

REDISCUINDO O PAPEL DOS ECOSISTEMAS TERRESTRES NO SEQÜESTRO DE CARBONO¹

Renato Roscoe²

RESUMO

À luz das crescentes evidências do caráter antrópico de significativa parcela das mudanças climáticas globais observadas nos últimos 200 anos, a comunidade científica vem buscando entender os processos que levam ao aquecimento global. O seqüestro de carbono nos ambientes terrestres vem sendo apontado como uma alternativa mitigadora das mudanças climáticas, sendo contemplada em acordos internacionais como o Protocolo de Kyoto. As análises sobre os potenciais de seqüestro pelos ambientes terrestres, em sua maioria, têm sido feitas de forma pontual e segmentada, não sendo comum uma análise mais abrangente dos processos envolvidos no ciclo biogeoquímico dos gases de efeito estufa. Com o objetivo de se ampliar a discussão sobre o assunto, faz-se uma análise mais profunda sobre o papel dos ecossistemas terrestres no balanço de CO₂ (principal gás de efeito estufa) na atmosfera, enfatizando as potencialidades e limitações de atividades mitigadoras relacionadas às mudanças no uso da terra, no âmbito do Protocolo de Kyoto. Conclui-se que a fixação de carbono nos ecossistemas terrestres seria ineficiente e inócua para mitigar os problemas causados pelo acúmulo de CO₂ na atmosfera, caso sejam mantidos os atuais padrões de consumo de combustíveis fósseis. Considerações sobre os processos envolvidos e implicações para as políticas públicas são apresentadas, destacando-se a necessidade de busca por fontes renováveis de energia.

Palavras-chave: seqüestro de carbono, mudanças climáticas globais, Protocolo de Kyoto, ciclo do carbono.

REVIEWING THE ROLE OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS ON THE CARBON SEQUESTRATION

ABSTRACT

In the light of increasing evidences that a large part of global climate change in the last 200 years originates from human activities, the scientific community has been intensifying the research effort on understanding global warming processes. Carbon sequestration has been appointed as a alternative to mitigate carbon dioxide emissions, being considered in international agreements as the Kyoto Protocol. The analyses of the terrestrial ecosystem potential of carbon sequestration are largely punctual and fragmented. Integrated analyses, discussing processes involved in the biogeochemical cycle of green house gases, are scarce in the literature. Aiming at expanding the

¹ Aceito para publicação em abril de 2003.

² Engenheiro agrônomo, Ph.D. em Ciências Ambientais, pesquisador da Embrapa Agropecuária Oeste, BR 163, Km 253,6, CEP 79 804-970, Dourados, MS. E-mail: roscoe@cpao.embrapa.br

discussion on the subject, a deep analysis was made of the terrestrial ecosystem role on CO₂ (the major green house gas) balance in the atmosphere was made, emphasising the potentialities and limitations of mitigating activities related to land use changes, in the Kyoto Protocol scope. The evidences led to the conclusion that, if the present patterns of fossil fuel consumption was maintained, carbon fixation in terrestrial ecosystems would be inefficient and innocuous to mitigate problems caused by CO₂ accumulation in the atmosphere. Some considerations on processes involved and implications for policy makers are presented, emphasising the necessity of constant search for renewable energy sources.

Key-words: Carbon sequestration, climate change, Kyoto Protocol, carbon cycle, global warming.

INTRODUÇÃO

“Existem novas e fortes evidências de que a maior parte do aquecimento (global) observado nos últimos 50 anos são decorrentes da atividade humana”, conclui o relatório do Grupo de Trabalho I do “Intergovernmental Panel on Climate Change” (Watson et al., 2001). Os crescentes aumentos nas emissões antropogênicas de gases causadores de efeito estufa (GEE) têm elevado os seus teores na atmosfera a níveis sem precedentes na história da humanidade. A concentração de CO₂ na atmosfera, por exemplo, aumentou 31% nos últimos 250 anos, alcançando os atuais 366 ppm, mais alto nível observado “quase certamente”³ nos últimos 420 mil anos ou “provavelmente” nos últimos 20 milhões de anos (Watson et al., 2001).

O acúmulo de evidências científicas, durante os anos 80, de que as atividades humanas estariam interferindo no clima do Planeta levou, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), 155 países participantes a assinarem o primeiro acordo internacional (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) em busca de um controle da influência antropogênica sobre o clima. A UNFCCC estabeleceu as primeiras medidas de controle das emissões de gases causadores de efeito estufa (GEE) e também o fórum de debate, onde tais medidas de controle deveriam ser discutidas, as chamadas Conferências das Partes (Conference of

³ A probabilidade de ocorrência de determinado evento é definida pelo relatório como quase certa (acima de 99% de chance), muito provável (entre 90% - 99% de chance), provável (66% - 90% de chance), pouco provável (33% - 66% de chance), improvável (10% - 33% de chance), muito improvável (1% - 10% de chance) e excepcionalmente improvável (menos de 1% de chance) (Watson et al., 2001).

the Parties – COP). Em 1997, na terceira COP, após intensas negociações, foi elaborado o primeiro tratado internacional para a redução nas emissões de GEE, o chamado Protocolo de Kyoto (<http://www.unfccc.int/resorce/docs/convkp/kpeng.html>). Neste, as nações industrializadas (chamadas de países do Anexo I da UNFCCC) comprometiam-se a reduzir as emissões de GEE em 5% com relação aos níveis de 1990, no período entre 2008-2012. Embora o Protocolo tenha sido assinado por 84 países, ainda não foi ratificado por todos. O maior impedimento encontra-se na recusa dos Estados Unidos (responsável por cerca de um quarto de todas as emissões de combustíveis fósseis no mundo) ao texto. O Brasil ratificou o Protocolo, em 2002, assim como importantes membros do Anexo I, como União Européia e Japão.

Para o cumprimento das metas de corte em emissões assumidas pelos países do Anexo I, faz-se necessária uma mudança significativa em sua matriz energética, substituindo fontes fósseis por renováveis. Tal mudança será dispendiosa e exige tempo. Por essa razão, o Protocolo de Kyoto, em seus artigos 3.3 e 3.4, estabelece que as quantidades de GEE re-fixados nos ecossistemas terrestres durante o período proposto para redução das emissões poderão ser abatidas dos compromissos assumidos. Mudanças no uso da terra e manejo de atividades florestais (“land use, land-use change and forestry activities” – LULUCF), que levem à retirada dos GEE da atmosfera, podem ser contabilizados e descontados dos cortes em emissões. Existe, ainda, a possibilidade de negociação entre países de cotas de emissões (créditos de carbono).

Nesse contexto, a busca de alternativas de manejo associadas com a manutenção e seqüestro de carbono em ambientes terrestres tem sido o objetivo de vários pesquisadores em ciências ambientais, em especial, na Ciência do Solo. Grande atenção tem sido dada aos solos, pois estes armazenam quatro vezes mais carbono que a biomassa vegetal. Entretanto, muito pouco se tem discutido sobre o ciclo biogeoquímico desses gases, ressaltando os processos na pedosfera e os inerentes limites para estratégias mitigadoras (Sarmiento, 1998).

Buscou-se exatamente iniciar uma discussão mais profunda sobre o papel dos ecossistemas terrestres no balanço de CO₂ na atmosfera, enfatizando as potencialidades e limitações de atividades mitigadoras relacionadas às mudanças no uso da terra, no âmbito do Protocolo de Kyoto. Discutiu-se somente o gás carbônico por ser o ele responsável pela maior parte dos distúrbios antropogênicos e por ser o cerne das discussões no referido protocolo.

O CICLO BIOGEOQUÍMICO DO CO₂

A concentração de CO₂ na atmosfera é a resultante do balanço entre fontes e sumidouros nos ecossistemas terrestres, nos oceanos e na litosfera (Fig. 1). As rochas sedimentares representam o maior reservatório de carbono no Planeta, sendo estimado em 66 bilhões de gigatons de C (German Bundestag, 1989). As trocas entre a atmosfera e esse imenso reservatório ocorrem lentamente, com taxas anuais extremamente baixas. Uma vez na atmosfera, o CO₂

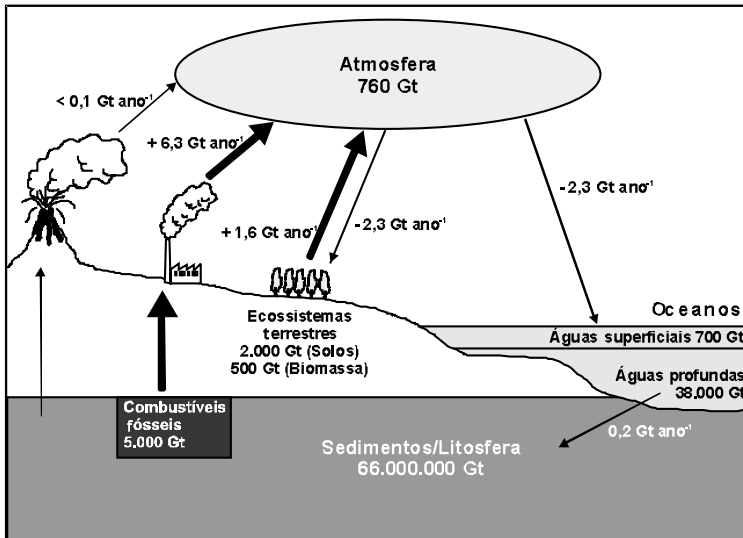


Fig. 1. Ciclo biogeoquímico do carbono: o C flui entre a atmosfera, oceanos, sedimentos e ecossistemas terrestres (biomassa + solo). Em seu ciclo geoquímico, as moléculas de CO₂ da atmosfera são dissolvidas nos oceanos na forma de carbonatos e são lentamente depositadas como sedimentos, retornando naturalmente à atmosfera somente com a movimentação de placas tectônicas, no processo de subdução, levando um tempo médio de 400 milhões de anos. O C atmosférico pode ainda ser absorvido por plantas e algas pela fotossíntese, entrando no ciclo biológico do C, no qual o tempo de ciclagem é bem menor (100-1.000 anos). As setas mais espessas representam os fluxos criados pelo homem, pela mudança no uso da terra e pela queima de combustíveis fósseis. Valores em Gt (bilhões de toneladas) representam os tamanhos dos reservatórios de C e, em Gt ano⁻¹, os fluxos anuais na década de 90 (Watson et al., 2001).

pode ser incorporado aos ecossistemas terrestres, principalmente pela fotossíntese⁴, e aos oceanos, pela fotossíntese e dissolução na forma de carbonatos (Schlesinger, 1997; Wigley & Schimel, 2000). Nos ecossistemas terrestres, o CO₂ fixado pela vegetação é parcialmente consumido pela respiração dos próprios autotróficos e entra como a fonte básica de energia para os demais sistemas heterotróficos, sendo consumido pela respiração dos mesmos em diferentes níveis tróficos e, finalmente, por processos de decomposição. Parte desse carbono acumula-se no solo, na forma de matéria orgânica do solo (MOS). A MOS é também decomposta, mas em taxas mais lentas, fazendo com que esta seja um importante reservatório de C nos sistemas terrestres. Calcula-se que os solos armazenam quatro vezes mais C que a vegetação (Watson et al., 2000). O tempo de permanência do C nesses reservatórios terrestres varia entre dias a alguns poucos milhares de anos (Wigley & Schimel, 2000).

Nos oceanos, o CO₂ pode ser fixado pela fotossíntese de algas ou ser dissolvido na forma de ácido carbônico, com posterior formação de carbonatos. O C fixado na forma orgânica passa também por processos semelhantes aos dos ecossistemas terrestres em diferentes níveis tróficos, sendo parcialmente perdidos por respiração e decomposição, em um ciclo relativamente rápido. Parte desse C orgânico e, principalmente, os carbonatos (inorgânicos) acumulam-se no fundo dos oceanos, formando depósitos sedimentares. Em condições naturais, o carbono aprisionado nesse reservatório sedimentar gasta pelo menos 400 milhões de anos para voltar à atmosfera, por emissões vulcânicas e hidrotérmicas (Schlesinger, 1997).

PERTURBANDO O SISTEMA

A atividade humana tem perturbado o ciclo biogeoquímico do carbono de duas formas distintas. Primeiramente, de longe, a maior perturbação é resultante da queima de combustíveis fósseis e da utilização de rochas carbonatadas para a produção de cimento. A queima de combustíveis fósseis se refere à utilização de petróleo, carvão e gás natural. A outra fonte antropogênica de

⁴ Solos alcalinos também podem fixar pequenas quantidades de CO₂ atmosférico na forma de carbonatos. Porém esse processo restringe-se a solos de regiões semi-áridas e tem uma contribuição irrisória quando comparado à fotossíntese.

carbono para a atmosfera ocorre por meio de mudanças na cobertura vegetal, oriundas de diferentes formas de uso da terra, associadas ao desmatamento. Tais atividades são incorporadas na categoria de emissões em virtude do uso da terra, da mudança do uso da terra e das atividades florestais, conhecidas pela sigla LULUCF (land use, land-use change, and forestry) (Watson et al., 2000). Atualmente, a queima de combustíveis fósseis e a produção de cimento contribuem com, aproximadamente, 75% das emissões antropogênicas ($6.3 \pm 0.6 \text{ Gt C ano}^{-1}$), enquanto LULUCF contribui com a fração restante ($1.6 \pm 0.8 \text{ Gt C ano}^{-1}$) (Watson et al., 2001).

Nos últimos 150 anos, as emissões em razão de LULUCF ($136 \pm 55 \text{ Gt C}$) foram, aproximadamente, equilibradas por processos de reabsorção nos próprios ecossistemas terrestres (Watson et al., 2000). No mesmo período, o dobro foi emitido para a atmosfera, em virtude da queima de combustíveis fósseis e da produção de cimento ($270 \pm 30 \text{ Gt C}$). Desse total, em torno de um terço foi absorvido pelos oceanos e o restante acumulou-se na atmosfera, elevando as concentrações de CO_2 de 285 para 366 ppm (Watson et al., 2000).

Mudanças na composição da vegetação em resposta a perturbações nos ecossistemas terrestres têm ocorrido constantemente na biosfera, como, por exemplo, durante as glaciações. O relativo equilíbrio em termos globais entre emissões e reabsorções nos ecossistemas terrestres nos últimos séculos (Watson et al., 2000) ilustram bem o seu caráter resiliente, sendo as perturbações humanas compensadas por outros processos (e.g. fertilização por CO_2). Por sua vez, na ausência de perturbação humana, o fluxo de carbono para a atmosfera proveniente dos reservatórios fósseis seria desprezível em termos globais (Schlesinger, 1997). Por meio da queima de combustíveis fósseis e do uso de carbonatos na indústria de cimento, o homem criou um grande fluxo de CO_2 para a atmosfera sem precedentes no ciclo biogeoquímico desse gás (Schlesinger, 1997), mesmo em escala geológica (Watson et al., 2001). Segundo Berner & Lasaga (1989), “em virtude de que a liberação de dióxido de carbono causada pelo homem é muito mais rápida do que a liberação natural, os homens estão provocando um curto-circuito no ciclo do carbono”. Várias projeções de emissões antropogênicas de CO_2 para a atmosfera nos próximos 100 anos foram feitas pelo IPCC, considerando diferentes cenários (para maiores detalhes veja Houghton et al., 1995). Tomando-se como base as projeções nas quais as atuais tendências de crescimento populacional e econômico seriam mantidas, o chamado Cenário IS92a (“business as usual”), as emissões alcançariam $12,2 \text{ Gt C ano}^{-1}$ em 2025 e

chegariam a $20,3 \text{ Gt C ano}^{-1}$ em 2100. Como visto anteriormente, nem todo esse carbono se acumulará na atmosfera. Parte dele será “seqüestrada” pelos oceanos e ecossistemas terrestres (Fig. 1). Como seria a eficiência de cada um desses possíveis “seqüestradores”?

TAMPONANDO A ATMOSFERA

Os oceanos

Apesar de a taxa de sedimentação nos oceanos (aproximadamente $0,2 \text{ Gt C ano}^{-1}$) ser extremamente baixa em relação às emissões anuais de CO_2 pela queima de combustíveis fósseis e produção de cimento, a dissolução desse gás na forma de carbonatos nos oceanos representa um poderoso agente-tampão, ajudando a regular as suas concentrações na atmosfera (Schlesinger, 1997; Watson et al., 2000; Wigley & Schimel, 2000). Esse imenso reservatório ($\sim 39.000 \text{ Gt C}$) contém cerca de 50 vezes mais C que a atmosfera ($\sim 760 \text{ Gt C}$). Dessa forma, consegue manter o C dissolvido na água, permitindo que os lentos processos de sedimentação operem, retornando o C ao seu reservatório fóssil. Esse influxo líquido de C nos oceanos pode ser considerado como uma compensação para as emissões fósseis, pois culminará com o seu retorno ao reservatório sedimentar.

Caso as águas dos oceanos fossem bem misturadas, as emissões anuais de CO_2 provenientes de fontes fósseis seriam totalmente compensadas pelo processo de dissolução de carbonatos nos oceanos. Entretanto, o processo de mistura de águas rasas e profundas ocorre de forma bem lenta nas altas latitudes, regulada pela Circulação Termoalina⁵. Somente a superfície dos oceanos está em equilíbrio relativamente rápido com o CO_2 da atmosfera. Como resultado, tem-se que o tempo de ciclagem do carbono nas águas superficiais é de cerca de 11 anos, enquanto em águas profundas é de 350 anos (Schlesinger,

⁵ Circulação Termoalina é o processo de circulação oceânica no qual águas superficiais vindas dos trópicos, ao perderem calor nas altas latitudes (regiões polares), aumentam sua densidade e conseguem se misturar às águas profundas, iniciando um movimento descendente. Durante o inverno, ocorre a formação de geleiras (congelamento), aumentando a salinidade das águas superficiais e, conseqüentemente, sua densidade, o que favorece o processo de movimentação descendente. As águas superficiais que se misturam nas regiões polares afloram novamente nos trópicos, fechando o ciclo (Schlesinger, 1997).

1997). Assim, nas últimas duas décadas, somente um terço das emissões fósseis puderam ser retiradas da atmosfera pelos oceanos, ou seja, aproximadamente $2,3 \text{ Gt C ano}^{-1}$ (Watson et al., 2000).

Como todo sistema tampão, esse potencial tende à saturação com o aumento das concentrações de CO_2 na atmosfera. As mais recentes previsões baseadas em modelos de circulação global de carbono, acoplados a modelos climáticos, de circulação dos oceanos e de dinâmica de vegetação, apontam para uma crescente taxa de absorção de CO_2 pelos oceanos durante todo o século 21 (Cox et al., 2000). Entretanto, os incrementos relativos seriam decrescentes nesse período, estabilizando-se em uma taxa anual de $5,0 \text{ Gt C ano}^{-1}$, por volta de 2100 (Cox et al., 2000).

Um aspecto importante a se considerar é que a saturação do poder-tampão dos oceanos está diretamente ligada aos processos de circulação oceânica, ou seja, à taxa de troca entre águas rasas e profundas, governadas pela chamada Circulação Termoalina (Schlesinger, 1997). Simulações realizadas por Sarmiento et al. (1998) chamam a atenção para a possível modificação na circulação dos oceanos, em decorrência de uma provável elevação nos índices pluviométricos nas altas latitudes no Hemisfério Norte, em um cenário de aumento contínuo na temperatura global. Isso levaria a uma redução da salinidade na superfície, aumentando a estratificação entre as águas superficiais e profundas, e reduzindo a movimentação de C em profundidade. Tal processo diminuiria significativamente o influxo de CO_2 nos oceanos, afetando o poder-tampão dos mesmos, que poderia se estabilizar em valores bem inferiores ao sugerido por Cox et al. (2000).

Caso as emissões fósseis fossem banidas completamente, acredita-se que os oceanos reduziriam a concentração de CO_2 na atmosfera para valores próximos aos níveis pré-industriais, ainda no século 21 (Schlesinger, 1997). Entretanto, esse é um cenário completamente irreal, diante da forte dependência do sistema energético mundial de fontes fósseis de energia. Segundo Victor (1998), em 1996, 75% da energia consumida mundialmente vinha de gás natural, carvão mineral e petróleo.

Voltando ao Cenário IS92a do IPCC, em 2100, as emissões antropogênicas alcançariam $20,3 \text{ Gt C ano}^{-1}$ (Houghton et al., 1995) e os oceanos estariam tendo um influxo de $5,0 \text{ Gt C ano}^{-1}$ (Cox et al., 2000). Portanto, sobrariam $15,3 \text{ Gt C ano}^{-1}$ para serem seqüestrados pelos ecossistemas terrestres. Qual seria a viabilidade disso?

Ecossistemas terrestres

Ao se analisarem as potencialidades dos ecossistemas terrestres em retirar CO_2 atmosférico de origem fóssil (combustíveis fósseis e cimento), cria-se uma contradição: como compensar emissões de fontes que integram ciclos que ocorrem em escala geológica de tempo (centenas de milhões de anos), com sumidouros que se encontram em um equilíbrio muito mais dinâmico com a atmosfera, renovando-se em dezenas ou, no máximo, alguns poucos milhares de anos? A escala de tempo em que ocorre o ciclo do C nos ecossistemas terrestres é incompatível com a escala geológica de re-fixação das fontes fósseis (Schlesinger, 1997). Para uma eficiente compensação, os ecossistemas terrestres deveriam constituir um reservatório muito maior que a atmosfera. Entretanto, os estoques de C nos ecossistemas terrestres (2.500 Gt C) é pouco mais que três vezes superior ao da atmosfera, o que, de certa forma, sugere uma saturação bem mais rápida do seu poder-tampão. Nesse contexto, os ecossistemas terrestres devem ser considerados como um segundo processo de tamponamento temporário, fornecendo tempo suficiente para que o processo-tampão primário nos oceanos (dissolução de carbonatos) reabsorva os excedentes de CO_2 na atmosfera. Somente os processos de sedimentação desses carbonatos (e em uma porção menor, os sedimentos orgânicos) fecharão o ciclo, transferindo o C de volta aos reservatórios fósseis. Essa incompatibilidade temporal é uma importante limitação a esse processo de mitigação.

Uma análise das potencialidades de seqüestro de carbono pelos ecossistemas terrestres indica uma baixa eficiência desse processo (Canadell & Pataki, 2002). Na última década, por exemplo, calcula-se que tenham sido retirados cerca de $0,7 \pm 1,0 \text{ Gt C ano}^{-1}$ da atmosfera (Watson et al., 2000). Simulações realizadas por Cox et al. (2000) prevêm um reduzido e decrescente influxo líquido de CO_2 nos ecossistemas terrestres até meados do próximo século, quando então estes se tornarão uma forte fonte de CO_2 (Fig. 2). Os autores argumentam que essa mudança de sumidouro para fonte ocorrerá em decorrência de uma saturação dos processos que garantem um aumento de fixação de CO_2 pelos ecossistemas terrestres (principalmente o crescimento de florestas boreais e a fertilização com CO_2), enquanto os processos inversos, que provocam um aumento nas emissões (principalmente decomposição), continuarão a ser favorecidos por crescentes temperaturas. Na Tabela 1, observa-se que, quando os autores consideraram somente o aumento da concentração de CO_2 , na au-

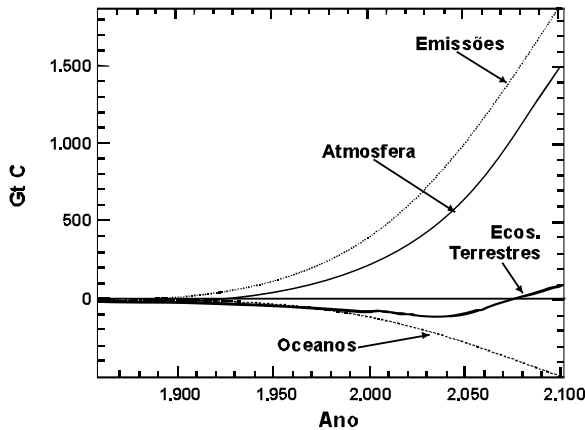


Fig. 2. Previsões de emissões de C-CO₂ para atmosfera segundo o cenário IS92a (business as usual) e acúmulo na atmosfera, oceanos e ecossistemas terrestres. Valores negativos significam fixação e, positivos, emissão para atmosfera. Simulações considerando as projeções de emissões de CO₂ com aquecimento global (adaptado de Cox et al., 2000).

sência de aquecimento global, os ecossistemas terrestres tiveram um influxo líquido de 450 Gt C, entre 2000 e 2100. Quando os autores inseriram em suas simulações o aquecimento global, os ecossistemas terrestres passaram a ter um balanço negativo no mesmo período. Emissões de 60 Gt C foram previstas quando o modelo baseou-se em projeções da concentração de CO₂ na atmosfera. Quando foram fixadas somente as taxas de emissão, sendo as concentrações na atmosfera também simuladas pelo modelo (situação na qual todos os feedbacks foram considerados), previu-se uma emissão de 170 Gt C nos próximos 100 anos (Tabela 1). Embora as previsões de Cox et al. (2000) não levem em consideração medidas políticas para mitigar as emissões pelos ecossistemas terrestres, seus resultados ressaltam a reduzida capacidade dos mesmos em balancear os teores de CO₂ na atmosfera em um cenário de crescentes emissões fósseis.

Em seu relatório sobre impacto de mudanças do uso da terra no ciclo de C, Watson et al. (2000) realizaram algumas projeções sobre o potencial de medidas mitigadoras em uma perspectiva global (Tabela 2).

Tabela 1. Resultados de simulações dos fluxos de carbono entre atmosfera, oceanos e ecossistemas terrestres, e do aquecimento global, considerando: (1) projeções de emissão de CO₂ segundo o cenário IS92a (Watson et al., 2001) sem aquecimento global; (2) projeções de concentrações de CO₂ com aquecimento global; (3) projeções de emissão de CO₂ conforme o cenário IS92a (Watson et al., 2001) com aquecimento global (dados de Cox et al., 2000, adaptados por Sarmiento, 2000).

Modelo	Aquecimento médio 1860-2100 Global (Ecossistemas terrestres)	CO ₂ em 2100 (ppm)	Seqüestro de C 2000-2100 (Gt C)	
			Ecossistemas terrestres	Oceanos
1) Projeções de emissão de CO ₂ sem aquecimento global	0,0°C (0,0°C)	700	450	300
2) Projeções de concentrações de CO ₂ com aquecimento global	4,0°C (5,5°C)	713	-60	250
3) Projeções de emissão de CO ₂ com aquecimento global	5,5°C (8,0°C)	980	-170	400

Tabela 2. Mudança no estoque de C até 2010 nos ecossistemas terrestres em resposta a alterações no sistema de uso da terra: (a) melhor manejo dos sistemas; (b) mudança de sistema (Watson et al., 2000).

Cenários	Área total (Mha)	Proporção atividade em 2010 (%)	Taxa de acúmulo de C (t C ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Mudança no estoque de C em 2010 (Gt C ano ⁻¹)
(a) Melhor manejo dos sistemas				
Floresta	4.050	10	0,4	0,170
Agricultura	1.300	30	0,3	0,125
Pastagens	3.400	10	0,7	0,240
Agrofloresta	400	20	0,3	0,026
Arroz irrigado	150	50	0,1	0,007
Urbano	100	5	0,3	0,002
(b) Mudança de sistema				
Agrofloresta	630	20	3,1	0,390
Agricultura para pastagem	1.500	3	0,8	0,038
Recuperar solos hidromórficos	230	5	0,4	0,004
Recuperar áreas degradadas	280	5	0,3	0,003

A recuperação de pastagens destaca-se como a medida de melhoria do maejo com maiores potencialidades, o que traria uma taxa de acúmulo de 0,24 Gt C ano⁻¹ até 2010. Com relação à mudança no sistema de uso da terra, destaca-se a agrofloresta como a alternativa mais eficiente, podendo propiciar o influxo de 0,39 Gt C ano⁻¹ no mesmo período. Caso todas as alternativas fossem utilizadas ao mesmo tempo, acumular-se-ia em torno de 1,4 Gt C ano⁻¹ na biomassa de ecossistemas terrestres.

Em estudo baseado no Mapa de Solos do Mundo, Batje (1999) realizou projeções sobre a capacidade de acúmulo de C em solos sob atividades mitigadoras (Tabela 3). Caso todas as áreas em processo de degradação, independentemente do uso e cobertura, fossem recuperadas, seria possível armazenar, em média, 1,29 Gt C ano⁻¹ nos próximos 25 anos. Acrescentando-se a esse valor o influxo de C referente à melhoria de áreas não degradadas na agricultura, pecuária e florestas secundárias, chegaria-se a uma média de 1,57 Gt C ano⁻² nesse mesmo período.

Considerando que as taxas de influxo de C pela biomassa (Tabela 2) fossem extrapoláveis para 25 anos (no trabalho do IPCC é somente de 10 anos) e tomando-se o maior valor possível de armazenamento de C nos solos (Tabela 3), chegar-se-ia a uma máxima absorção de 2,97 Gt C ano⁻¹ para os próximos 25

Tabela 3. Taxa média de aumento nos estoques de C no solo, segundo diversos cenários de mudança no uso da terra (Batje, 1999).

Cenário	Taxa de aumento estoque de C (Gt C ano ⁻¹)
1) Recuperação de toda a área degradada, independentemente do uso/ cobertura	1,29
2) Recuperação de toda a área degradada, excluindo regiões áridas, boreais e polares	0,93
3) Recuperação somente de áreas degradadas na agricultura	0,41
4) Recuperação de áreas degradadas na agricultura, pastagens extensivas e florestas secundárias	0,52
5) Melhor manejo de áreas agrícolas não degradadas	0,17
6) Melhor manejo de áreas não degradadas na agricultura, pastagens extensivas e florestas secundárias	0,28

anos. Embora sejam cálculos evidentemente grosseiros e extremamente otimistas, serviriam como um limite máximo de taxa de influxo nos ecossistemas terrestres, caso medidas mitigadoras fossem tomadas globalmente. Esse valor, no entanto, seria dificilmente alcançado em virtude de conjunturas econômicas, sociais e políticas.

Em um exercício de extrapolação, juntando-se a esse valor o máximo de absorção de CO₂ pelos oceanos, atingível nos próximos 100 anos (Cox et al., 2000), chegar-se-ia a valores máximos de fixação de carbono nos oceanos e ambientes terrestres de 8 Gt C ano⁻¹. Esse valor seria bem menor que os previstos pelo cenário IS92a (business as usual) para as emissões em 2025 (12,2 Gt C ano⁻¹) e não chegariam à metade dos valores em 2100 (20,3 Gt C ano⁻¹). Todo o carbono restante estaria sendo acumulado na atmosfera.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma visão global dos processos envolvidos na dinâmica de CO₂ indica que as alternativas visando à fixação de carbono nos ecossistemas terrestres seriam ineficientes para reverter os problemas causados pelo acúmulo desse gás na atmosfera, caso sejam mantidos os atuais padrões de consumo de combustíveis fósseis. Está claro que medidas para seqüestrar carbono nesses ecossistemas não teriam nenhum efeito em um cenário de emissões crescentes de CO₂. As alternativas seqüestradoras seriam medidas importantes somente quando combinadas a um esforço efetivo de redução de emissões fósseis.

Nesse contexto, assume extrema importância a adoção de limites aos mecanismos de compensação previstos pelo Protocolo de Kyoto, para que estes não venham a neutralizar os esforços de redução nas emissões.

Deve-se ressaltar que o tamponamento da atmosfera, resultante das atividades “seqüestradoras” pelos ecossistemas terrestres, é de caráter provisório. A extensão desse período está limitada ao tempo necessário para que o ecossistema se estabilize no novo patamar de estoque de carbono, como ocorre, por exemplo, com o nível da matéria orgânica do solo, o qual possui limites máximos em função das características locais de solo e clima. Dependendo das circunstâncias e da conjuntura econômico-social de determinado país, o seqüestro de carbono poderá contribuir para a redução de custos de uma eventual substituição da matriz energética.

Uma mudança direcionada à redução do consumo de combustíveis fósseis acompanhada da substituição gradativa do consumo de produtos não renováveis por fontes energéticas renováveis, como a biomassa, álcool, biodiesel, além das energias solar e eólica, seria o caminho mais adequado para a solução do problema sem maiores prejuízos econômicos.

Finalmente, cabe ressaltar, ainda, que as atividades visando ao seqüestro de C em ecossistemas terrestres geralmente são medidas conservacionistas, apresentando indiretamente diversos benefícios para a sociedade, como a preservação do solo, da água e da biodiversidade. Práticas agrícolas, agroflorestais e florestais que possam contribuir para o seqüestro de carbono e que, ao mesmo tempo, são conservadoras do meio ambiente devem ser incentivadas, inclusive proporcionando maior apoio à pesquisa, assistência técnica e ao crédito rural, tanto por organismos nacionais como internacionais.

Portanto, os possíveis efeitos do seqüestro de C em ecossistemas terrestres devem ser cautelosamente equacionados, para que se tire proveito dos seus benefícios diretos e indiretos, sem contudo prejudicar os esforços de redução no uso de combustíveis fósseis.

REFERÊNCIAS

BATJE, N. H. **Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil.** Wageningen: ISRIC, 1999. 114 p. (ISRIC Technical Paper, 30).

BERNER, A. R.; LASAGA, A. C. Modeling the geochemical carbon cycle. **Scientific American**, New York, v. 260, n. 3, p. 54-61, 1989.

CANADELL, J. G.; PATAKI, D. New advances in carbon cycle research. **Trends in Ecology and Evolution**, Cambridge, v. 17, n. 4, p. 156-157, 2002.

COX, P. M.; BETTS, R. A.; JONES, C. D.; SPALL, S. A.; TOTTERDELL, I. J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. **Nature**, London, v. 408, p. 184-187, 2000.

GERMAN BUNDESTAG. Greenhouse effect and climatic change. In: GERMAN BUNDESTAG. **Protecting the earth's atmosphere: an international challenge: interim report of Study Commission of the 11th German Bundestag** "Preventive Measures to Protect the Earth's Atmosphere. Bonn, 1989. p. 340-531.

HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L. G.; BRUCE, J. P.; LEE, H.; CALLANDER, B. A.; HAITES, E. F. (Ed.). **Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios**. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 1995. 339 p.

SARMIENTO, J. L. That sinking feeling. **Nature**, London, v. 408, p. 155-156, 2000.

SARMIENTO, J. L.; HUGHES, T. M. C.; STOUFFER, R. J.; MANABE, S. Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming. **Nature**, London, v. 393, p. 245-259, 1998.

SCHLESINGER, W. H. **Biogeochemistry: an analysis of global change**. San Diego: Academic Press, 1997. 588 p.

VICTOR, D. G. Strategies for cutting carbon. **Nature**, London, v. 395, p. 837-838, 1998.

WATSON, R. T.; CORE WRITING TEAM (Ed.). **Climate change 2001: synthesis report: third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 2001. 397 p.

WATSON, R. T.; NOBLE, I. R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N. H.; VERARDO, D. J.; DOKKEN, D. J. **Land use, land-use change, and forestry: a special report of the IPCC**. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 2000. 377 p.

WIGLEY, T. M. L.; SCHIMMEL, D. S. **The carbon cycle**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 292 p. (Global Change Institute, v. 6).