
VALORAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO PARA A LITOSFERA

Rosa Alencar Santana de Almeida – UFRB
rosangela@ufrb.edu.br

Marcelo Santana Silva – IFBA – Campus Santo Antônio de Jesus
marcelosilva@ifba.edu.br

Eduardo Oliveira Teles – Campus Camaçari
eduardo.teles@ufrb.edu.br

Ednildo Andrade Torres – UFBA
ednildo@ufba.br

Resumo – O trabalho apresenta uma proposta para valorar o custo para redução da concentração de CO₂ na atmosfera utilizando-se os métodos disponíveis de seqüestro de carbono para a litosfera. Inicialmente foi realizado um levantamento sistemático dos principais métodos disponíveis e confiáveis para seqüestro de carbono na biosfera, litosfera e hidrosfera, de modo a produzir o arcabouço de alternativas disponíveis. Percebeu-se então que vários estudos já haviam sido realizados para avaliar e mensurar os métodos de seqüestro na biosfera, sendo esta a via mais simples e tradicional até então utilizada. Por outro lado verificou-se que as tecnologias para seqüestro para a hidrosfera, que têm o princípio a aceleração dos processos naturais de desenvolvimento de algas que utilizam o gás carbônico para a fotossíntese ainda carecem de estudos para confirmar a sua viabilidade técnica e econômica. Por estes motivos, selecionou-se então como objeto de estudo o seqüestro para a litosfera, mais especificamente para as formações geológicas e para os oceanos. Nestes compartimentos os métodos compreendem a captura, transporte e armazenamento geológico do CO₂ em aquíferos salinizados, poços de petróleo e de carvão, ou diretamente no fundo do oceano. De posse dos métodos mais confiáveis foram estimados os custos de cada uma das fases (captura, transporte e armazenamento), e a sustentabilidade de algumas soluções. Os resultados obtidos evidenciam os altos custos das soluções mais confiáveis, e sugerem também que eles tendem a crescer se forem incluídas ali as variáveis de valoração ambiental dos recursos naturais fornecidos. Não obstante, a partir de dados secundários colhidos nos relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, do original, em inglês Intergovernmental Panel on Climate Change) sobre a entrada de carbono na atmosfera e os custos estimados de seqüestro para a litosfera foi possível estimar o custo econômico para seqüestrar uma tonelada de CO₂ e a partir destes dados elaborar os cenários para seqüestro de valores percentuais das atuais emissões, concluindo que para seqüestrar 1% das emissões atuais, que correspondem 0,32 Gt/CO₂, seriam gastos bilhões de dólares (12 ~ 29) dependendo da fonte de captação e do tipo de armazenamento, sem contar os custos ambientais associados.

Palavras-Chave – Seqüestro de carbono, valoração ambiental, seqüestro geológico, seqüestro oceânico.

INTRODUÇÃO

Carbono na atmosfera

A Revolução Industrial, iniciada na segunda metade do século XVIII, e mais adiante o surgimento dos grandes projetos agropecuários, desencadearam o uso intensivo de energia produzida pela queima dos combustíveis fósseis, e o desmatamento de grandes áreas de terra para cultivo de monoculturas e criação de pastagens. Os combus-

tíveis fósseis são formados pela decomposição de matéria orgânica durante milhares de anos, e por este motivo não se renovam em uma escala de tempo humana, ainda que continuem sendo produzidos pela natureza; sua utilização em larga escala deve-se principalmente a sua abundância e baixo custo, o que, segundo Pereira (2002) foi determinante para as transformações econômicas,

sociais, tecnológicas e ambientais que vêm ocorrendo desde o advento do seu uso.

O mesmo autor destaca como consequências ambientais do processo de industrialização e do consumo de combustíveis fósseis a ele associado: o aumento da contaminação do ar por gases e material particulado, proveniente da queima dos combustíveis, e a mudança global do clima, problema este bem mais complexo e de consequências ainda não avaliadas na sua totalidade. Esta situação vem sendo provocada pelo aumento significativo das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Os GEE, dentre os quais se destaca o dióxido de carbono (CO_2), permitem a entrada da luz solar, mas impedem que parte do calor no qual a luz se transforma volte para o espaço, aprisionando-o e provocando o chamado efeito estufa. Não obstante, é importante lembrar que os gases de efeito estufa, entre eles o vapor d'água, não causam danos à saúde e não sujam o meio ambiente, assim como o fenômeno do efeito estufa não é um problema. Caso o efeito não fosse produzido, a temperatura média da terra oscilaria em torno de 170C negativos, o que inviabilizaria a vida no planeta tal como ela é, pois o sol não aqueceria a terra. O problema se restringe, portanto à intensificação do efeito, ao aumento da emissão dos gases, às mudanças climáticas provocadas por esta situação.

Agravamento do Efeito Estufa

Segundo divulgado no Relatório do IPCC/ONU (IPCC, 2007a), a concentração global de dióxido de carbono, considerado como o mais importante gás estufa antropogênico tem crescido desde a época pré-industrial que era em torno de 280 ppm para 379 ppm₃ em 2005. A concentração de dióxido de carbono na atmosfera excedeu em muito a faixa natural durante dos últimos 650.000 anos (180 à 300ppm) determinado através de núcleos de gelo. A taxa anual de crescimento da concentração de dióxido de carbono foi maior no período de 1995-2005 média: 1,9 ppm por ano, do que foi desde o começo da medição contínua e direta da atmosfera (1960-2005 média: 1,4 ppm por ano) apesar de existir variações de crescimento de um ano para outro (IPCC, 2007a). Este fato, segundo avaliação do CEPAC (2009), já causou uma elevação da temperatura média da Terra de 0,8°C no mesmo período, e está provo-

cando mudanças climáticas em escala global. Ainda segundo o mesmo relatório, se as emissões de GEE se mantiverem aos níveis atuais, calcula-se que a concentração de CO_2 na atmosfera deverá chegar a 790 ppmv no final deste século, provocando um aumento de, no mínimo, 5°C na temperatura média da Terra, variação similar à ocorrida desde a última era glacial até os dias de hoje.

Origens das Emissões

As atividades humanas emissoras de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o CO_2 e o CH_4 , estão relacionadas com as mudanças nos níveis de industrialização e do uso do solo experimentados pela humanidade desde 1750, e de forma mais intensa nas últimas décadas do século passado e início do século XXI.

De acordo com o Relatório IPCC/ONU (IPCC, 2007a), a principal fonte para o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera desde o período pré-industrial é o resultado do uso de combustível fóssil, seguida da mudança do uso do solo, embora esta com menor contribuição para o aumento. A emissão de dióxido de carbono fóssil inclui todas as emissões devido à produção, distribuição e consumo de combustível fóssil como também subprodutos na produção de cimento. Enquanto que, as emissões relativas à mudança do uso do solo se referem às emissões provenientes do desflorestamento, biomassa e queima, decomposição da biomassa decorrente da exploração madeireira e do desflorestamento. Ainda de acordo com a mesma fonte, a emissão de dióxido de carbono anual aumentou em uma média de 6,4 GtC por ano na década de 1990, para 7.2 GtC por ano em 2000-2005, embora os dados de 2004 e 2005 sejam estimativas provisórias. Se forem consideradas as emissões associadas com a mudança do uso do solo estes valores devem ser acrescidos de 1.6 GtC por ano durante a década de 1990, embora o relatório aponte algumas incertezas nestas estimativas. Uma emissão de 1GtC (1 GtC = 1 Giga-tonelada de Carbono = 1 bilhão de toneladas de Carbono) corresponde a 3.67GtCO₂.

A concentração de gás metano na atmosfera global segue a mesma tendência de crescimento. Ainda segundo o IPCC, a concentração aumentou de um valor do período pré-industrial de cerca de 715 ppb para 1732

ppb no começo da década de 1990, e estava em 1774 ppb em 2005. A concentração de gás metano em 2005 excedeu em muito a faixa natural dos últimos 650.000 anos (320 para 790 ppb) como determinado através de núcleos de gelo. Segundo as reflexões publicadas no relatório, é muito provável que o aumento observado da concentração de gás metano seja devido às atividades antropogênicas, predominantemente a agricultura e o uso de combustível fóssil, mas contribuições relativas a diferentes tipos de fontes não estão bem determinadas.

Finalmente, a concentração de óxido nitroso na atmosfera global. Segundo os dados da publicação em pauta, a concentração do óxido nitroso aumentou de um valor do período pré-industrial de cerca de 270 ppb para 319 ppb em 2005. A taxa de crescimento tem sido aproximadamente constante desde 1980. Mais de um terço de toda a emissão de óxido nítrico são antropogênicas e principalmente devido à agricultura.

O relatório conclui que a "continuidade na emissão do gás estufa na taxa atual ou maior causaria um aquecimento extra e induziria muitas mudanças no sistema climático global durante o século 21, e muito provavelmente estas mudanças seriam muito mais impactantes do que aquelas observadas no século 20".

Vale ressaltar, que o aquecimento tende a reduzir a captura de dióxido de carbono da atmosfera pelos oceanos e pelo solo, o que eleva a fração de emissão de antropogênicos que permanecem na atmosfera. Em um dos cenários traçados pelo IPCC (2007a), em que se descreve um mundo muito heterogêneo onde o fundamento é autoconfiança e manutenção de identidades locais, e o desenvolvimento econômico é essencialmente orientado para a região com desenvolvimento tecnológico mais fragmentado e lento, por exemplo, o retorno do ciclo de carbono do clima aumenta o aquecimento médio global correspondente em 2010 em mais de 1°C.

Ciclo de Carbono – Reservatórios

Os quatro reservatórios de carbono do planeta (atmosfera, hidrosfera, biosfera e litosfera) vivem em equilíbrio dinâmico. O tempo em que o carbono permanece em cada um deles e o seu fluxo entre os reservatórios constitui-se no Ciclo do Carbono.

A concentração de carbono na matéria viva é de 18%, quase 100 vezes maior do que

a sua concentração no solo (0,19%), sendo assim os seres vivos extraem o carbono do ambiente não-vivo. Para que a vida continue, este carbono deve ser reciclado (FIGURA 1). O carbono está disponível no ambiente não vivo nas formas de: dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera e dissolvido na água (formando HCO_3^-), em rochas carbonáticas (calcário - CaCO_3), em depósitos de carvão, petróleo e gás natural (derivados de matéria viva), matéria orgânica morta, por exemplo o húmus do solo (KIMBALL, 2009). As fontes naturais de CO_2 , incluindo a atividade vulcânica, dominam o ciclo de carbono da Terra.

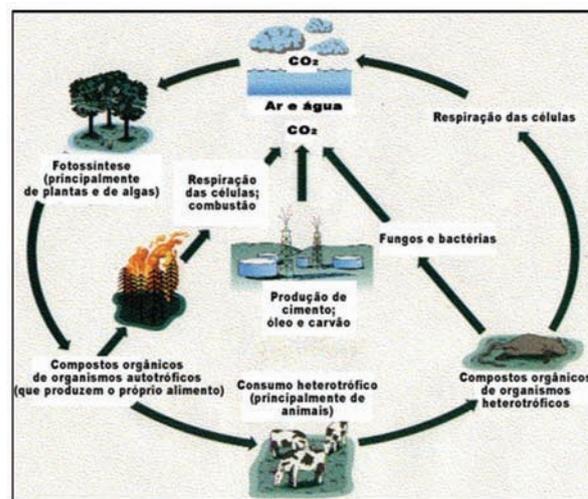


FIGURA 1 – Ciclo do Carbono

O elemento entra no mundo biótico através da ação dos seres autótrofos, principalmente através do fotoautótrofos, como plantas e algas, que usam energia solar para converter o dióxido de carbono em matéria orgânica, e em menor escala, através dos quimioautotróficos, bactérias e fungos, que fazem o mesmo processo, mas que utilizam de energia derivada da oxidação de moléculas em seu substrato (KIMBALL, 2009). E retorna à atmosfera e à hidrosfera na forma de gás carbônico, por processos de respiração das células, e através da combustão e processos de decaimento (produção de CO_2 , na presença de oxigênio ou de CH_4 , na ausência).

A queima intensiva de combustíveis fósseis e de biomassa resultante das atividades humanas produz aumentos significativos no fluxo de carbono da litosfera e da biosfera para a atmosfera, provocando o aquecimento anormal do planeta.

sequestro de carbono

O termo seqüestro, em sentido amplo, se refere ao processo de captura de uma substância, em estado livre, e agregado em outro material (ANDI, 2009). O seqüestro de carbono, conceito adotado pela COP-3 (ANDI, 2009 apud Quioto, 1997), é a captura e estocagem de CO₂ e CO₂-equivalente da atmosfera com a finalidade de conter e reverter o aquecimento resultante do efeito estufa.

Com este objetivo estão sendo estudados e avaliados vários métodos artificiais de captura e de seqüestro do carbono, assim como seguem sendo estudados outros tantos processos naturais. De maneira geral o processo de transferência de carbono da atmosfera pode ser feito para a biosfera (seqüestro por biomassa), para a hidrosfera (seqüestro oceânico) ou para a litosfera (seqüestro geológico).

A via mais simples e tradicional é a da biomassa, que consiste no plantio de árvores para a criação de florestas. Na avaliação do professor Meira Filho (OPALC, 2009), este processo tem resultados limitados. Para o pesquisador, apesar de ser uma tecnologia interessante do ponto de vista ambiental, na medida em que o gás é capturado por meio da fotossíntese, ela depende da disponibilidade de terra, que não pode ser qualquer uma. "Isso tem que ser feito em um lugar onde se tem chance das árvores permanecerem lá, como em áreas de preservação permanente ou plantações comerciais", ressalva Meira Filho (OPALC, 2009). Não obstante, ressalte-se que em fase de crescimento, as árvores são verdadeiros aspiradores de CO₂ da atmosfera. O tronco de uma árvore é 80% composto de carbono, portanto não é de admirar que elas suguem, por hectare, 150 a 200 toneladas de CO₂ do ar. Uma árvore, sozinha, é capaz de absorver 180 quilos de CO₂ (Tonon, 2007).

O Relatório do Grupo de Trabalho III sobre Mitigação da Mudança do Clima do IPCC recomenda seqüestro por biomassa, destacando que estas medidas são concordantes com o pensamento do instituto e evidenciam aplicabilidade. De acordo com o documento "As atividades de mitigação relacionadas com as florestas podem reduzir de forma considerável as emissões por fontes e aumentar as remoções de CO₂ por sumidouros com custos baixos e podem ser planejadas para criar sinergias com a adapta-

ção e o desenvolvimento sustentável" (IPCC, 2007b). Não obstante a avaliação positiva, o documento lembra que cerca de 65% do potencial total de mitigação (até 100 US\$/tCO₂-eq) está localizado nos trópicos e cerca de 50% do total poderia ser alcançado reduzindo-se as emissões do desflorestamento; e infere também que a mudança do clima pode afetar o potencial de mitigação do setor florestal (ou seja, nas florestas nativas e plantadas) e deve ser distinta entre as diferentes regiões e sub-regiões, tanto em magnitude quanto em direção.

Para o seqüestro para a hidrosfera existem algumas metodologias, ainda em fase de testes que são vistas como ressalvas pelo IPCC, dadas as evidências limitadas da eficácia. De acordo com o relatório do Grupo de Trabalho III, as opções de geoengenharia, como a fertilização oceânica para remover CO₂ diretamente da atmosfera ou bloquear a luz do sol, trazendo material para a atmosfera superior, ainda são objeto de muita especulação e poucas provas, além de apresentarem risco de efeitos colaterais não conhecidos (IPCC, 2007b). Segundo o mesmo documento, não há publicações de estimativas de custo confiáveis para essas opções.

Já o seqüestro de carbono para a litosfera através da captura, transporte e armazenamento geológico de CO₂ é uma importante alternativa na redução e estabilização das emissões de gases de efeito estufa em uma perspectiva de desenvolvimento sustentável, e está baseado no princípio de "devolver o carbono de volta ao subsolo" (CEPAC, 2009), como mostrado esquematicamente na Figura 2. Este processo foi estudado com detalhes e é a base para as estimativas de valoração propostas no presente trabalho.

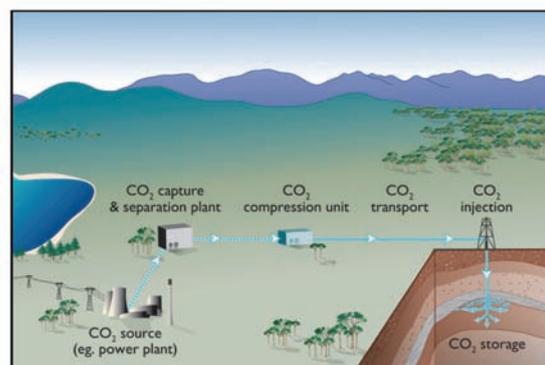


FIGURA 2– Processo de Geosequestro de CO₂ (Fonte: CO₂CRC, 2009).

Sequestro de Carbono para a litosfera

A captação e armazenamento do dióxido de carbono (CCS, da sigla em inglês para *Carbon dioxide (CO₂) capture and storage*) constituem-se em um processo consistente de separação do carbono emitido pelas fontes estacionárias, seu transporte até o ponto de armazenamento e finalmente o seu armazenamento em condições adequadas de segurança e seu isolamento da atmosfera a longo prazo. Segundo o relatório do IPCC, o CCS é uma das opções do portfólio de medidas de mitigação para estabilização das concentrações atmosféricas de gases efeito de efeito estufa (IPCC, 2007 a).

Os processos de captação de CO₂ podem ser aplicados a grandes fontes pontuais, dentre as quais se incluem as instalações que usam combustíveis fósseis ou biomassa de grandes dimensões, indústrias emissoras de CO₂, a produção de gás natural, as plantas de combustíveis sintéticos e as plantas de produção de hidrogênio alimentadas por combustíveis fósseis. Após a captação, o gás é comprimido e transportado para ser armazenado.

Os métodos técnicos de armazenamento avalizados pelo IPCC são o armazenamento geológico em formações geológicas (como campos de petróleo e o gás, camadas de carvão inutilizáveis e formações salinas profundas), o armazenamento no oceano (lançamento direto para a coluna da água do mar ou no fundo do oceano) e a fixação industrial de CO₂ em carbonatos inorgânicos, conforme apresentado na Figura 3 (IPCC, 2007 a), onde também estão representadas as principais fontes para as quais o CCS pode ser utilizado, assim como as opções de transporte e armazenamento de CO₂. O relatório também admite os usos industriais de CO₂, mas infere que não se espera que este método possa contribuir muito para reduzir as emissões de CO₂.

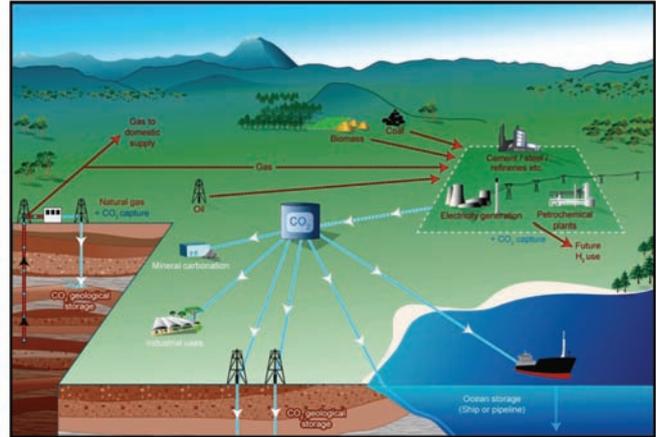


FIGURA 3 – Diagrama esquemático dos métodos para captura e armazenamento de CO₂. (Fonte: CO₂CRC, 2009).

Métodos de captura do Gás Carbônico

Existem diferentes rotas tecnológicas para a captura do gás carbônico produzido em fontes estacionárias: Pré-combustão (o gás carbônico é capturado antes que a combustão se processe), Pós-combustão (o gás carbônico é capturado após a queima) e a Oxidcombustão, quando o ar é substituído pelo oxigênio na combustão. Existe ainda uma quarta opção, denominada "Looping Químico", ainda em testes. A Figura 4 mostra os principais processos e sistemas disponíveis.

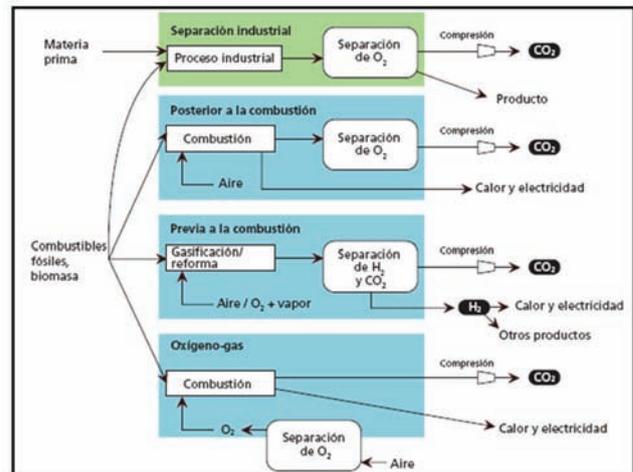


FIGURA 4 – Representação Esquemática dos Sistemas de Captura de CO₂ – Fonte: IPCC, 2007

Na captura pré-combustão o gás possui alta pressão e alta concentração de CO₂, o que segundo afirma Costa (2009), é uma vantagem, pois o CO₂ resultante da separação vai estar com alta pressão, o que reduz custos relacionados à compressão.

Na modalidade de pós-combustão o objetivo é coletar o exausto proveniente da combustão com o ar, ao invés de liberá-lo para atmosfera, e em seguida separar o CO₂. Segundo Costa (2009) uma vantagem desta tecnologia em relação à pós-combustão é que ela pode ser aplicada na maioria das termelétricas convencionais. Porém, segundo a mesma fonte, como o exausto proveniente dessas plantas de energia possui baixa concentração de CO₂, este possuirá baixa pressão, necessitando de compressão para ser transportado e armazenado.

A oxidação (oxy-fuel) utiliza oxigênio ao invés de ar para fazer a queima e assim capturar o gás. Como explica Costa (2009), neste processo, primeiro o oxigênio (O₂) é separado do ar em uma planta de separação de ar. A reação do combustível vai ocorrer na presença de O₂ e CO₂, fazendo com que o gás resultante possua alta concentração de CO₂, não possuindo N₂. Segundo a autora, neste caso a concentração de CO₂ neste gás é aproximadamente 90% por unidade de volume, o que permite processos de menor custo para separação. Costa ressalta, porém que o que se economiza de energia e de custos no processo de captura, em parte ou mesmo totalmente, pode ser despendido na unidade de separação de ar.

O IPCC no seu relatório divulgado em 2007 alerta que esta última tecnologia utiliza oxigênio de alto teor de pureza e ainda está em fase de demonstração, entendendo-se como tal que a tecnologia já foi desenvolvida e posta em prática em escala experimental, necessitando-se de mais pesquisas antes que a técnica esteja pronta para desenho e construção em grandes escalas (IPCC, 2007a).

Formas de transporte do Gás carbônico Capturado

O transporte do gás carbônico pode ser feito utilizando-se de gasodutos ou através de rotas marítimas, a depender das distâncias e das quantidades transportadas. A recomendação do IPCC é de que para o transporte de grandes quantidades de CO₂

em distâncias de até 1000 km devem-se utilizar os gasodutos, uma tecnologia madura e utilizada em larga escala em países como os Estados Unidos. Nos casos de distâncias maiores além fronteiras, ou para quantidades inferiores a alguns milhões de toneladas de CO₂ por ano, uma opção mais atraente economicamente seria utilização de navios. Métodos para armazenamento do Gás Carbônico em formações geológicas

No armazenamento do gás carbônico em formações geológicas profundas utilizam-se muitos dos conhecimentos adquiridos na indústria petrolífera, para petróleo e gás. São amplamente considerados três tipos de formações geológicas para o armazenamento geológico: depósitos de petróleo e gás, formações salinas profundas e veios de carvão inutilizável, conforme mostrado na Figura 5.

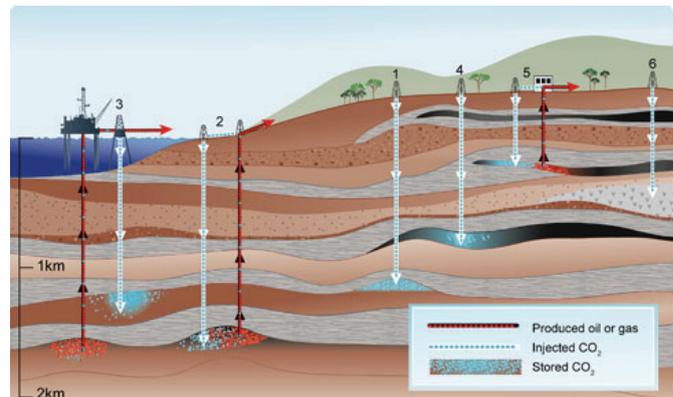


FIGURA 5 – Opções de armazenamento geológico do CO₂ - (Fonte: CO₂CRC, 2009).

As formações adequadas estão localizadas em bacias sedimentares, depressões naturais na crosta terrestre preenchidas de sedimentos, que podem estar localizadas tanto na terra quanto no mar. Em geral, o armazenamento de gás carbônico em reservatórios de hidrocarbonetos e em formações salinas se processa em profundidades abaixo dos 800 m, onde a pressão e a temperatura ambiente propiciam que o CO₂ esteja em estado líquido ou supercrítico. Nestas condições a densidade do gás oscila entre 50 e 80% a densidade da água. Esta densidade é semelhante à de alguns óleos brutos de petróleo, os quais produzem forças de ascensão que impulsionam o CO₂ para a superfície. Por este motivo é muito importante que as rochas presentes proporcionem um funcionamento como um tampão para assegurar que o gás permaneça

rá bloqueado no compartimento subterrâneo. Quando injetado no subsolo, o CO₂ é comprimido e preenche o espaço dos poros pelo deslocamento parcial de fluidos que já estão presentes (os fluidos "in situ").

Uma vez injetadas na formação de armazenamento, a fração retida depende de uma combinação de mecanismos de contenção física e geoquímica. A contenção física para bloquear o movimento ascendente de CO₂ é fornecida por uma camada de formação de rocha de xisto e barro sobre o armazenamento. Esta camada impermeável é conhecida como "rocha de cobertura".

O mecanismo de retenção geoquímico surge quando o CO₂ reage com fluidos *in situ* e a rocha hospedeira. Primeiro, o CO₂ se dissolve na água *in situ*. Uma vez que isso acontece (em escalas cronológicas de centenas de milhares de anos), o CO₂, água rica em CO₂ adquire densidade e, portanto, afunda na formação (em vez de subir para a superfície). Em seguida, as reações químicas entre o gás carbônico dissolvido e os minerais da rocha formam espécies iônicas, de modo que uma fração do CO₂ injetado vai se transformar em carbonatos sólidos, ao longo de milhares de anos.

Um tipo adicional de retenção ocorre quando o CO₂ é absorvido preferencialmente por carvão ou por xisto argiloso rico em substâncias orgânicas, substituindo gases como o metano. Nestes casos, o CO₂ permanecerá retido enquanto a pressão e a temperatura permanecerem estáveis.

Métodos para armazenamento do Gás Carbônico no oceano

Outra tecnologia investigada para o armazenamento do gás carbônico consiste em injetar o CO₂ captado diretamente no fundo dos oceanos, a mais de mil metros de profundidade, inferindo-se que a maior parte do material injetado permaneceria isolado da atmosfera durante séculos. A forma de operar seria realizar o transporte do CO₂ por gasodutos ou por navios até o local de armazenamento, onde seria feita uma injeção na coluna de água dos oceanos ou no fundo do mar. Posteriormente, o gás carbônico dissolvido e disperso se converteria em parte integrante do ciclo global de carbono (IPCC, 2007a). A Figura 6 mostra alguns dos principais métodos que podem ser aplicados. Não obstante, as investigações do uso desta técnica em escala comercial ainda estão em andamento.

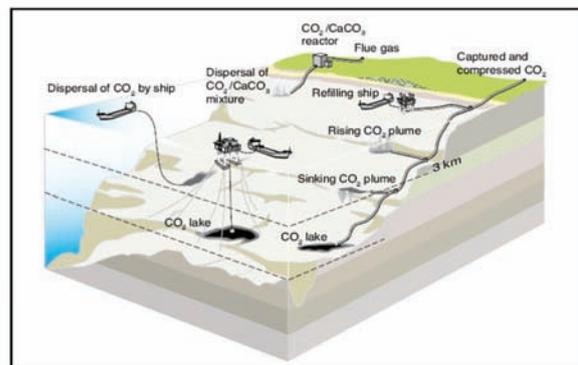


FIGURA 6 – Métodos de Armazenamento Oceânico – Fonte: IPCC, 2007

Riscos ambientais no processo de transporte e armazenamento

Em se tratando de riscos relacionados com o transporte de gás carbônico por gasodutos, o que se pode concluir de estudos já publicados (IPCC, 2007a e Costa, 2009), é que são similares ou mais baixos do que aqueles associados ao transporte de hidrocarbonetos que estão em funcionamento. Não obstante, é fato que uma repentina e substancial liberação de CO₂ representa um perigo para as comunidades do entorno se forem expostas a concentrações superiores a 7% ou 10% (IPCC, 2007a). Para Costa (2009) "o transporte de CO₂ por meio de dutos através de áreas populosas requer uma atenção especial para a escolha da rota pela qual vão passar as tubulações; para a proteção, ou seja, meios de controle, no que diz respeito a pressões muito elevadas; métodos para detectar vazamentos, além de outros fatores que devem ser levados em consideração na construção das tubulações". De todo modo, são riscos conhecidos e para os quais existem métodos de prevenção amplamente conhecidos e de eficiência comprovada.

Já os riscos relacionados com fugas de armazenamento CO₂ em depósitos geológicos são abordados em duas categorias distintas: riscos globais e riscos locais. Os riscos globais incluem a libertação de CO₂ que pode contribuir de forma significativa para as mudanças climáticas caso se produza uma fuga em grandes proporções do compartimento de armazenagem para a atmosfera. Além disso, se houver um vazamento do compartimento de armazenamento de CO₂ podem existir riscos para os seres humanos, para os ecossistemas e para as águas subterrâneas, o que representariam riscos locais ou regionais.

No que se refere aos riscos mundiais, segundo estimativas divulgadas pelo IPCC (2007a), com base em observações e análise dos locais de armazenagem de CO₂ existentes, sistemas naturais, e sistemas e modelos técnicos, é muito provável que a fração retida em depósitos selecionados e geridos adequadamente exceda a 99% em 100 anos e provavelmente ultrapasse 99% em 1000 anos.

Com relação aos riscos locais são avaliados dois cenários de fuga. O primeiro caso, as falhas nos poços de ingestão ou a fuga ascendente em poços abandonados poderiam criar uma repentina e rápida liberação de CO₂. Neste caso os riscos afetam principalmente os trabalhadores que estão nas proximidades do local onde se produziu a liberação e aqueles que são chamados para controlar a erupção.

Em um segundo cenário, o vazamento pode se dar através de falhas ou fraturas que não tenham sido detectados, ou através de poços com perdas onde a filtração para a superfície é mais gradual e difusa. Neste caso, os riscos afetam principalmente aquífero de água potável e os ecossistemas nos quais o CO₂ se acumula na zona situada entre a superfície e a parte superior do lençol freático. As águas subterrâneas podem ser afetadas tanto diretamente pela fuga de CO₂ em um aquífero como pela salmoura que penetra no aquífero, como resultado de seu deslocamento por CO₂ durante o processo de injeção. Neste cenário, pode haver acidificação do solo e uma mudança oxigênio no solo. Além disso, se as fugas para a atmosfera ocorrem em áreas de baixa altitude, com pouco vento, ou em sumidouros e bases rochosas localizadas sobre esses vazamentos difusos, causaria danos a vidas humanas e de animais.

Segundo o IPCC (2007a), os métodos de monitoramento disponíveis são promissores, mas é necessário mais experiência para o estabelecimento de níveis de detecção e resolução. Uma vez que os vazamentos são detectados, você pode usar algumas técnicas de saneamento disponíveis para parar ou controlar. De acordo com o tipo de vazamento, essas técnicas podem incluir técnicas padronizadas, reparação de poços ou a remoção de CO₂ mediante a interceptação do vazamento em um aquífero subterrâneo de pouca profundidade.

Quanto aos riscos do método de armazenamento no fundo dos oceanos, segundo as avaliações do IPCC (2007a), a injeção de algumas Gt de CO₂ produziria uma mudança significativa na química da região oceânica afetada, enquanto que a injeção de centenas de Gt de CO₂ produziria mudanças muito maiores na região receptora que acabaria por causar mudanças maiores em todo volume oceânico. Ainda não foram realizadas experiências definitivas nos ecossistemas marinhos nas profundidades oceânicas, de modo que o que se tem são previsões de que estas intervenções repercutiriam com o aumento da concentração de CO₂ e o decréscimo do pH, porém ainda não se sabe o caráter destas repercussões, e tampouco foram estudadas formas de evitar os efeitos desfavoráveis desta repercussão ou mesmo como as espécies responderão a estas mudanças.

estimativa da concentração de carbono na atmosfera

Segundo estimativas realizadas em 2004, as emissões mundiais de carbono para o ano seguinte seriam de 7GtC/ano, com a previsão de que chegarão a 14 GtC/ano em 2055 (Costa, 2009 apud Pacala e Socolow, 2004).

No Sumário para Formuladores de Políticas do Quarto Relatório de Avaliação do GT1 do IPCC (IPCC,2007b), os avaliadores creditam o aumento da concentração de dióxido de carbono ao uso de combustíveis, mas também inferem que a mudança no uso do solo tem contribuído com uma parcela significativa para o problema (Tabela 1). Os resultados são apresentados em termos absolutos e de média com faixas de incerteza em intervalos e 90%, ou seja, existe uma probabilidade estimada de 5% de que estejam acima da média apresentada e de 5% de que estejam abaixo da faixa. Assim para uma estimativa média de emissões apresentada na forma 7,2 [6,9 a 7,5] Gt C a leitura a ser feita é de que para o dado apresentado há uma estimativa de 7,2 Gt C de emissões e que existem 5% de probabilidade de que seja menor do que 6,9 Gt C e 5% de probabilidade de que seja maior do que 7,5 Gt C. No estudo ora apresentado foram utilizadas apenas as médias divulgadas no relatório.

Referência	Entrada – Emissões (Gt C)			Entrada de Gás Carbônico
	Fósseis	Mudança Uso Terra	Total	(Gt CO ₂)
Década 90	6,4	1,6	8,0	29,4
2000 - 2005	7,2	1,6	8,8	32,3

Tabela 3 – Estimativas de Emissões de Carbono – Dados Preliminares de 2000 – 2005 e Dados de Mudança Uso da Terra com incertezas (Fonte: IPCC, 2007b)

Tomando como base as estimativas do Sumário para Formuladores de Políticas do Quarto Relatório de Avaliação do GT1 do IPCC (IPCC, 2007b) e as referências de que uma emissão de 1GtC (1 GtC = 1 Giga-tonelada de Carbono = 1 bilhão de toneladas de Carbono) corresponde a 3.67GtCO₂, foram estimadas as toneladas de CO₂ lançadas na atmosfera anualmente, sendo avaliado portanto em **32,3 Gt CO₂ anuais**, como mostrado na coluna “Entrada de Gás Carbônico(Gt CO₂)” da Tabela 1.

valoração do sequestro de carbono nos compartimentos Hídricos

Os métodos para transferência de carbono da atmosfera para a biosfera são diretos, mais simples e tradicionais e estão sendo largamente utilizados. Por isso mesmo já foram mapeados em termos de viabilidade e custos.

Em oposição, os métodos para captura para a hidrosfera ainda estão em fase de investigação e determinação de viabilidade, de modo que ainda carecem de estudos para que sejam aplicáveis em escala comercial.

Quanto ao sequestro de gás carbônico para a litosfera, envolve tecnologias diferenciadas para captura, transporte e armazenamento e o seu uso em escala comercial requer grandes investimentos. Assim, para esta forma de sequestro, os custos das principais opções e aplicações disponíveis, foram calculados pelo IPCC, em 2007 (IPCC, 2007a).

Não obstante, segundo reflexões do próprio IPCC (2007a), os valores referem-se unicamente ao preço de mercado, de modo não contabilizam os custos das externalidades, como os danos ao meio ambiente e outros custos sociais de caráter mais amplo relacionados a utilização do CCS.

Deste modo, o presente trabalho apropria-se dos valores de custos calculados pelo IPCC para o sequestro de CO₂ para a litosfera, e mais especificamente para as opções de armazenamento nas formações geológicas e no oceano, para traçar alguns cenários de viabilidade econômica.

Portanto, a partir de dados secundários colhidos nos relatórios do IPCC, sobre a entrada de carbono na atmosfera e os custos estimados de sequestro para a litosfera foi possível estimar o custo econômico para seqüestrar uma tonelada de CO₂ e a partir destes dados elaborar os cenários para sequestro de valores percentuais das atuais emissões, concluindo com as estimativas de valores para seqüestrar 1% das emissões atuais, que correspondem 0,32 Gt/CO₂, que foram estimados na casa de bilhões de dólares (12 ~ 29) dependendo da fonte de captação e do tipo de armazenamento, sem contar os custos ambientais associados.

Custos de Escala aplicados a diferentes fontes de alimentação

Tomando como base diferentes fontes de alimentação, ou origem industrial das emissões, a Tabela 2 apresenta os Custos de Escala para sequestro de CO₂ aplicados a cada uma delas. Na coluna “Custo de Escala” estão os dados disponibilizados pelo IPCC, representativos de custos para novas instalações em grande escala; enquanto que na coluna “Custo Médio” estão os valores adotados pelos autores deste trabalho:

Componentes do sistema	Custos de Escala ¹	Custo Médio ²
Captação de CO ₂ emitidos em uma usina de energia com carvão ou gás	15 - 75 U.\$ / t CO ₂ capturado (geral)	45 U\$/t CO ₂
Captação de CO ₂ emitida na produção de hidrogênio ou de amônia ou refino de gás	5 - 55 U\$ / t CO ₂ capturado (geral)	30 U\$/t CO ₂
Captação de CO ₂ emitido por outras fontes industriais	25 - 115 U\$ / t CO ₂ capturado (geral)	70 U\$/t CO ₂
Transporte	1 - 8 U\$ / t CO ₂ transportado (líquido)	4,5 U\$/t CO ₂
Armazenamento geológico	0,5 - 8 U\$ / t CO ₂ injetado (geral)	4,25 U\$/t CO ₂
Armazenamento geológico: acompanhamento e verificação	0,1 - 0,3 U\$ / t CO ₂ injetado	0,2 U\$/t CO ₂
Armazenamento Oceânico,	5 - 30 U. \$ / t CO ₂ injetado (geral)	17,5 U\$/t CO ₂
Mineral carbonatação (precipitação química)	50 - 100 U\$ / t CO ₂ mineralizado (líquido)	75 U\$/t CO ₂

Tabela 4 - Custos de Escala aplicados a diferentes fontes de alimentação ou de origem industrial para sequestro de CO₂ - (1) - Fonte: IPCC, 2007 / (2) Fonte: Autores.

Primeiro Cenário – Captação, Transporte por Gasodutos e Armazenamento Geológico (terra)

Itens avaliados	Custo mínimo U\$/t CO ₂	Custo máximo U\$/t CO ₂	Custo médio U\$/t CO ₂
Captação de CO ₂	15	75	45
Transporte	1	8	4,5
Armazenamento geológico	0,5	8	4,25
Armazenamento geológico: acompanhamento e verificação	0,1	0,3	0,2
TOTAL	16,6	91,3	53,95

Tabela 5 - Custos do Armazenamento Geológico por Captação de CO₂ emitidos em uma usina de energia com carvão ou gás - U\$/t CO₂

Itens avaliados	Custo mínimo U\$/t CO ₂	Custo máximo U\$/t CO ₂	Custo médio U\$/t CO ₂
Captação de CO ₂	5	55	30
Transporte	1	8	4,5
Armazenamento geológico	0,5	8	4,25
Armazenamento geológico: acompanhamento e verificação	0,1	0,3	0,2
TOTAL	6,6	71,3	38,95

Tabela 6 - Custos do Armazenamento Geológico por Captação de CO₂ emitida na produção de hidrogênio ou de amônia ou refino de gás - U\$/t CO₂

VALORAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO PARA A LITOSFERA

Itens avaliados	Custo mínimo U\$/t CO2	Custo máximo U\$/t CO2	Custo médio U\$/t CO2
Captação de CO2	25	115	70
Transporte	1	8	4,5
Armazenamento geológico	0,5	8	4,25
Armazenamento geológico: acompanhamento e verificação	0,1	0,3	0,2
TOTAL	26,6	131,3	78,95

Tabela 7 - Custos do Armazenamento Geológico por Captação de CO2 emitido por outras fontes industriais - U\$/t CO2

O gráfico 1 resume os cenários para o Armazenamento Geológico, como mostrado abaixo:

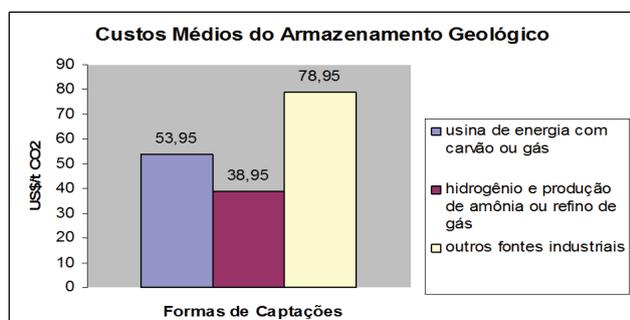


Gráfico 1 - Custos Médios do Armazenamento Geológico

Segundo Cenário – Captação, Transporte por Gasodutos e Armazenamento Oceano (mar)

Itens avaliados	Custo mínimo U\$/t CO2	Custo máximo U\$/t CO2	Custo médio U\$/t CO2
Captação de CO2	15	75	45
Transporte	1	8	4,5
Armazenamento Oceânico	5	30	17,5
TOTAL	21	113	67

Tabela 8- Custos do Armazenamento Oceânico por Captação de CO2 emitidos em uma usina de energia com carvão ou gás -U\$/t CO2

Itens avaliados	Custo mínimo U\$/t CO2	Custo máximo U\$/t CO2	Custo médio U\$/t CO2
Captação de CO2	5	55	30
Transporte	1	8	4,5
Armazenamento Oceânico	5	30	17,5
TOTAL	11	93	52

Tabela 9 - Custos do Armazenamento Oceânico por Captação de CO2 emitida na produção de hidrogênio ou de amônia ou refino de gás - U\$/t CO2

VALORAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO PARA A LITOSFERA

Itens avaliados	Custo mínimo U\$/t CO2	Custo máximo U\$/t CO2	Custo médio U\$/t CO2
Captação de CO2	25	115	70
Transporte	1	8	4,5
Armazenamento Oceânico	5	30	17,5
TOTAL	31	153	92

Tabela 10 - Custos do Armazenamento Oceânico por Captação de CO2 emitido por outras fontes industriais - U\$/t CO2

O gráfico 2 resume os cenários para o Armazenamento Geológico, como mostrado abaixo:

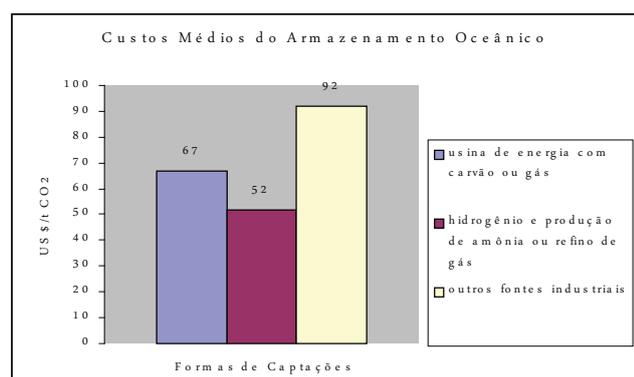


Gráfico 2 - Custos Médios do Sequestro Oceânico

Estimativa de Custos para seqüestro de 1% da concentração de CO2 na atmosfera por diferentes formas de armazenamento: geológico e oceânico

Em virtude da complexidade de redução de grandes volumes, cerca de 4,9 trilhões de dólares para redução de 32,3 Gt CO2, o presente trabalho apresenta um quadro de redução de 1% do volume total de emissões anuais, haja vista a magnitude das emissões por ano e de vários cenários para seqüestro de carbono, conforme apresentado a seguir:

Sequestro Geológico	Custos médios1 U\$/t CO2	Valor de 1% de CO22	Total US\$ para redução de 1%2
Usina de energia com carvão ou gás	54	323.000.000	17.442.000.000
Produção de hidrogênio ou de amônia ou refino de gás	39	323.000.000	12.580.850.000
Outras fontes industriais	79	323.000.000	25.500.850.000

Tabela 11 - Sequestro para Primeiro Cenário - Captação, Transporte por Gasodutos e Armazenamento Geológico - Fonte: IIPCC, 2007; dados mensurados pelos autores

Sequestro Oceânico	Custos médios1 U\$/t CO2	Valor de 1% de CO22	Total US\$ para redução de 1%2
Usina de energia com carvão ou gás	67	323.000.000	21.641.000.000
Produção de hidrogênio ou de amônia ou refino de gás	52	323.000.000	16.796.000.000
Outras fontes industriais	92	323.000.000	29.716.000.000

Tabela 12 - Sequestro para Segundo Cenário - Captação, Transporte por Gasodutos e Armazenamento Oceânico - Fonte: IIPCC, 2007; 2dados mensurados pelos autores

CONCLUSÕES

Dos Cálculos Realizados

Embora o meio ambiente seja o provedor dos recursos naturais, e se saiba que a valoração dos recursos naturais é condição indispensável para a introdução dos instrumentos econômicos quando se deseja atingir objetivos ambientais, este viés não foi contemplado nos cálculos apresentados. Esta lacuna se deve em grande parte às dificuldades em se estabelecer parâmetros de valoração ambiental aplicáveis a cada uma das fases do processo em curso (captação, transporte e armazenamento).

Dos Resultados Obtidos para estimativa de concentração

Os resultados obtidos para baseiam-se em dados coletados para anos anteriores, incluindo-se também as incertezas associadas aos valores relacionados às mudanças no uso da terra, o que deve ser revisto em razão da intensificação dos projetos agroindustriais de monoculturas em todo o planeta.

Dos Resultados Obtidos para valoração

Os resultados obtidos para valoração baseiam-se portanto em dados secundários, que embora de fontes confiáveis, carecem de atualização constante, além do que houve certa inferência dos autores no cálculo dos valores de custo médio, o que carece de estudos mais aprofundados.

Dos Limites e Possibilidades

Embora os resultados apresentem números bastante factíveis, devem-se ter certos cuidados na sua aplicação, como indicado abaixo:

Não foram avaliadas as variáveis ambientais, e portanto não foram considerados os aspectos da valoração dos sistemas naturais envolvidos. Como lembra Costa (2009), "várias análises reivindicam que os sistemas naturais possuem valor intrínseco não antropocêntrico e que espécies não humanas possuem interesses morais. Portanto, o enfoque econômico seria apenas parcial, e a chave para a valoração de um recurso estaria em estabelecer as mais diversas funções que o recurso possui".

Por ter sido elaborado por um grupo de técnicos de várias áreas é fruto de um consenso, o que o torna mais consistente em termos de agregar várias informações, mas

em contrapartida, e por esta mesma razão, contempla certo grau de subjetividade.

E, finalmente, vale ressaltar que o cálculo tem validade finita, precisa ser revisto periodicamente, pois novos métodos ou novas informações sobre os métodos disponíveis surgem a todo o momento, seja por novas pesquisas ou pela introdução de novas tecnologias.

REFERÊNCIAS

ANDI - Agência de Notícias dos Direitos da Infância - Projeto Mudanças Climáticas e Mídia. Disponível em <http://www.mudancasclimaticas.andi.org.br/sites-referencia>. Acesso em 13 de setembro de 2009

CEPAC – Centro de Excelência em Pesquisa sobre Armazenamento de Carbono, disponível em <http://www.pucrs.br/cepac/> . Acesso em 13 de setembro de 2009

CO2CRC - Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies, Disponível em <http://www.co2crc.com.au/>. Acesso em 26 de setembro de 2009

Costa, I.V.L. , Análise do potencial técnico do Sequestro de Geológico de CO₂ no setor petróleo no Brasil, Orientador: Roberto Schaeffer - Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, , Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009

IPCC - Working Group I; Climate Change 2007: The Physical Science Basis - Summary for Policymakers, Paris, February. 2007a.

IPCC - Grupo de Trabalho III – Mudança do Clima 2007: Mitigação da Mudança do Clima - Sumário para os Formuladores de Políticas - Quarto Relatório de Avaliação, Bancoc, Tailândia. 2007b. Tradução: Anexandra de Ávila Ribeiro.

Kimball, J. W. ; Online Biology Textbook, Disponível em <http://users.rcn.com/jkimball.ma.ultranet/BiologyPages/C/CarbonCycle.html>. Acesso em 26 de setembro de 2009

OPALC, Os Desafios para seqüestro de carbono na 61ª Reunião da SBPC. Disponível em http://www.opalc.org.br/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=3147 Acesso em domingo, 13 de setembro de 2009

Pereira, A. S.; Mudança Climática e Energias Renováveis. SBPC/Labjor – Brasil – 2002. Disponível em <http://www.comciencia.br/reportagens/clima/clima12.htm> . Acesso em 13 de setembro de 2009.

Tonon, R. O que é seqüestro de carbono?. Revista SUPERINTERESSANTE, Dezembro 2007 , Disponível em http://super.abril.com.br/superarquivo/2007/conteudo_556026.shtml. Acesso em 13 de setembro de 2009