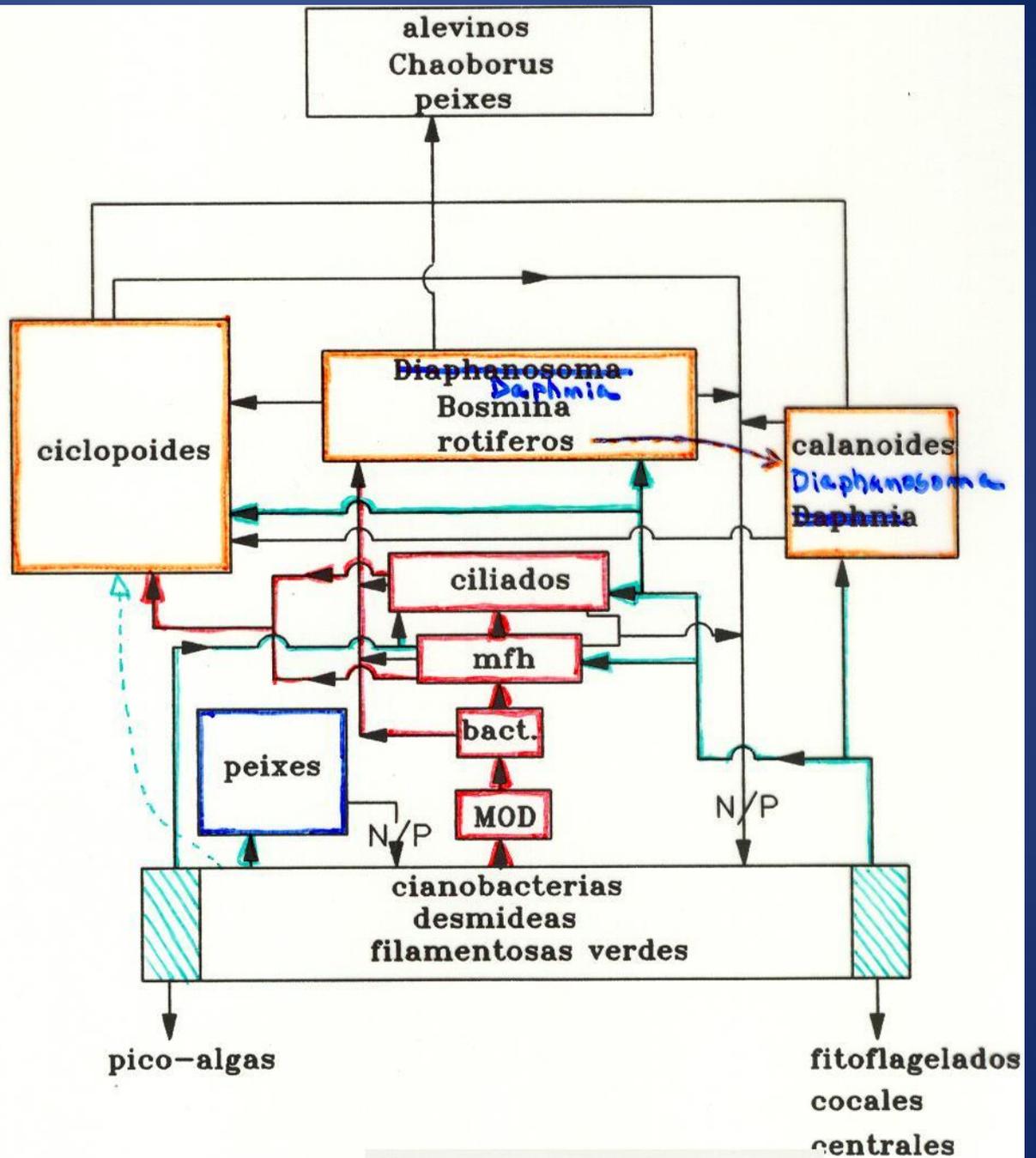
relações tróficas com a comunidade planctônica em lagos, rios, reservatórios e oceanos.



**Modelo “British Columbia”
 Canadá
 Cadeia trófica em lagos
 temperados c
 com diferentes tipos de
 zooplâncton**



Modelo “Pampulha”
Cadeia trófica em lagos e reservatórios tropicais com fitoplâncton dominado por cianobactérias





Muito Obrigado !

Contatos

Prof. Ricardo Motta Pinto Coelho

Laboratório de Gestão de Reservatórios – LGAR

Sala I3 254 Tel 3409 2574

Departamento de Biologia Geral – ICB

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

<http://ecologia.icb.ufmg.br/lgar/>

E-mail: rmpc@icb.ufmg.br