

## Artigo

**Atividade Geológica e Microbiana na Constituição do Ambiente Químico da Biosfera**

Murta, M. M.;\* Pereira, A. I.

*Rev. Virtual Quim.*, 2012, 4 (6), 805-817. Data de publicação na Web: 26 de outubro de 2012<http://www.uff.br/rvq>**Geological and Microbial Activity in the Constitution of the Chemical Environment Biosphere**

**Abstract:** This article discusses some ways to the production of chemicals from both the dynamics of the Earth - analyzed in the light of plate tectonics theory, as those obtained from microbial activity - indicating the advances that have revealed the existence of the Domain Archaea, which led the proposition new phylogenetic tree made from RNA subunits. Thus the central focus of this paper is to relate the various products offered by volcanism with those of microbial metabolism, in an attempt to understand their relative abundance in the biosphere.

**Keywords:** Geological activity; microbial metabolism; chemicals.

**Resumo**

Neste artigo são apontados alguns dos caminhos para a produção de insumos químicos, tanto a partir da dinâmica da Terra - analisados à luz da Teoria Tectônica de Placas, quanto àqueles obtidos de atividades microbianas. Estes dois caminhos revelaram a existência do Domínio *Archaea* que conduziram a proposição de nova árvore filogenética feita a partir do estudo de subunidades de RNA. Assim, o foco central do artigo é relacionar os diversos produtos oferecidos pelo vulcanismo com aqueles do metabolismo microbiano, na tentativa de se compreender sua abundância relativa na biosfera.

**Palavras-chave:** Atividade geológica; metabolismo microbiano; insumos químicos.

\* Universidade de Brasília, Instituto de Química, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.

✉ [murta@unb.br](mailto:murta@unb.br)

DOI: [10.5935/1984-6835.20120058](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20120058)

## Atividade Geológica e Microbiana na Constituição do Ambiente Químico da Biosfera

Maria Márcia Murta, Ana Isabel Pereira

Universidade de Brasília, Instituto de Química, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.

\* [murta@unb.br](mailto:murta@unb.br)

*Recebido em 3 de outubro de 2012. Aceito para publicação em 21 de outubro de 2012*

1. Considerações Iniciais
2. A Dinâmica do Planeta: A Tectônica de Placas e os Sistemas Hidrotermais
3. Domínio Archaea: Metabolismo Microbiano
4. Considerações Finais

### 1. Considerações Iniciais

O avanço nas pesquisas geológicas a partir da década de 1960 permitiu o mapeamento do assoalho oceânico e a compreensão da dinâmica do Planeta a partir da Teoria da Tectônica de Placas<sup>1</sup>. O conhecimento do ambiente químico no oceano profundo nos pontos de maior atividade, revelam a diversidade de insumos ofertados pelo interior da Terra.

Paralelamente, a intensa pesquisa no campo da microbiologia que emergiu a partir da década de 1980 permitiu que Woese e colaboradores<sup>2</sup> propusessem um modelo revolucionário de árvore filogenética para a evolução das espécies. Até então, no âmbito da Classificação Filogenética, os seres vivos eram classificados dentro de dois grandes Domínios: Eucarya e Bacteria. No novo modelo surgiu o Domínio *Archaea*, micro-organismos que vivem em condições inóspitas como altas temperaturas, ou

salinidade extrema - seres que podem extrair a energia do interior do planeta – entre outras fontes, e que, portanto, produzem uma série de metabólitos ao longo de sua existência.

A interseção entre os produtos da atividade geológica e dos ecossistemas presentes nos oceanos médio e profundo será preponderante no ambiente químico da biosfera. Para a compreensão de que maneira as atividades geológicas como, por exemplo, o vulcanismo, enriquecem quimicamente terra, água e ar, torna-se necessário uma breve apresentação de sua dinâmica, no sentido de se conhecer as fontes de insumos químicos, além de parte do ciclo de alguns elementos mais importantes.<sup>3,4</sup> Por outro lado, ao se discutir o metabolismo de micro-organismos é desejável algum conhecimento sobre fontes de energia disponíveis, para finalmente poder se descrever, *em linhas gerais e de forma simplificada*, o ambiente químico da biosfera.

Embora a biosfera compreenda todos os organismos vivos e a matéria orgânica por eles gerada, as pesquisas na área da Geologia reconhecem a existência de interações complexas entre a biosfera e os outros ambientes como a atmosfera, a hidrosfera e a litosfera – o que representa um vasto campo do saber.<sup>1</sup> O presente artigo pretende apenas mostrar a interligação dos conhecimentos apontados do ponto de vista dos conteúdos da Química. Certa ênfase será dada às fontes de energia nas considerações finais.

## 2. A Dinâmica do Planeta: A Tectônica de Placas e os Sistemas Hidrotermais

Ao se estudar a estratificação da Terra (Figura 1) desde as primeiras aulas de Ciências, não é comum encontrar-se relatos dos processos geológicos que explicam os caminhos prováveis que conduziram à

constituição química do Planeta. Além disso, no âmbito dos Cursos de Graduação em Química, em geral, não se discute a composição química de cada uma das camadas identificáveis.

As teorias cosmológicas mostram que o Sistema Solar formou-se há cerca de cinco bilhões de anos (5Ga – *giga-ano*), e que o planeta conta com 4,6Ga. Há indícios de que a Terra sofria constante bombardeamento de planetesimais e outros corpos remanescentes da formação do Sistema Solar, e que estas colisões forneciam grandes quantidades de energia ao planeta em formação.<sup>1,3</sup> Parte dessa energia era oriunda dos impactos, outra era proveniente do decaimento radioativo, atribuindo-se a este último fator o aquecimento no interior da Terra. Acredita-se que um grande impacto foi responsável por fundir o planeta por completo, quando o material mais denso afundou formando o Núcleo, e o menos denso emergiu, diferenciando-se, após o resfriamento, em camadas: a Crosta, o Manto e o Núcleo.<sup>1</sup>

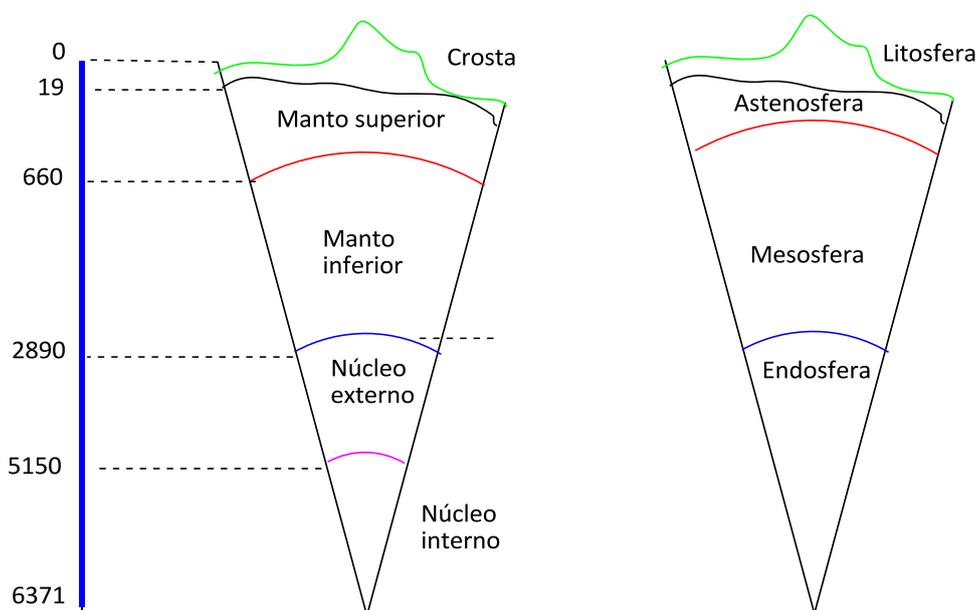


Figura 1. Estratificação da Terra<sup>1</sup>

Uma das teorias mais aceitas sobre a *origem da Lua* refere-se a um impacto violento entre a Proto-Terra e outro planeta

interno ao sistema solar, da magnitude de Marte, ejetando uma enorme quantidade de matéria que originou a lua; significando para

a Terra um aquecimento tal que toda ela se fundiu, sendo sua *rotação* e *inclinação* estabelecidas.<sup>1,3</sup>

O Núcleo é formado principalmente pelo elemento ferro e estende-se do centro do Planeta, localizado a aproximadamente 6371 km de profundidade até cerca de 2890 km, no limite núcleo-manto (Figura 1). A parte mais externa do núcleo é líquida e o centro é sólido por causa da grande pressão a que está submetido. Por outro lado, o manto é mais denso quando próximo do núcleo (mesosfera), tendo uma camada mais flexível (astenosfera) quando em contato com a crosta: “*como icebergs flutuam nos oceanos, montanhas flutuam num tipo de mar de rochas plásticas que escoam facilmente sob pressão*”.<sup>5</sup> Dessa forma, o manto é constituído de rochas de densidades

intermediárias em relação ao núcleo. Acima do manto formou-se uma fina camada sólida, a crosta terrestre (litosfera), apresentando rachaduras que dão origem a 12 placas principais, as *placas tectônicas* que se movem sobre a astenosfera, a camada mais externa do manto.<sup>1</sup>

A teoria da *Tectônica de Placas* descreve e prevê o movimento das placas que formam a crosta sobre o manto, também é conhecida como Teoria Unificadora, uma vez que explica o vulcanismo, as atividades sísmicas, a existência de fósseis similares em continentes distantes e outras observações.<sup>1</sup> Os eventos geológicos envolvendo grandes deslocamentos de energia como vulcões (Figura 2) e terremotos estão associados aos movimentos que ocorrem no limite entre duas placas.



**Figura 2.** Erupção no monte Santa Helena em maio de 1980<sup>6</sup>

Os limites entre as placas podem ser de três tipos: *transformantes* (Figura 3), quando as placas se afastam horizontalmente, como ocorre na falha de Santo André, na Califórnia e *convergentes* (ponto 2 na Figura 4), quando duas placas colidem e uma delas retorna ao

manto e seu material é reciclado. O terceiro tipo, o que mais interessa nesta discussão, é o limite *divergente*, quando duas placas se afastam originando uma nova litosfera, ou seja, uma nova crosta. (ponto 3 na Figura 4).<sup>1</sup>

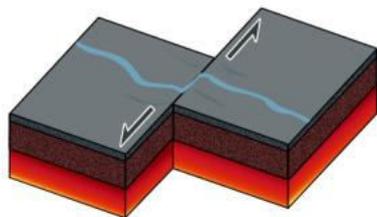


Figura 3. (Fonte: A. I. Pereira)<sup>1</sup>

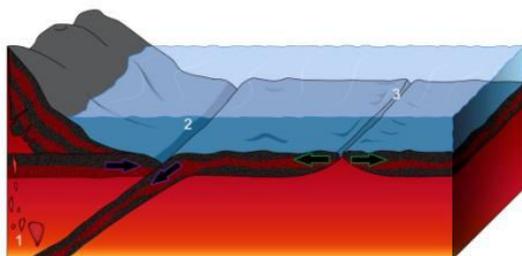


Figura 4. (Fonte: A. I. Pereira)<sup>1</sup>

Nesse limite divergente formam-se as *Dorsais Meso-oceânicas*, uma cadeia de montanhas originada pelo vulcanismo intenso observado durante o afastamento das placas, e é no topo dessa cadeia que se pode avistar uma fenda profunda, chamada de vale em rifte. Nos vales em rifte das Dorsais Meso-oceânicas observa-se intensa atividade; depois que a lava e outros

materiais deixam de fluir, e a atividade hidrotermal toma seu lugar.<sup>1</sup>

A interação entre a hidrosfera e a litosfera é representada pelos *sistemas hidrotermais*: quando a água se infiltra e circula entre o magma e as rochas quentes, ao retornar à superfície o faz rapidamente e sem perda de calor, podendo alcançar altas temperaturas, mas pelo fato de estar submetida à alta pressão, permanece no estado líquido.<sup>5</sup> Nesse retorno à superfície, a água vai lixiviando, em grande parte, vários metais dissolvidos e expelindo grandes quantidades de gases.<sup>1</sup>

Os sistemas hidrotermais podem ser de dois tipos: os *superficiais*, que dão origem às fontes quentes e gêiseres (Figura 5) – fontes de energia geotérmica – e os que ocorrem nos *centros de expansão* das dorsais meso-oceânicas, local em que a interação entre a litosfera e hidrosfera é mais intensa, formando as fumarolas negras “*plumas de água quente, saturada de metais, com temperaturas chegando a 350°C, jorrando como chaminés pretas por condutos hidrotermais na crista da cadeia meso-oceânica*”.<sup>1</sup>



Figura 5. Grand Geyser, Parque Nacional de Yellowstone.<sup>7</sup> Foto: Stefan Pauli

Quando a água quente ascendente se resfria os minerais metálicos precipitam formando os minérios de ferro, cobre e zinco que se depositam nos centros de expansão das dorsais, principalmente na forma de sulfetos, e os mais comuns são: galena (PbS); cinábrio (HgS); pirita (FeS); esfarelita (ZnS); malaquita (CuS); note que todos se encontram em estado reduzido com relação aos seus óxidos correspondentes.<sup>3</sup> Acredita-se que os grandes depósitos minerais como os encontrados em Chipre e nas Filipinas, entre outros, podem ter sua origem nos pontos de circulação hidrotermal dos vales em rifte.<sup>1</sup>

Ainda no fundo do mar, longe dos limites entre placas, nas chamadas planícies abissais do assoalho oceânico, são encontrados em grande quantidade *nódulos de manganês*, que são agregados dos óxidos de manganês, ferro, cobre, níquel, cobalto e outros óxidos de metal.<sup>1</sup> Como os depósitos de manganês estão se esgotando em terra, e ocorrem outros metais importantes nesses nódulos, esta região é promissora para a mineração no fundo do oceano. Embora esta questão ainda esteja em aberto, a exploração exigirá alta tecnologia de prospecção, além da necessidade de se estabelecer a propriedade do material explorado.

Pelas repercussões econômicas e, portanto, políticas que tal exploração representa, em 1982 as Nações Unidas assinaram um acordo para regulamentar a exploração em mar profundo, denominado *Tratado do Mar*. O Brasil é signatário da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM III), promulgada pelo Decreto 1530/95, e desde 2004 vem pleiteando junto a ONU um aumento do limite exterior da Plataforma Continental, posição estratégica para a soberania nacional mediante às riquezas do mar, um tema de relevância diante dos recursos hídricos e vastidão continental que o Brasil representa.<sup>8,9</sup>

Além da abundância mineral que ocorre nos sistemas hidrotermais, a grande emissão de gases observados nas fumarolas – e que

representam a interação do sistema hidrosfera-litosfera com a atmosfera – está na origem do Efeito Estufa que, desde o resfriamento da Terra primordial há aproximadamente 3,8Ga, vem mantendo a superfície terrestre com temperatura média de 14°C, o que permite que a água permaneça no estado líquido, crucial para a existência da vida.<sup>3</sup>

Os gases emitidos em grandes quantidades pelos vulcões correspondem a uma variação de 70 a 95% de vapor d'água, seguido por gás carbônico (CO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e traços de nitrogênio (N<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e cloro (Cl<sub>2</sub>).<sup>1</sup> Atribui-se grande importância a esses gases por se supor que eles sejam responsáveis pela formação dos oceanos e da atmosfera, pois, embora uma parte do vapor d'água possa corresponder à água subterrânea e à do mar, outra parte pode ter origem nas profundezas da Terra, aprisionado em rochas antigas. É proposto que este suprimento de água em épocas da Terra primordial tenha origem nas colisões de asteroides após a formação da Lua.<sup>10</sup>

Como o objetivo deste trabalho é estabelecer o vínculo entre a riqueza mineral e os gases emitidos pelas fumarolas, com a oferta de insumos químicos para os ecossistemas presentes nos oceanos médio e próximo ao nível do mar, os gases H<sub>2</sub>S e H<sub>2</sub> terão maior importância - além de naturalmente o CO<sub>2</sub> fundamental no ciclo do carbono. Assim, o fluxo desses gases será discutido em certo detalhe quando corresponderem à fonte de energia metabólica.<sup>4</sup>

### 3. Domínio Archaea: Metabolismo Microbiano

---

Como mostra Schmidt<sup>11</sup>, quando em 1956 Kluyver e van Neil trouxeram para a ordem do dia a discussão sobre o papel dos microorganismos para a existência da vida na Terra

– fazendo referência aos que vivem nos ambientes comuns a todos, como a grama ou um punhado de terra e também em ambientes extremos, como as fontes hidrotermais – e chamavam a atenção para o seu papel nos ciclos dos elementos químicos na biosfera. Nos anos seguintes, explorações

geológicas não cessaram de revelar micro-organismos desconhecidos como, por exemplo, aqueles encontrados em várias amostras retiradas das fontes quentes do Parque Nacional de Yellowstone, na Califórnia (Figura 6).<sup>12</sup>



**Figura 6.** Vista Aérea do [Grand Prismatic Spring](#); Parque Nacional de Yellowstone.<sup>13</sup> Foto: [Jim Peaco](#)

Restava ainda um grande problema para os biólogos do campo da microbiologia: embora grande parte das descobertas em Bioquímica, Genética e Biologia Molecular tivessem como base os sistemas microbiológicos, os métodos para a *classificação* de tais organismos eram ainda precários, sobretudo por dificuldades metodológicas em genética molecular para se estudar suas linhagens.

Este desafio foi superado pelos trabalhos do microbiologista Carl Woese<sup>2</sup> que, cumprindo preceitos darwinianos, conseguiu traçar uma árvore filogenética a partir da clonagem de sequências de genes dessas amostras retiradas do ambiente, baseando-se em pequenas subunidades de RNA – molécula escolhida por sua distribuição universal e facilidade de isolamento. Os

resultados alcançados fortaleceram a ideia de um ancestral comum para a origem dos seres vivos e permitiram estabelecer três grandes domínios: *Archaea*, *Bacteria* e *Eucarya*, sendo que o domínio *Archaea* representou o novo e conduziu a uma intensa pesquisa em genética molecular.

No início, como as archaeas eram isoladas em ambientes extremos, elas foram denominadas extremófilas, mas atualmente sabe-se que esses organismos são encontrados em todos os tipos de ambiente e são, portanto, considerados ubíquos. A Figura 7 mostra uma simplificação - naquilo que concerne a todas as bifurcações – dos trabalhos realizados durante uma década para concretizar a proposta de Woese baseada no RNA ribossomal (r-RNA).<sup>12</sup>

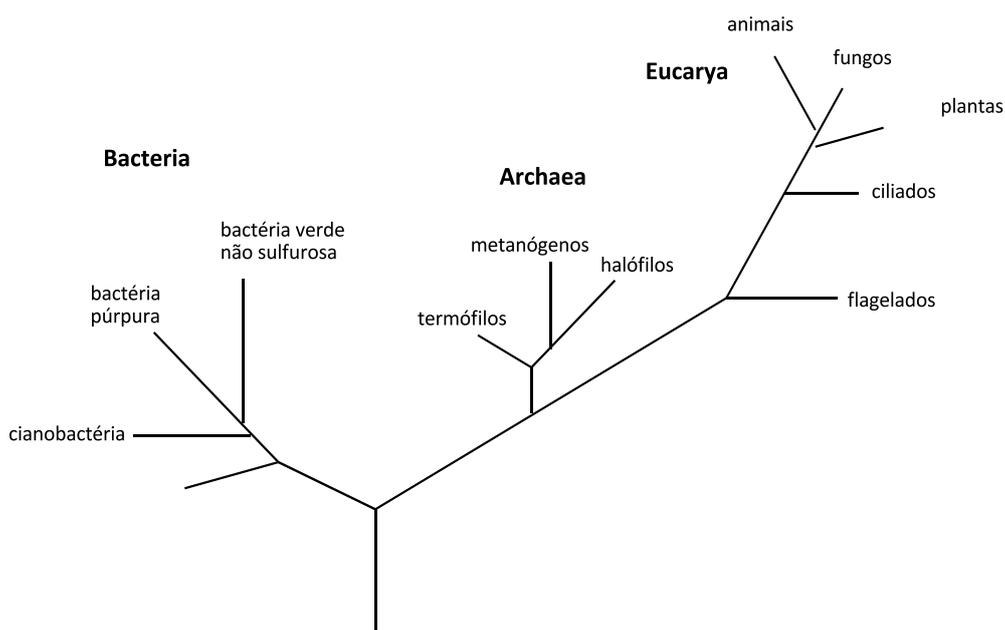


Figura 7. Exemplo parcial e simplificado de árvore filogenética<sup>12</sup>

Desnecessário dizer que tais resultados revolucionaram várias áreas da Biologia, incluindo o potencial biotecnológico que as archaeas representam.<sup>14</sup> Todavia, o ponto de vista que aqui interessa relaciona-se aos tipos de metabolismo de alguns micro-organismos do domínio *Archaea* para conhecer-se a sua contribuição aos ciclos de alguns elementos químicos na biosfera indicando, sempre que pertinente, a aplicação tecnológica resultante

desse conhecimento. Como 90% da diversidade filogenética se relaciona ao mundo microbiano e suas diferenças metabólicas, é natural que se focalize a atenção na participação dessas espécies no Ciclo do Carbono já que são responsáveis por aproximadamente 95% da produção global de CO<sub>2</sub>, além de participarem dos ciclos globais do nitrogênio, enxofre, oxigênio, fósforo e muitos metais de transição.<sup>11</sup>

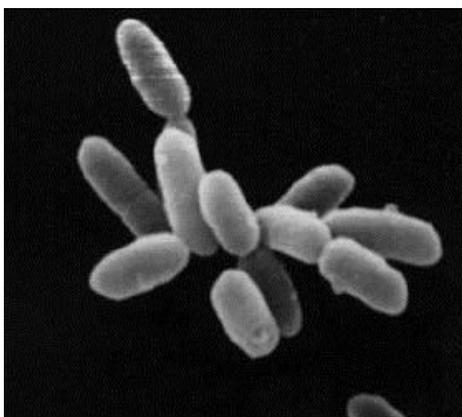


Figura 8. Cluster de células de *Halobacterium sp.* linhagem NRC-1.<sup>15</sup> Foto: NASA

Do ponto de vista metabólico, as archaeas foram inicialmente divididas em quatro tipos: metanogênicas, halófilas extremas (Figura 8), sulfotermófilas e espécies termofílicas redutoras de sulfato; mais tarde, dados de pesquisa genético-molecular, acoplados à microbiologia, mostraram outras subdivisões.

Para o alcance que se deseja dar nessa abordagem, usar-se-á a primeira forma de classificação e focalizaremos a atenção em dois tipos de archaea: *metanogênicas* – por sua importância no saneamento ambiental – e nas espécies *termofílicas redutoras de sulfato* (Quadro 1).<sup>14,16</sup>

	Metanogênicas	Hipertermófila	Halófila
Distribuição no ambiente	Sedimentos aquosos profundos; pântanos; aterros sanitários; biodigestor de tratamento de resíduos	Ambientes geotérmicos: gêiseres; fendas de vulcão; fendas do leito oceânico; ambientes marinhos profundos e não profundos	Ambiente lacustre com alta salinidade; superfície dos alimentos conservados com salmoura
Características do habitat	Ausência de O <sub>2</sub> ; Abundância de matéria orgânica	Presença de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> e S <sup>0</sup>	[Na+]=105-140g.L <sup>-1</sup> pH levemente alcalino
Tipo principal de metabolismo	Autotrófico, produz metano a partir de substratos orgânicos. Anaeróbico obrigatório	Quimiorganotrófico ou quimiolitotrófico.	Quimiorganotrófico Aeróbico obrigatório FS <sub>anox</sub>
Aplicações Biotecnológicas	Saneamento ambiental; biorremediação nos vazamentos de petróleo	Produção de ácidos orgânicos; vitaminas; aminoácidos; antibióticos	Enzimas extremófilas

**Quadro1.** Características de algumas archaeas.<sup>14,16</sup>

Quando se pensa no Ciclo do Carbono, a fotossíntese oxigênica (FS<sub>ox</sub>), ou seja, aquela que produz O<sub>2</sub> como receptor terminal de elétrons, é a que sempre ocorre, não só porque os livros texto de Bioquímica dão ênfase a esta forma de metabolismo, mas também por estar diretamente relacionada à existência da vida de maneira mais evidente.

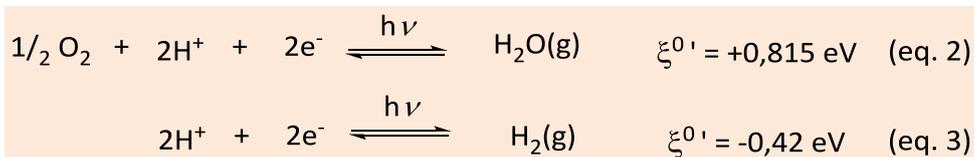
As plantas e as cianobactérias - bactérias que vivem na superfície da água dos oceanos - utilizam a água como doador de elétrons (eq. 1), e a fonte de energia que direciona a fixação de carbono é a radiação visível que é capturada pelos pigmentos *clorofila a* e *b* (λ=425 nm e 450 nm, respectivamente). A equação 1 mostra a reação total da FS<sub>ox</sub>:



Como a zona transparente à luz (zona fótica) da superfície oceânica tem em média 100m de profundidade, a mudança para um meio mais denso, a água, explica o fato de que o comprimento de onda da luz aumenta progressivamente nessa região, alcançando o infravermelho próximo (1000nm). Assim os organismos que vivem nesse ambiente ainda utilizam a fotossíntese para extração de

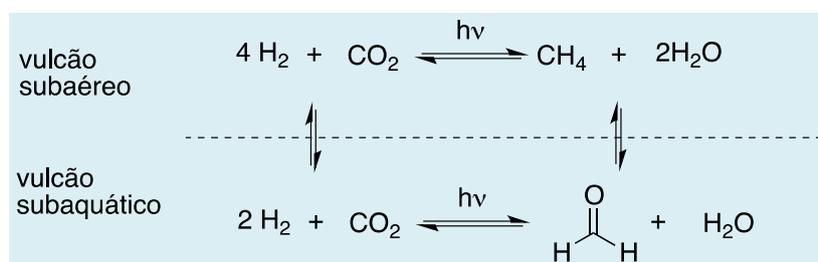
energia e fixação de carbono, mas a água, um doador de elétrons relativamente fraco (eq. 2), é substituída por substâncias com um potencial eletroquímico maior como, por exemplo, H<sub>2</sub> (eq. 3). Esse tipo de metabolismo é classificado como fotossíntese anoxigênica (FS<sub>anox</sub>), e utiliza como pigmento para captar a energia luminosa diferentes

bacterioclorofilas e bacteriorodopsinas ( $\lambda=750\text{nm}$ ,  $900\text{nm}$  e  $1000\text{nm}$ ).<sup>3</sup>



Ao analisar-se as equações 2 e 3 deve-se ter em mente que os valores de potencial de redução padrão de semirreação ( $\xi^{0'}$ ) para a água e o  $\text{H}_2$  são calculados a partir dos parâmetros bioquímicos de estado-padrão, que difere do físico-químico no que se refere aos valores de pH – para este último o valor padrão de pH é igual a zero; mas as condições fisiológicas impõem o valor de  $\text{pH}=7$  para os sistemas bioquímicos. Muito embora as condições do meio nas reações de oxidação e redução alterem os valores da energia livre disponível, se aceita esse cálculo como uma primeira aproximação para o rendimento energético.<sup>14</sup>

Das várias espécies de *Archaea* que sintetizam metano – as metanogênicas – existe um grupo que realiza a  $\text{FS}_{\text{anox}}$  empregando  $\text{H}_2$  como doador de elétrons e outro que emprega o mesmo  $\text{H}_2$  como combustível,<sup>4</sup> estas últimas são as que habitam a zona escura dos oceanos; sendo que as fontes principais do gás hidrogênio, para ambos os tipos, são os vulcões aéreos e os subaquáticos. Uma das rotas identificadas para estes ecossistemas baseados em  $\text{H}_2$ , e que corresponde a  $\text{FS}_{\text{anox}}$  é mostrado no Esquema 1:



Esquema 1. Metabolismo de archaeas metanógenas<sup>4</sup>

Grande parte da matéria orgânica formada (formaldeído, por exemplo) decompõe-se em metano que escapa para a superfície onde, por fotólise forma  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ , voltando ao ciclo; mas, principalmente, o  $\text{CH}_4$  pode ser decomposto ainda no oceano por meio de oxidação anaeróbica pelas archaeas metanogênicas. Dessa forma, atribui-se à metanogênese um dos principais caminhos para a mineralização: grandes quantidades de íons  $\text{Ca}^{2+}$  presentes nos oceanos consomem o  $\text{CO}_2$  para formar as conchas

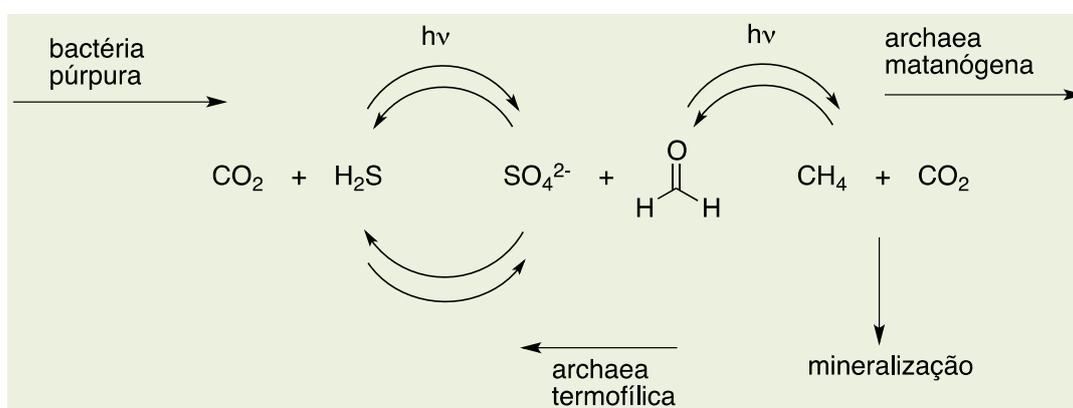
( $\text{CaCO}_3$ ) – a carapaça dos mais variados animais marinhos - além das rochas carbonáticas, em parte de origem biológica; o que atesta a importância do metabolismo das archaeas para o ciclo do carbono.<sup>1</sup>

Por outro lado, os ecossistemas formados por algumas espécies de archaeas termofílicas, ou seja, aquelas capazes de reduzir sulfato participam ativamente do Ciclo do Enxofre; este elemento chega à superfície da Terra por vários caminhos: nos sistemas hidrotermais oceânicos e terrestres

e nos vulcões subaquáticos e subaéreos observam-se fluxo de  $\text{H}_2\text{S}$  – nesses últimos o enxofre também está presente na forma de  $\text{SO}_2$ . A mistura  $\text{SO}_2:\text{H}_2\text{S}$  expelida pelos vulcões subaéreos, em geral na proporção de 5:1, sofre fotólise na atmosfera provocada pela radiação UV, formando uma mistura de enxofre elementar ( $\text{S}^0$ ),  $\text{H}_2\text{SO}_4$  além dos dois gases reagentes.<sup>4</sup>

Nos sistemas hidrotermais modernos observam-se o Ciclo do Enxofre acoplado ao Ciclo do Carbono. Nesses ecossistemas, a matéria orgânica produzida por bactérias que

realizam a  $\text{FS}_{\text{anox}}$ , tendo como doador de elétrons  $\text{H}_2\text{S}$  – por exemplo, as bactérias púrpuras sulfurosas – é acompanhado pela formação de sulfato, que por sua vez será reduzido por archaeas termofílicas produzindo  $\text{H}_2\text{S}$  que entra no ciclo novamente.<sup>4</sup> Ademais parte da matéria orgânica pode ser decomposta por archaeas metanogênicas, dando origem ao metano. Como o metabolismo das archaeas depende da presença de outros micro-organismos, o processo total é denominado *consórcio microbiano* (Esquema 2).<sup>14,16</sup>



Esquema 2. Consórcio Microbiano<sup>4,14,16</sup>

#### 4. Considerações Finais

À parte a evidente interdisciplinaridade intrínseca à Química, que permite compreender desde a dinâmica da Terra do ponto de vista dos insumos químicos, até a compreensão do metabolismo dos vários seres vivos; uma das vertentes apontadas na discussão proposta é a questão energética, tanto em conexão com as fontes – geotérmica; gás natural; combustível fóssil e biocombustível – quanto com o tipo de reação envolvida nas transformações de energia química: *reações de oxidação e redução*.

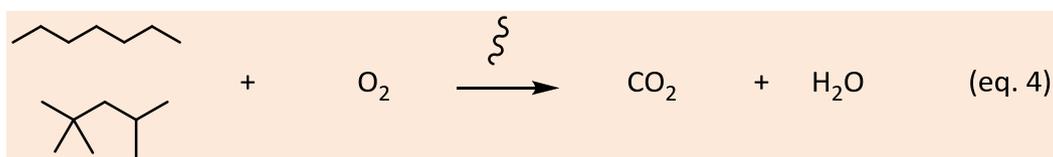
O conceito de oxidação e redução está

amplamente presente nos conteúdos do Ensino de Química e pode ser visto como uma das chaves para uma compreensão mais ampla da natureza das transformações dos materiais. O Quadro 2 mostra alguns desses processos indicando os doadores e os receptores de elétrons, além de incluir os combustíveis em geral – que em última instância têm origem biológica – no caso, considerados como sistemas ideais do ponto de vista do rendimento.

Como podemos observar na equação 4 a mistura dos alcanos *n*-heptano e iso-octano que formam a gasolina – as espécies reduzidas, ou seja, ricas em energia – quando submetidas à combustão tem o  $\text{O}_2$  como um excelente aceptor de elétrons.

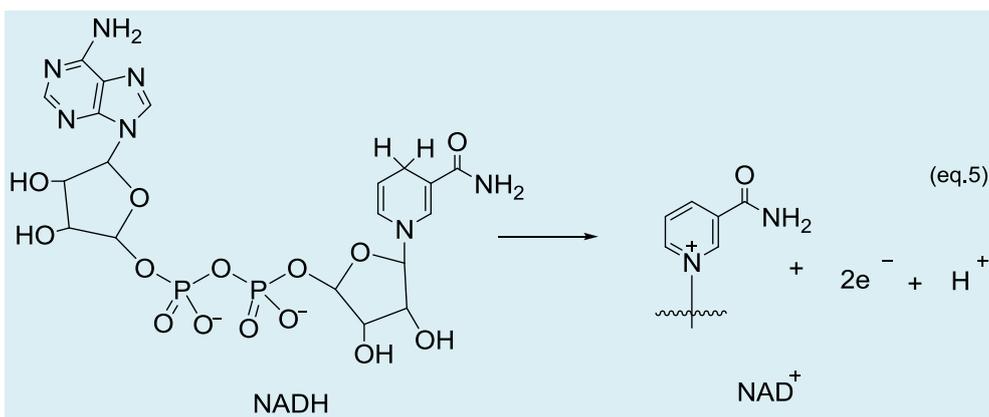
Aceptor de elétrons	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub>
Produto	amido, celulose	CH <sub>4</sub>	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \end{array}$	H <sub>2</sub> O CO <sub>2</sub>
Doador de elétrons e fonte de matéria	H <sub>2</sub> O CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S ou S <sup>0</sup> CO <sub>2</sub>	alcanos, etanol, biodiesel
Ser vivo	Plantas e cianobactérias FS <sub>ox</sub>	Archaeas metanogênicas FS <sub>anox</sub>	Archaeas hipertemófilas FS <sub>anox</sub>	combustíveis fósseis bio-combustíveis

**Quadro 2.** Aceptores e doadores de elétrons em sistemas vivos e em combustíveis



Da mesma forma, muitas das reações das vias metabólicas envolvem reações de oxidação e redução (equação 5) para a manutenção da demanda energética que os seres vivos necessitam para suas atividades essenciais, uma característica dos sistemas

termodinâmicos abertos. A coenzima nicotinamida adenina dinucleotídeo (NADH – forma reduzida e NAD<sup>+</sup> - forma oxidada) desempenha papel crucial em tais vias metabólicas.



Por fim, pensando nos novos profissionais da área de Química, dois pontos devem ser notados: o número sempre crescente de novas áreas de atuação, como a Biotecnologia e as Ciências Ambientais; além da exigência cada vez maior de uma visão totalizadora do conhecimento, contemplando

a dinâmica intersistêmica – entre sistemas que são também dinâmicos – o que aumenta exponencialmente a complexidade do estado da arte nesse campo.

## Agradecimentos

As autoras agradecem à Prof.<sup>a</sup> Cynthia Kyaw do Instituto de Ciências Biológicas da UnB por suas valiosas contribuições no sentido de esclarecer várias dúvidas relacionadas ao Domínio Archaea, além de indicar fontes atualizadas acerca do tema.

## Referências Bibliográficas

- <sup>1</sup> Press, F.; Siever, R.; Gotzinger, J.; Jordan, T. H. Para Entender a Terra. Trad. R. Menagat. 4<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- <sup>2</sup> Gutell R. R.; Woese, C. R. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1990**, *87*, 663. [CrossRef]
- <sup>3</sup> Nisbet, E. G.; Sleep, N. H. *Nature* **2001**, *409*, 1083. [CrossRef]
- <sup>4</sup> Canfield, D. E.; Rosing, M. T.; Bjerrum, C. *Phil. Trans. R. Soc. B* **2006**, *361*, 1819. [CrossRef]
- <sup>5</sup> Moore, W. J. Físico-Química. Trad. H. L. Chun, I. Jordan, M. C. Ferreroni. 4<sup>a</sup> ed. Editora Edgard Blucher: São Paulo, 1976.
- <sup>6</sup> Sítio da Wikipedia. Disponível em: <[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d1/MSH80\\_eruption\\_mount\\_st\\_helens\\_05-18-80-dramatic-edit.jpg/399px-MSH80\\_eruption\\_mount\\_st\\_helens\\_05-18-80-dramatic-edit.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d1/MSH80_eruption_mount_st_helens_05-18-80-dramatic-edit.jpg/399px-MSH80_eruption_mount_st_helens_05-18-80-dramatic-edit.jpg)>. Acesso em: 22 outubro 2012.
- <sup>7</sup> Sítio da Wikipedia. Disponível em: <[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/Yellowstone\\_Grand\\_Geysir\\_01.jpg/800px-Yellowstone\\_Grand\\_Geysir\\_01.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/Yellowstone_Grand_Geysir_01.jpg/800px-Yellowstone_Grand_Geysir_01.jpg)>. Acesso em: 22 outubro 2012.
- <sup>8</sup> Martins E. M. O. Pré-sal, Soberania e Jurisdição Marítima, Âmbito Jurídico, Rio Grande, XIV, n.86, mar 2011. [Link]
- <sup>9</sup> Zanin, R. B. O Direito do Mar e a Legislação Brasileira. *Revista Brasileira de Direito Constitucional* RBDC **2010**, *83*. [Link]
- <sup>10</sup> Mottl, M.J.; Glazer, B. T.; Kaiser, R. I.; Meech, K. J. *Chem. Erde Geochem.* **2007**, *67*, 253. [CrossRef]
- <sup>11</sup> Schmidt, T. M. *Int. Microbiol* **2006**, *9*, 217. [Link]
- <sup>12</sup> Woese, C. R. *Curr. Biol.* **1996**, *6*, 1060. [CrossRef]
- <sup>13</sup> Sítio da Wikipedia. Disponível em: <[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/Yellowstone\\_Grand\\_Geysir\\_01.jpg/800px-Yellowstone\\_Grand\\_Geysir\\_01.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/Yellowstone_Grand_Geysir_01.jpg/800px-Yellowstone_Grand_Geysir_01.jpg)>. Acesso em: 22 outubro 2012.
- <sup>14</sup> Bullock, C.; *Biochem. Mol. Biol. Educ.* **2000**, *28*, 186. [CrossRef]
- <sup>15</sup> Sítio da Wikipedia. Disponível em: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a1/Halobacteria.jpg>>. Acesso em: 22 outubro 2012.
- <sup>16</sup> Vazoller, R. F.; Manfio, G. P.; Canhos, V. P. Diversidade no domínio Archaea in Biodiversidade no Estado de São Paulo. Síntese do conhecimento ao final do século XX, 1: Micro-organismos & vírus, cap. 2, **1997**. [Link]