

A TERRA É AZUL!

Ricardo Moreira Chaloub

exclamou Iuri Gagarin, cosmonauta russo e primeiro ser humano a ir ao espaço, em 12 de abril de 1961.

E por que azul? Porque as moléculas presentes em nossa atmosfera, em particular o oxigênio (O_2) e o nitrogênio (N_2) por serem menores, são mais eficientes em espalhar a radiação com o menor comprimento de onda. Como na região espectral do visível as radiações de menor comprimento de onda são o azul e violeta, o espalhamento seletivo promovido pelas moléculas do ar é responsável pela cor azul do céu. Entretanto, a atmosfera primitiva da terra era bem distinta da atual, sendo constituída principalmente por N_2 , gás carbônico (CO_2), vapor d'água e monóxido de carbono (CO) em quantidades significativas, contendo pouquíssimo O_2 em decorrência da decomposição do vapor d'água pela radiação ultravioleta (1). Estima-se que a terra tenha sido habitada há 3,8 bilhões de anos e que sua aparência tenha se modificado com o passar do tempo em virtude, entre outros fatores, da modificação das formas de vida presentes. Em anaerobiose, a matéria orgânica é fermentada a CO_2 , hidrogênio (H_2), etanol (C_2H_6O) etc, por vários microrganismos, sendo a reposição da matéria orgânica no ambiente desempenhada por organismos fotossintéticos, ou seja, organismos que utilizam a luz solar como fonte de energia para promover a redução e/ou incorporação de nutrientes inorgânicos, como CO_2 , N_2 , nitrato (NO_3^-) nitrito (NO_2^-), íons amônia (NH_4^+) e sulfato (SO_4^{2-}) em compostos orgânicos, como glicídeos, lipídeos e proteínas. Esta função era desempenhada por bactérias fotossintéticas, majoritariamente bactérias púrpuras, que habitavam ambientes aquáticos e terrestres há cerca de 3 bilhões de anos. Ou seja, naquela época a terra era púrpura!! (2).

Há 2,7 bilhões de anos, organismos fotossintéticos denominados cianobactérias ou algas verde-azuladas, desenvolveram a capacidade de utilizar a água (H_2O) como fonte de elétrons para reduzir os nutrientes inorgânicos e fixar o CO_2 . Esta fonte “inesgotável, barata e acessível” de elétrons para o processo de fixação fotossintética do carbono resultou na formação de um subproduto, o oxigênio molecular, que mudou a história da vida na terra. Em comparação com as outras bactérias fotossintetizantes, que utilizavam gás sulfídrico (H_2S) ou outros compostos inorgânicos, ou mesmo traços de compostos orgânicos como fonte de elétrons, a fotossíntese oxigênica resultante da utilização da água proporcionou uma grande vantagem competitiva às cianobactérias que prosperaram e colonizaram grandes extensões do planeta, promovendo a oxidação progressiva da superfície da terra. Uma das consequências desse processo, por exemplo, foi a formação de depósitos minerais ricos em ferro, denominados *red beds*, compostos por partículas revestidas com óxido de ferro, principalmente

a hematita (Fe_2O_3). Como o elemento ferro (Fe), indispensável para a realização de várias atividades biológicas, é solúvel em meio aquoso e biodisponibilizado quando se encontra na sua forma reduzida, ou seja, como Fe^{2+} , sua exposição ao oxigênio promoveu a oxidação de grande parte do ferro dissolvido em meio aquoso a Fe^{3+} , bem menos solúvel, resultando em restrições “nutricionais” ao desenvolvimento da vida. Além disso, o aumento dos níveis de O_2 , inicialmente na atmosfera e posteriormente no meio aquoso, resultou na necessidade de adaptação dos organismos para sobreviver na presença deste “poluente”. A acumulação atmosférica de O_2 permitiu o aparecimento da vida aeróbia, bem como na formação de uma camada de ozônio necessária para proteger a vida terrestre da radiação ultravioleta. A disponibilidade de quantidades crescentes de O_2 propiciou a possibilidade de utilização de um novo e melhor aceptor terminal de elétrons, visto que a respiração oxidativa proporciona muito mais energia do que a fermentação ou a utilização de outros aceptores de elétrons, promovendo uma grande diversificação dos organismos que não continham organelas, ou seja, os procariotas heterotróficos. Entretanto, a pressão seletiva resultou em eventos simbióticos de um desses procariotas dando origem às atuais mitocôndrias (3).

A evolução dos organismos eucariotas fotossintéticos é uma história de endossimbioses (figura 1). A fotossíntese oxigênica parece ter surgido apenas uma vez e uma série de evidências sugerem que uma única endossimbiose primária deu origem ao primeiro eucariota fotossintético (4). A diversificação subsequente resultou em três grupos de microalgas contendo plastídeos (cloroplastos) decorrentes do evento primário: as algas verdes (clorófitas), as vermelhas (rodófitas) e as glaucófitas, que diferentemente das outras contêm cianelas (plastídeos que retêm características típicas das cianobactérias). Posteriormente, quatro outros grupos (heterocontófitas, haptófitas, criptófitas e dinófitas) contendo microalgas douradas, marrons, pardas, vermelhas, azuladas e de coloração mista vieram a ser formados como resultado de endossimbioses secundárias, onde eucariotas não fotossintéticos adquiriram uma alga vermelha como endossimbionte (5). Assim, o planeta púrpura que havia sido “tingido de azul” pelas cianobactérias foi sendo progressivamente colorido pelo aparecimento dos diferentes grupos de microalgas, da mesma forma que a fase azul (1901-1904) de Pablo Picasso deu lugar, entre 1905-1907, ao *fauvismo* policromático de Henri Matisse.

A utilização da luz solar requer a presença de pigmentos fotorreceptores (*clorofila-a* e pigmentos acessórios) que, em associação com proteínas, formam os complexos coletores de luz ou complexos antena (figura 2). A energia absorvida é transferida (na forma de excitações) entre os pigmentos fotorreceptores destes complexos, até finalmente fluir para moléculas fotoativas de *clorofila-a* que se encontram num microambiente especial, denominado centro de reação. Neste local ocorrem as reações fotoquímicas da fotossíntese, que envolvem separação de cargas e transferência de elétrons. Na medida em que os pigmentos acessórios (carotenoides, bilinas e os outros tipos de *clorofila*) complementam o espectro de absorção de luz da *clorofila-a* na região do visível, observa-se uma variação qualitativa e quantitativa desses compostos, tanto em

Figura 1 – Evolução do fitoplâncton eucariótico

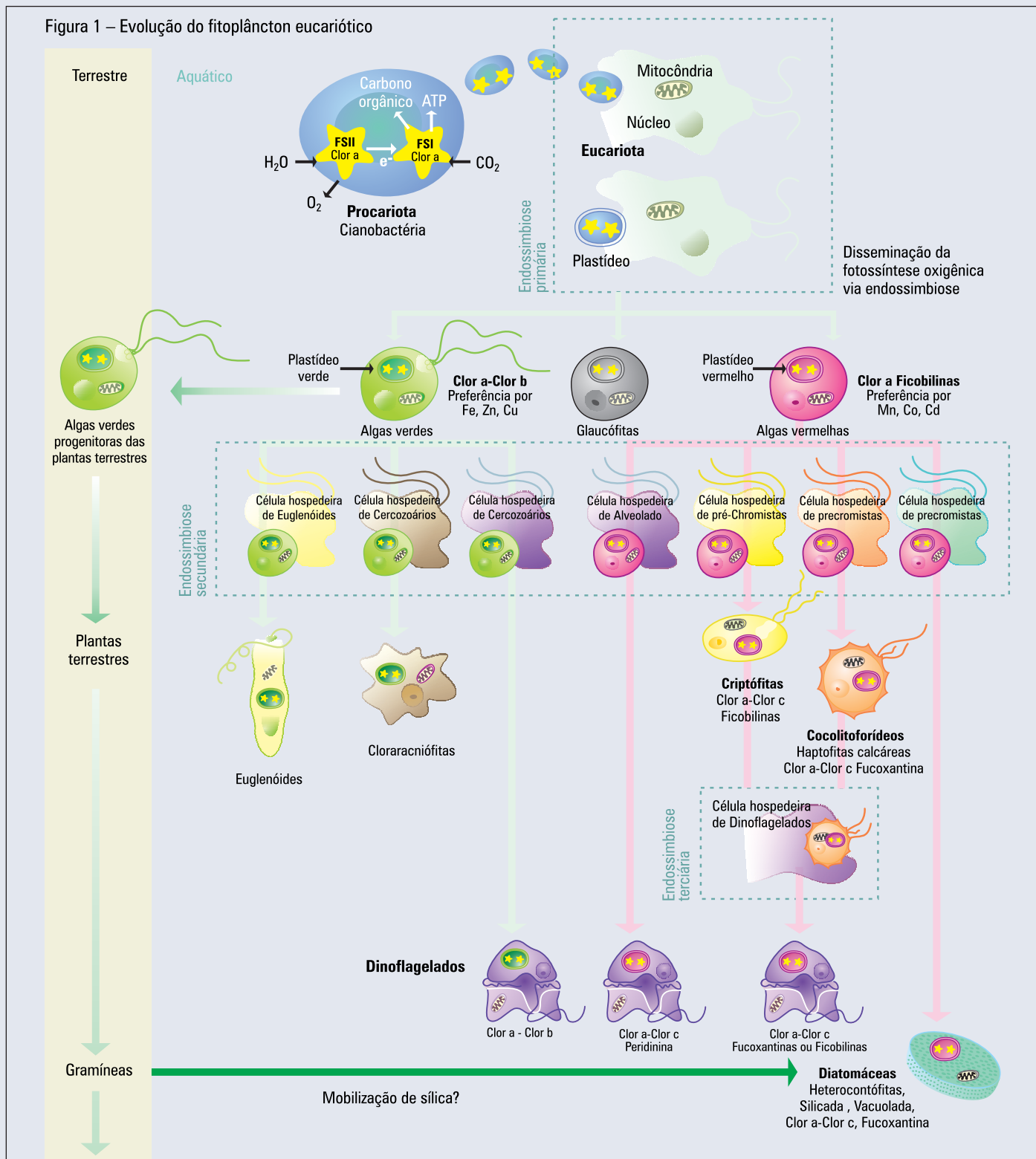


Figura 1: Evolução do fitoplâncton eucariótico (Falkowski, Paul G. e col., *Science* 305: 354-360, 2004). Modelo básico da herança de plastídeos em eucariotos fitoplanctônicos

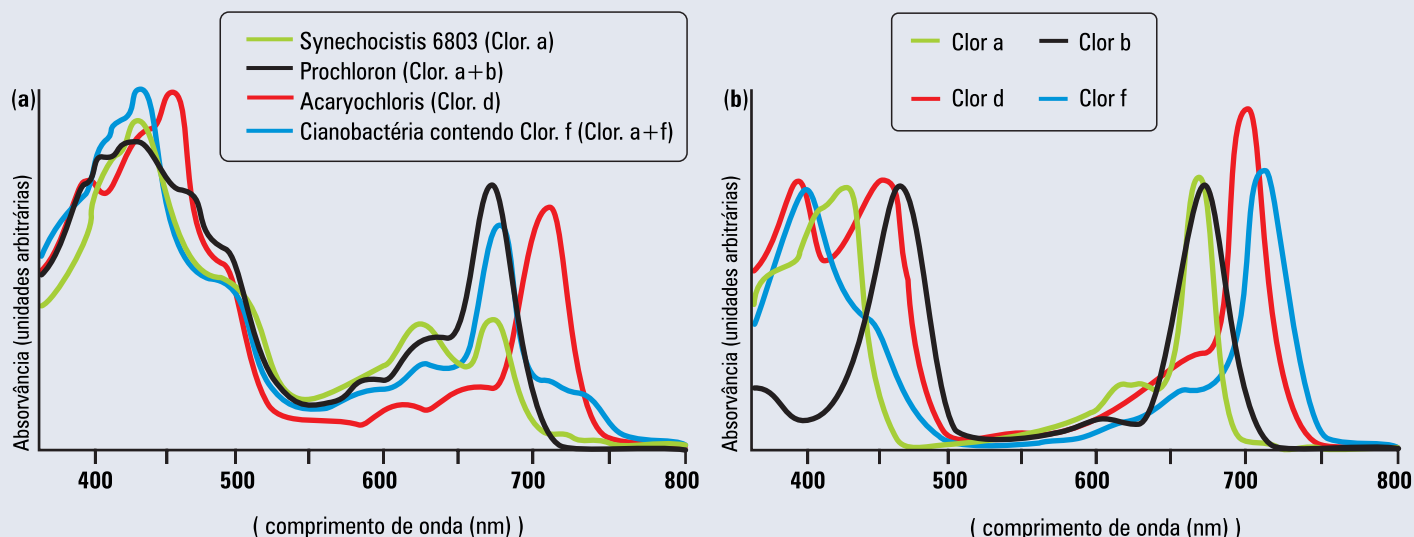


Figura 2: Espectros de absorção de microalgas e de clorofilas - (a) Espectros de absorção *in vivo* da microalga *Prochloron*, das cianobactérias *Synechocystis* PCC6803 (no.6803 da Coleção de Culturas do Instituto Pasteur, França), *Acaryochloris marina* e da cianobactéria recentemente descoberta que possui clorofila *f*. (b) Espectros de absorção das clorofilas *a*, *b*, *d* e *f* em metanol, normalizados na região do azul (bandas de Soret; entre 400-500nm)

função do grupo de microalgas quanto do nicho ecológico em que se encontram. Por exemplo, a intensidade de luz e a distribuição espectral da radiação luminosa são bastante distintas em diferentes posições na coluna d'água, bem como quando comparamos um ambiente aquático oligotrófico com uma região estuarina, que contém muitas partículas e matéria orgânica em suspensão. Assim, a composição pigmentar é naturalmente modulada por esses fatores, resultando numa atenuação ou intensificação da coloração da microalga. Caso extremo pode ser observado em algumas espécies de cianobactérias capazes de apresentar adaptação cromática complementar, ou seja, de se apresentar com coloração esverdeada quando expostas à luz mais avermelhada ou se tornar avermelhadas quando a luz incidente é verde (6).

A *clorofila-a* é o fotopigmento mais difundido na natureza e os outros tipos de *clorofila* apresentam variações nas cadeias laterais e/ou no estado de redução. Substituições nas cadeias laterais por grupos formila (CHO) resultam em diferentes propriedades de absorção de luz pela *clorofila-b*, *clorofila-d* e *clorofila-f*, sendo a *clorofila-d* o único pigmento que pode substituir todas as funções que a *clorofila-a* desempenha na fotossíntese oxigênica. Esses derivados formila exibem diferentes mudanças espectrais de acordo com a posição da substituição. A presença de vários tipos de clorofila permite ao organismo captar luz em diferentes comprimentos de onda, aumentando a quantidade de luz absorvida. Por exemplo, as *clorofilas d* e *f* ao expandirem a região espectral de absorção da *clorofila-a* de 400-700 para 400-750nm aumentam em 19% a quantidade de fótons disponíveis para a fotossíntese (7). Cabe mencionar que a composição de pigmentos dos organismos fotossintéticos oxigênicos também reflete as propriedades espectrais da superfície da terra, sendo que a luz e a concentração de oxigênio são os principais fatores ambientais que resultam em diferentes tipos de clorofila.

A utilização da energia luminosa na presença de oxigênio molecular pode propiciar a formação de uma espécie reativa de oxigênio, o oxigênio singlete ($^1O_2^*$), em decorrência da transferência de energia de estados excitados da clorofila. Adicionalmente, a ocorrência de reações de oxirredução na presença de oxigênio pode promover a formação de outras espécies reativas de oxigênio altamente deletérias, como o superóxido (O_2^-) e o peróxido (O_2^{2-}), capazes de interagir com pigmentos, proteínas, lipídeos e ácidos nucleicos (8). Um dos principais mecanismos de prevenção a esse tipo de dano envolve em vegetais superiores e nos grupos constituídos por algas verdes, algas pardas e dinoflagelados a presença de carotenoides capazes de absorver e dissipar na forma de calor o excesso de energia de excitação das clorofilas. A iluminação excessiva que incide nos lagos salgados do deserto de Atacama (norte do Chile) e do altiplano boliviano promove o aparecimento de uma coloração vermelha da *Dunaliella salina*, que é uma microalga verde (clorófito), devido ao acúmulo acentuado de um carotenoide fotoprotetor e antioxidante: β -caroteno. A transferência do β -caroteno através da cadeia trófica resulta, para nosso deleite, na coloração rósea da plumagem dos flamingos.

O azul, cor da terra, parece representar um marco no desenvolvimento da vida em nosso planeta. Em 1810, Johann Wolfgang von Goethe desenvolveu uma Teoria das Cores, dividindo o espectro do visível em tons positivos e negativos: “as cores do lado positivo são o amarelo, o vermelho-amarelado (laranja) e o amarelo-avermelhado (cinábrio), despertando sensações rápidas, vivazes e inspiradoras. As cores do lado negativo são o azul, o vermelho-azulado e o azul-avermelhado. Elas produzem uma impressão de inquietude, de ansiedade. Assim como o amarelo é sempre acompanhado da luz, pode-se dizer que o azul traz consigo



Figura 3: O velho guitarrista de Pablo Picasso (1903)
Óleo sobre tela. The Art Institute, Chicago (EUA)

um princípio de escuridão”. Além da fase azul de Picasso, vários pintores reverenciaram esta cor contraditória entre excitação e repouso, como por exemplo o movimento “Der Blaue Reiter” (“O cavaleiro azul”) desencadeado por Wassily Kandinsky em conjunto com pintores alemães e russos (1911-1914) e, entre nós, João Cândido Portinari, o pintor dos azuis, durante a década de 1940. Entretanto, nenhum artista seria mais identificado com esta cor do que Yves Klein, que criou obras compostas somente por uma cor profunda e vibrante que ele inventou e batizou de International Klein Blue (IKB): “o azul exerce sua atração não porque entra em nós, mas porque nos absorve. Atribui-se à ação de pintar uma ligação com o sagrado e/ou com a magia. Enquanto no primeiro caso a pintura seria um meio comunicação com o sobrenatural com o intuito de encontrar explicações para a vida, no segundo a pintura exerceria um domínio e poder sobre o representado, como por exemplo os animais e os homens pintados nas cavernas. Deve haver um significado mais profundo para o fato de que o primeiro pigmento inorgânico sintético produzido pelo homem, preparado 3.000 anos a.C. no Egito, foi o *azul do Egito*, enquanto que na mesma época era produzido pelos chineses o *azul de Han* ou *azul da China*. Cabe mencionar que no início do século XVIII foi sintetizado o primeiro pigmento sintético moderno, o *azul da Prússia*.

Há muito que o azul ilumina o mundo de diferentes maneiras. A relação entre cor e som vem da Grécia antiga, quando se utilizava o termo cromático para se referir à escala musical. Recentemente, no início do século XX, uma grande variedade de tradições musicais tomou corpo entre a população negra na América do Norte, resultando num estilo musical melancólico denominado *blues*: canções de lamento, usualmente relacionadas com condições sociais precárias ou com amores perdidos. Reiterando o marco evolutivo do nosso planeta representado pelas algas verde-azuladas, uma atmosfera lenta, sedutora, sombria e meditativa foi introduzida em agosto de 1959 por Miles Davis através de um dos mais influentes álbuns de jazz: *Kind of blue* (Columbia Records), que contou com a participação de músicos excepcionais, como John Coltrane, Julian “Cannonball” Adderley, Bill Evans, Wynton Kelly, Paul Chambers e Jimmy Cobb. Este álbum, ao fundir com a música tonal elementos da música modal que dotam a esse tipo de música características hipnóticas adequadas a cerimônias ritualísticas, constituiu um marco para o desenvolvimento da música moderna. “Ao combinar um conteúdo complexo com uma atmosfera forte e inebriante, cria um ambiente contemplativo onde a nossa conflituada alma pode talvez encontrar algum repouso” (9).

Ricardo Moreira Chaloub é professor associado do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IQ-UFRJ), líder do grupo de pesquisa do Laboratório de Estudos Aplicados em Fotossíntese (Leaf).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kasting, J. F. “Earth’s early atmosphere”, *Science*, vol. 259, pp.920-926, 1993.
2. Sanromá, E.; Pallé, E.; Parenteau, M.N.; Kiang, N.Y.; Gutiérrez-Navarro, A.M.; López, R.; Montañés-Rodríguez, P. “Characterizing the purple earth: Modeling the globally integrated spectral variability of the Archean Earth”, *Astrophys. J.*, vol.780, pp.52-62, 2014.
3. Sagan, L. “On the origin of mitosing cells”, *J. Theoret. Biol.* vol.14, pp.255-274, 1967. Lynn Sagan foi casada com Carl Sagan (divulgador científico norte-americano), tendo posteriormente adotado o nome de Lynn Margulis, que aparece na maioria das referências científicas desta pesquisadora responsável pela teoria da endossimbiose.
4. Palmer, J. D. “The symbiotic birth and spread of plastids: How many times and whodunit?”, *J. Phycol.*, vol.39, pp.4-12, 2003.
5. Gibbs, S. P. “The chloroplasts of some algal groups may have evolved from endosymbiotic eukaryotic algae”, *Ann. NY Acad. Sci.*, vol.361, pp.193-208, 1981.
6. Tandeu De Marsac N.. “Occurrence and nature of chromatic adaptation in cyanobacteria”, *J. Bacteriol.*, vol.130, pp.82-9, 1977.
7. Chen M. & Blankenship, R. E. “Expanding the solar spectrum used by photosynthesis”, *Trends in Plant Sc.*, vol.16, pp.427-431, 2011.
8. Asada, K. “Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions”, *Plant Physiol.*, vol.141, pp.391-396, 2006.
9. Williams, R. “Kind of blue - Miles Davis e o álbum que reinventou a música moderna”, Casa da Palavra, Rio de Janeiro, 286p. 2011.