

Wilson F. Jardim e Aécio P. Chagas

Instituto de Química - Unicamp - C. Postal 6154 - 13081 - Campinas - SP

Recebido em 15/10/91

The Gaia hypothesis, by J. E. Lovelock, is briefly presented and commented. It wishes to distinguish one as the only current hypothesis able for to deal with global environmental problems.

Keywords: Environmental Chemistry; Gaia hypothesis.

INTRODUÇÃO

A Química Ambiental tem-se firmado como uma importante área da Química, não só pelas razões sociais da poluição e da devastação ambiental, mas também pela fonte de problemas e de desafios que tem trazido aos químicos: detecção de poluentes, tratamento de efluentes, desenvolvimento de processos não-poluídores, desenvolvimento de produtos biodegradáveis, etc.. No entanto os problemas atuais não são caracterizados apenas pelos seus aspectos qualitativos semelhantes aos que os químicos já vinham tratando, mas também por problemas qualitativamente diferentes, como aqueles que envolvem grandes ecossistemas como a atmosfera e o oceano.

Os químicos já têm longa experiência no que se refere à ampliação de escala. Da bancada para a planta piloto e desta para a escala industrial, a complexidade alarga-se cada vez mais. E existe todo um conjunto de teorias, regras de procedimento, etc., que auxiliam ao químico e ao engenheiro na solução destes problemas. Na questão do meio ambiente têm-se situações de um certo modo semelhantes a essas, mas há outras que são completamente diversas. Pode-se comparar um lago a uma fábrica, porém o oceano já é algo não apenas maior, mas mais complexo, qualitativamente diferente. Quando se tenta extrapolar em tal amplitude, não se pode prever para o macro-sistema todas as interações possíveis, porque está se lidando com nichos ecológicos altamente complexos. E neste caso, nem ecólogos, nem químicos, nem quaisquer outros cientistas têm experiência e poderão prever o final disto.

Existe alguma teoria que possa auxiliar os cientistas ambientais (químicos, biólogos, físicos e outros) no trato destes problemas?

Esta é a grande questão.

Uma resposta a ela é o que tentaremos dar neste artigo. Uma resposta afirmativa, mostrando de forma sucinta o que é a "hipótese Gaia", como surgiu e qual a sua importância para as ciências ambientais, enquanto a única hipótese disponível atualmente para tratar dos grandes ecossistemas de forma global.

A HIPÓTESE GAIA

A hipótese de que a vida, por si só, tem mantido o ambiente otimizado através do controle da temperatura e da composição química da biosfera foi desenvolvida pelo cientista e inventor inglês James E. Lovelock, com a ajuda de uma especialista em microbiologia, a americana Lynn Margulis. Foi denominada hipótese Gaia, ou simplesmente Gaia por ser esta a palavra utilizada na antiga Grécia ("γῆ") para identificar a "Mãe Terra" como um ser vivo e pulsante. As idéias do autor principal desta hipótese foram coletadas, em sua maior parte, em dois livros: "Gaia: A new look at life on Earth"¹, publi-

cado em 1979, e "The Ages of Gaia. A biography of our living Earth"², publicado em 1988.

De acordo com Lovelock, "através da Teoria Gaia eu vejo a Terra, e a vida nela contida, como um sistema, um sistema que tem a capacidade de regular a temperatura e a composição da superfície terrestre e mantê-la confortável para os seres vivos. Este sistema é auto regulável por um processo ativo mantido pela energia livre disponível da luz solar".

Embora apresentada à comunidade científica em 1969, apenas recentemente é que Gaia passou a ser debatida como sendo realmente uma hipótese científica e não uma visão esotérica da interdependência biótica e abiótica de nosso planeta.

A hipótese Gaia começou a tomar forma quando Lovelock era consultor da NASA e engajado no programa que investigava a vida em Marte, procurando experimentos que pudessem ser feitos na superfície do planeta após o pouso da espaçonave não-tripulada Viking. Lovelock argumentava que não era necessário sair da Terra para se constatar que não havia vida em Marte. O mesmo se aplicava a Vênus. Em Marte não há oceanos. Caso a vida tivesse florescido em Marte, certamente teria de fazê-lo na atmosfera; ou então seria estagnada pela ausência de um fluido de escoamento. É interessante mencionar aqui que a própria definição de vida foi alvo de inúmeros debates entre os consultores da NASA durante o programa Viking. Por exemplo, a presença de DNA ou de qualquer composto contendo um carbono assimétrico pode ser um indício de vida tal qual nós, terrestres, a concebemos. Estes mesmos indícios podem, no entanto, não serem válidos para Marte.

Assim, Lovelock acreditava que embora alguns parâmetros bioquímicos pudessem ser indícios da vida conforme ela se desenvolve no nosso planeta, estes certamente não se aplicariam para todo o sistema solar. As leis termodinâmicas, no entanto, se aplicariam além das fronteiras do nosso planeta, além do nosso sistema solar. São universais. E foi justamente explorando a Segunda Lei da Termodinâmica, ou seja, a lei do aumento de entropia [veja NOTA 1], que o autor comparou o estado de equilíbrio existente na atmosfera terrestre frente às condições encontradas nas atmosferas de Marte e Venus.

A tab. 1 apresenta os dados desta comparação: a composição das atmosferas de Marte, de Vênus, da Terra e de uma hipotética *Terra sem vida* [vide NOTA 2] e também a energia livre molar dessas atmosferas. Em Marte e Vênus tem-se a predominância do dióxido de carbono. Os teores de oxigênio são extremamente baixos quando confrontados com os 21% da nossa atmosfera. Comparados aos outros três casos, nossa terra está longe de ser um sistema termodinamicamente estável⁵. Caso todas as formas de vida fossem extintas da biosfera, a nossa atmosfera tenderia para uma situação de equilíbrio, apresentando ao final de alguns milhares de anos uma composição química bastante semelhante à inóspita atmosfera

TABELA 1 - Composição e Termodinâmica das atmosferas da Terra, Vênus e Marte [a]

Componentes (em % molar) e características	Venus	Marte	Terra	Terra sem vida [c]
dióxido de carbono	96,5	9,5	0,035	98
nitrogênio	3,5	2,7	79	1,9
oxigênio	traços	0,13	21	traços
metano	traços	traços	$1,7 \times 10^{-4}$	traços
temperatura superficial/°C	459	-53	13	240 a 340
pressão superficial/bar	90	0,0064	1,0	60
$\Delta fG_m/kJ mol^{-1}$ [b]	-365	-376	-1,8	-377

[a] baseada no quadro 2 da ref. 1 e tabela 1 da ref. 3.

[b] Energia livre padrão molar de formação da atmosfera à temperatura superficial, calculada com dados da ref. 4.

[c] veja NOTA 2.

de Vênus e Marte (tab. 1, última coluna).

A manutenção da concentração de metano em 1,7 ppm na atmosfera terrestre, frente a presença de um poderoso oxidante como o oxigênio, só é possível frente a um aporte anual de cerca de 1×10^9 toneladas de metano^{1,7}. Do mesmo modo, são necessárias cerca de 2×10^9 toneladas de oxigênio a cada ano para repor aquela quantidade que foi consumida na oxidação deste mesmo metano^{1,7}. De acordo com Lovelock, este controle da composição química da atmosfera é feito por Gaia. Esta situação de alta energia livre ou de instabilidade termodinâmica da nossa atmosfera é consequência direta da vida que aí se instala. Neste caso, nossa atmosfera pode ser considerada como um reator de fluxo com agitação mantido em estado estacionário⁶, onde as concentrações permanecem constantes devido ao aporte de reagentes e retirada dos produtos. O tempo de residência do metano é estimado em 3,6 anos⁷.

Um outro aspecto importante sobre a composição química da atmosfera terrestre nestes últimos 4 bilhões de anos, especialmente quanto ao oxigênio, é abordada por Lovelock. Acredita-se que, antes do aparecimento da vida em nosso planeta, a concentração do oxigênio fosse da ordem de 10^{10} vezes menor do que os atuais 21%. Há aproximadamente 2 bilhões de anos, com o aparecimento das primeiras cianobactérias tolerantes ao oxigênio, este gás já compunha 0,2% da nossa atmosfera. Porém, nos últimos 400 milhões de anos a concentração de oxigênio tem se mantido constante nos seus 21%.

Interessantemente, é sabido que numa atmosfera contendo 15% de oxigênio não se pode queimar nem o mais seco dos carvões^{1,2}. Por outro lado, numa atmosfera contendo 25% de oxigênio, o fogo seria alimentado tão intensamente que, uma vez iniciado, até as úmidas florestas tropicais seriam transformadas em cinzas. Seria de responsabilidade de Gaia a manutenção dos teores de oxigênio da nossa atmosfera num valor médio entre a ausência do fogo (15%) e sua existência voraz e incontrolável a 25%?

A queima de combustíveis fósseis poderia alterar esta situação? Estima-se que o homem já queimou cerca de 1×10^{16} moles de carbono na forma de combustível fóssil, o que consumiu 2×10^{16} moles de oxigênio, ou seja, aproximadamente 0,05% das reservas (na atmosfera há $3,8 \times 10^{19}$ moles de oxigênio)⁷. Por outro lado a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera é $5,4 \times 10^{16}$ moles. Se este dióxido de carbono colocado pelo homem na atmosfera (os 1×10^{16} moles provenientes da queima do combustível fóssil) não tivesse sido retirado (pela fotossíntese, pela dissolução no oceano seguido de outras reações, pelo consumo no intemperismo das rochas) teríamos tido um acréscimo de 37% na concentração do mesmo^{1,2}. As consequências disto poderiam ser fatais para a vida

no planeta, porém até que ponto estes mecanismos de remoção do dióxido de carbono serão capazes de atuar eficientemente do ponto de vista cinético e termodinâmico?

Se Gaia é capaz de controlar a composição química da atmosfera, indiretamente também é capaz do controle da temperatura na superfície terrestre. Calcula-se que o Sol, há 4×10^9 anos, num comportamento tipicamente estelar, fosse pelo menos 30% menos luminoso do que o é atualmente². No entanto a Terra não era uma bola congelada como seria de se esperar, uma vez que apresentava água no estado líquido em sua superfície, fato este comprovado pela formação geológica de certas rochas sedimentares. A única maneira pela qual a Terra se manteria numa temperatura acima daquela prevista seria pela presença de "gases-estufa" [vide NOTA 3] em sua atmosfera, principalmente dióxido de carbono, amônia e metano (ver adiante o "planeta das margaridas").

E com o passar do tempo, tendo o sol se tornado cada vez mais luminoso e quente, porque a Terra não sofreu um processo de superaquecimento tornando o planeta inviável para suportar a vida? Lovelock argumenta que Gaia foi responsável por tal controle, fazendo com que grande parte do dióxido fosse assimilado nos oceanos pelos fitoplânctons, mantendo assim um mecanismo dinâmico de produção e assimilação deste gás-estufa na atmosfera e, conseqüentemente, o controle da temperatura.

É obvio que uma hipótese tão revolucionária como Gaia tenha despertado inúmeras discussões, angariado admiradores e críticos. Das críticas feitas, algumas, no dizer do próprio Lovelock, foram tremendamente importantes, pois permitiram dar um melhor embasamento teórico a Gaia. Dentre estas últimas destaca-se a crítica de diversos biólogos, dentre os quais S. Schneider, R. Londer, H. D. Holland, F. Doolittle, R. Dawkins, e outros, que argumentavam que se Gaia existir, não seria possível a evolução segundo uma *seleção natural*, como a atualmente aceita. A esta crítica Lovelock e Watson responderam com a engenhosa simulação em computador do "planeta das margaridas"^{2,8}.

O "planeta das margaridas" é essencialmente um planeta com condições físicas semelhantes às da Terra, em torno de uma estrela igual ao nosso Sol. Neste mundo imaginário as principais espécies de plantas são três margaridas: uma de cor escura (preta), outra de cor "neutra" (cinza) e outra de cor clara (branca). A estrela, como o Sol, tem a propriedade de se aquecer, aumentando sua luminosidade com o passar do tempo, característica de todas as estrelas neste período evolutivo. Neste modelo simplificado o ambiente é reduzido a uma única variável independente: a temperatura, e a biota a três espécies: as margaridas. Se está muito frio, abaixo de 5°C, as flores não crescem. Se está muito quente, acima de 40°C, elas murçam e morrem. A temperatura ideal para elas florescerem é 20°C. A temperatura média do planeta é determinada pelo balanço entre o calor recebido e o refletido, e este pelo albedo, ou seja, o tom dominante do planeta. Um planeta com tonalidade escura absorverá mais radiação (e refletirá menos), tornando-se portanto mais quente. Uma tonalidade mais clara, um planeta mais frio. Assim o resultado desta simulação produzirá os gráficos da Fig. 1.

O simples exame dos gráficos dispensa maiores comentários. A "seleção natural" das margaridas ocorre como uma necessidade para manter o planeta a uma temperatura ideal.

Outro crítico de Gaia é o físico e filósofo James Kirchner. A essência de sua crítica é a de que não existe uma hipótese Gaia, mas sim várias hipóteses Gaia: a coevolucionária, a homeostática, a teológica, a otimizadora e a influencial. A respeito desta aparente inconsistência a respeito de Gaia, Kirchner comenta: "Você pode acreditar, como eu acredito, que a biota afeta o ambiente físico. Você também pode pensar, como eu, que o ambiente físico modela a evolução biótica. Você está bem encaminhado porque os cientistas têm ensinado estes conceitos por mais de cem anos. Então, se você me pergunta

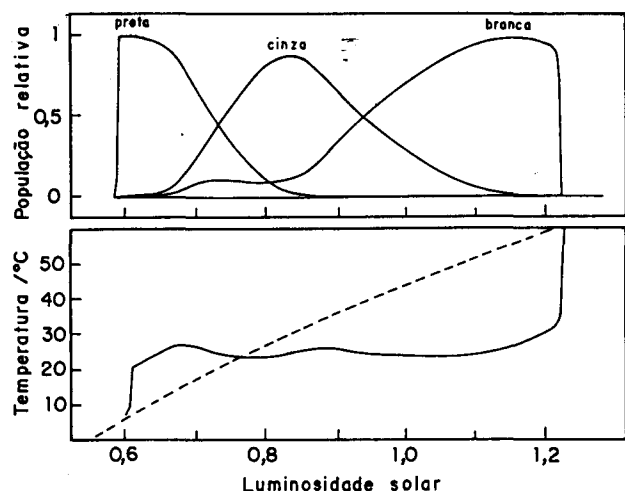


Figura 1 - Evolução do clima no "planeta das margaridas". O gráfico superior mostra as populações relativas das três espécies de margaridas (preta, cinza e branca) em função da luminosidade da estrela. O gráfico inferior mostra a temperatura média do "planeta das margaridas" (linha cheia) e a temperatura que o planeta teria se não tivesse vida (linha tracejada), ambas em função da luminosidade estelar. Adaptado da ref. 2.

se eu acredito na hipótese Gaia, e você quer dizer aquela hipótese Gaia, eu diria que sim. Mas se você disser que eu tenho que acreditar que a biota é parte de um controle global cibernético, com o propósito de criar condições biologicamente ótimas ... bem, isto é outro assunto".

Assim como Kirchner muitos outros têm criticado Gaia, não propriamente do ponto de vista científico, mas filosófico. Não vêem Gaia como uma hipótese que explica e propõe problemas - características de qualquer boa hipótese científica - mas como uma hipótese que se confirmada abalaria muitas convicções (para não falar de preconceitos) de caráter positivista ou mecanicista, como a acima de Kirchner. Esta visão mecanicista tem sido também bastante criticada por Prigogine⁹ e uma de suas afirmações é que a visão mecanicista não foi capaz de dar conta da Química e da Biologia.

Então, se Gaia é realmente uma boa hipótese, além dessas explicações, que problemas proporia ela? Um deles já está esboçado: se a biota é um sistema cibernético, onde estão e como funcionam estes mecanismos de auto-regulação? Em outras palavras, se a biota funciona como um organismo vivo, onde está seu "sistema nervoso", seu "sistema hormonal e feromonal"? O próprio Lovelock já chamou a atenção para isto num de seus trabalhos sobre a emissão de dimetilssulfeto pelo fitoplâncton e também pela emissão de halocarbonetos por estes organismos oceânicos^{2,10}. Estes compostos, presentes na atmosfera em concentrações muito baixas, seriam responsáveis pelo ciclo do enxofre e do halogênio do mar à terra e, no caso do dimetilssulfeto, controlar o clima, uma vez que este se oxidando a sulfato formaria um aerossol capaz de atuar como núcleo de condensação de nuvens.

Deve haver mais " hormônios". Achamos que vale a pena procurar.

Voltemos novamente às críticas. De fato, uma leitura mais atenta do último livro de Lovelock nos mostra alguns aspectos passíveis de discussão. Por exemplo, quanto ao surgimento de Gaia, o autor ora diz que "Gaia é tão velha quanto a vida", para alguns parágrafos mais tarde concluir: "Eu suspeito que a origem de Gaia foi separada da origem da vida. Gaia não acordou senão quando as bactérias já tinham colonizado parte de nosso planeta".

Mesmo frente a todas as críticas que uma hipótese tão inovadora como esta possa sofrer, um aspecto deve ser ressaltado: ela traz uma nova visão envolvendo os componentes or-

gânicos e inorgânicos do nosso planeta, uma visão holística que certamente deverá cristalizar-se neste novo ramo da Ciência denominado de Geofisiologia.

Finalmente, chega-se à questão fundamental referente à atuação de Gaia: estaria o nosso planeta provido de um mecanismo de retro-alimentação negativa capaz de minimizar ou mesmo neutralizar toda a poluição causada pelo homem? Será que as nossas indústrias e nossas cidades irão aceitar (e explorar) plenamente a existência de Gaia e, assim o fazendo, deixariam de investir no tratamento de efluentes bem como na minimização e no descarte adequado de inúmeros poluentes notadamente perniciosos ao homem?

Sob este prisma, Gaia não parece ter nenhuma preferência pelo ser humano sobre qualquer outro tipo de vida existente em nosso planeta. Gaia não poderia manter a homeostase da biosfera caso um dos seus componentes, no caso o homem, colocasse em risco todos os demais entes deste complexo sistema. Assim sendo, o homem certamente deixaria de ser uma das formas de vida da superfície do planeta Terra para manter Gaia num estado não ameaçado.

No entanto, independentemente da escolha de Gaia sobre o destino humano num planeta futuramente poluído, principalmente por uma população de 8,5 bilhões de seres humanos no ano 2025, o bom senso nos mostra que a atitude mais sábia e coerente é a prevenção. E esta prevenção está hoje centrada não em hipóteses, mas em fatos concretos tais como uma legislação ambiental madura e eficaz, legislação essa que o Brasil, bem como os demais países, ainda estão longe de exercitar.

NOTA 1

A Segunda Lei da Termodinâmica pode ser enunciada de várias formas. Uma delas diz que "num sistema fechado as transformações ocorrem no sentido de aumentar a entropia do mesmo". Outra maneira de dizer isto é: "nos estados de equilíbrio de um sistema fechado a entropia é sempre um máximo". No entanto é mais conveniente se utilizar de enunciados em termos de energia livre de Gibbs, G, ou simplesmente energia livre, uma vez que simplifica tremendamente os cálculos. Então a segunda lei pode ser assim enunciada: "em sistemas isolados, a pressão e temperatura constantes, as transformações ocorrem no sentido de diminuir a energia livre". Ou também: "num sistema isolado, a pressão e temperatura constantes, os estados de equilíbrio mais estáveis são os de energia livre mais baixa". O leitor mais interessado nos detalhes poderá consultar as referências 11,12. Um exemplo para ilustrar:

sistema no estado 1: um mol de hidrogênio mais meio mol de oxigênio, ambos gases a uma pressão total de um bar e temperatura de 298 K. Energia livre do sistema = G₁.

sistema no estado 2: um mol de água a uma pressão total de um bar e temperatura de 298 K. Energia livre do sistema = G₂. Então G₁ - G₂ = ΔG = -237 kJ/mol. Se se convencionar que G₁ = 0 kJ/mol, então G₂ = -237 kJ/mol.

NOTA 2

Para a "Terra-sem-vida" (veja também a ref. 5), considere-se que todo o carbono da crosta terrestre, estimado em 7,2 x 10²¹ moles⁷, fosse transformado em dióxido de carbono, permanecendo na atmosfera, e que todo nitrogênio da atmosfera fosse transformado em nitrato, permanecendo no oceano. O oxigênio necessário para reagir com o carbono e o nitrogênio proviria da atmosfera e da fotodecomposição solar do vapor d'água. A pressão atmosférica, p, é calculada pela expressão p = mg/s, sendo m = massa da atmosfera = massa de dióxido de carbono = 3,2 x 10²⁰ kg, g = aceleração gravitacional = 9,8 m s⁻² e s = área da superfície da Terra = 5,1 x 10¹⁴ m².

Os valores de fG_m das atmosferas de Vênus, Marte e Ter-

ra-sem-vida são praticamente os valores da energia livre padrão molar do dióxido de carbono, ou seja:

$C(s) + O_2(g) = CO_2(g)$; $\Delta_f G_m(1 \text{ bar}, 298 \text{ K}) = -394,4 \text{ kJ/mol}$ que foram multiplicados pelas respectivas frações molares e corrigidos para as temperaturas das correspondentes atmosferas planetárias. No caso da nossa atmosfera, além da correção para a temperatura média (296 K)¹, levou-se em conta também a energia livre de mistura, no caso $\Delta_{\text{mix}} G = -T\Delta_{\text{mix}} S = R \sum_B x_B \ln x_B$ (T = temperatura, S = entropia, Δ_{mix} = operador "formação de mistura", R = constante dos gases, x_B = fração molar do componente B), que no caso não é desprezível.

A temperatura atmosférica da Terra-sem-vida foi estimada com base no fluxo de radiação refletido atual (albedo), alterando-se os valores da absorvidade de radiação infra-vermelha de uma atmosfera de nitrogênio e oxigênio para uma atmosfera de dióxido de carbono (veja NOTA 3), e na curva de pressão de vapor de água. A pressão de 60 bar a atmosfera iria se aquecer até que o oceano atingisse a temperatura de equilíbrio líquido-vapor, permanecendo então estável dentro de uma certa faixa¹³.

NOTA 3

O termo "gás-estufa" provém do chamado "efeito estufa" existente em atmosferas planetárias. A radiação solar, predominantemente luz visível, atravessa a atmosfera sem ser absorvida. Ao incidir sobre a superfície, parte é absorvida e parte é refletida (albedo). A fração refletida é mais rica em infravermelho e pode ser então absorvida pela atmosfera. Atmosferas onde predominam gases como O_2 , N_2 e Ar, absorvem pouco desta radiação, que é dissipada no espaço. No caso de atmosferas com larga fração de gases como CO_2 , H_2O , NH_4 , que já absorvem significativamente no infra-vermelho, ocorre então o efeito estufa: a radiação infra-vermelha absorvida (que excita os movimentos roto-vibracionais das moléculas) é dissipada na forma de energia térmica (energia molecular translacional), a qual se traduz por um aumento da temperatura da atmosfera. Daí então o nome de "gases-estufa" para o CO_2 , H_2O , NH_3 , CH_4 e outros. Como estes gases tem

uma capacidade calorífica molar maior que o O_2 , N_2 e Ar, a atmosfera funciona como um "reservatório de calor", como os oceanos, contribuindo para uniformizar a temperatura com relação às alternâncias do dia e da noite.

REFERÊNCIAS

1. Lovelock, J.E.; "Gaia - A new look at life on Earth"; Oxford University Press, Oxford (1979 and 1987). Ed. portuguesa "Gaia - Um novo olhar sobre a vida na Terra", trad. M.G. Segurado, Edições 70, Lisboa (1989).
2. Lovelock, J.E.; "The ages of Gaia"; W.W. Norton & Company, N. York (1988). Ed. portuguesa "As eras de Gaia", trad. L. Rodrigues, Publicações Europa-América, Lisboa (1989).
3. Margulis, L.; Lovelock, J.E.; *Icarus* (1974) **21**, 471.
4. Wagman, D.D. et alii; "The NBS tables of chemical thermodynamic properties"; *J. Phys Chem. Reference Data*, (1982) **11**, supplement N° 2.
5. Lovelock, J.E.; *Proc. R. Soc. Lond.* (1975) **189**, 167.
6. Moore, W.J.; "Físico Química" (trad. da 4a. ed. americana, 1972) Ed. Edgard Blücher e EDUSP (1976).
7. Garrels, R.M.; Mackenzie, F.T.; Hunt, C.; "Chemical cycles and the global environment"; William Kaufmann, Los Altos, CA (1975).
8. Watson, A. J.; Lovelock, J.E.; *Tellus* (1983) **35B**, 284.
9. Prigogine, I.; Stengers, I.; "A Nova Aliança - a metamorfose da Ciência (1984)"; trad. M. Faria e M.J.M. Trincheira; Ed. Univ. de Brasília, Brasília (s/ data).
10. Charlson, R.J.; Lovelock, J.E.; Andreae, M.O.; Warren, S.G.; *Nature*, (1987) **326**, 655.
11. Atkins, P.W.; "Physical Chemistry"; Oxford University Press, Oxford (1986).
12. McGlashan, M.L.; "Chemical Thermodynamics"; Academic Press, London, (1979).
13. Goody, R.M.; Walker, J.C.G.; "Atmosferas Planetárias (1972)"; trad. A. Christofolletti; Ed. Edgard Blücher, São Paulo (1982).

Publicação financiada pela FAPESP