

Incentivos econômicos e projeto de *supply chain* para captura e sequestro de carbono: caso Brasil

Ernesto del Rosario Santibañez Gonzalez**

**santibanez.ernesto@gmail.com, UFOP, Brasil

Resumo

Neste artigo, analisamos uma estratégia para reduzir as emissões de carbono que combina simultaneamente a criação de políticas de incentivo econômico e o desenvolvimento de uma infraestrutura de rede para captura e sequestro de carbono (CCS). Propomos um modelo de otimização linear inteira mista que considera aspectos técnicos e teóricos e permite analisar simultaneamente os efeitos de estabelecer preços para as emissões de carbono (*carbon tax*) em conjunto com uma estratégia de implementação de uma rede de *supply chain* para capturar, transportar e sequestrar CO₂ em reservatórios geológicos. Apresentamos resultados para o caso da indústria de cimento do Brasil usando CO₂ *tax* estabelecidas atualmente em outros países.

Palavras-chave

Captura e sequestro de carbono. Preço emissão carbono. Otimização linear. *Supply chain*.

1. Introdução

Neste artigo exploramos o impacto que as políticas de incentivos econômicos para redução da emissão de carbono na atmosfera têm sobre o desenvolvimento de uma infraestrutura de rede para a captura e sequestro de carbono (CCS). Com esse fim, propomos um modelo de otimização matemático que permite analisar simultaneamente os efeitos de uma política de preços para as emissões de carbono (*carbon tax*) em conjunto com uma estratégia de implementação de uma rede de *supply chain* que permita a captura, transporte e sequestro de CO₂. Apresentamos resultados para o caso da indústria de cimento do Brasil. A importância do artigo deriva de dois fatos largamente reconhecidos pela comunidade científica:

- a. A captura e sequestro de carbono é uma das estratégias propostas para mitigar o impacto econômico, ambiental e social da mudança climática. O projeto da rede de CCS é um problema de otimização complexo de resolver;
- b. Políticas de incentivo econômico para reduzir as emissões de carbono estão sendo implementadas em diferentes países com diferentes graus de progresso. Entre esses países podemos mencionar como exemplo Irlanda, Noruega, Suíça e Taiwan.

A mudança climática é uma das preocupações mais importantes que existem hoje para a comunidade mundial, pois é sabido que suas consequências vão além dos limites das empresas e fronteiras dos países, afetando a economia global, o meio ambiente e a saúde da população. Devido ao contínuo aumento das concentrações de carbono (CO₂) na atmosfera, o aquecimento global tem sido um dos temas multidisciplinares mais debatidos nos últimos tempos. Para resolver esse problema e alcançar níveis aceitáveis de CO₂ na atmosfera, os cientistas concordam na necessidade de implementar de forma conjunta três ações estratégicas de mitigação do CO₂: (1) melhorar a eficiência na geração de energia; (2) implantar fontes de energia com menores níveis de emissão de CO₂; e (3) capturar e sequestrar o carbono (*Carbon Capture and Storage* – CCS). Sem dúvida, o sucesso depende da implementação coordenada dessas três opções. Segundo Pacala & Socolow (2004), para reduzir as emissões de CO₂ em 3,7 Gt seria necessária a captura e sequestro de emissões de CO₂ equivalentes a um conjunto de plantas a carvão com capacidade para gerar 800 GW. Esse número é 2,5 vezes maior que a capacidade total de geração das plantas a carvão dos

Estados Unidos, considerando 2010 como ano base (Energy Information Administration, 2011).

Em forma sucinta, o problema geotecnológico de captura e sequestro de CO₂ consiste de três estágios básicos: (a) captura de CO₂ desde diferentes fontes de emissão (por exemplo, plantas geradoras de eletricidade a base de carvão, gás ou petróleo; empresas produtoras de cimento, de aço ou de ferro; refinarias, entre outras fontes); (b) comprimir e transportar o CO₂ capturado; e (c) finalmente injetar e sequestrar o CO₂ em diferentes reservatórios geológicos (por exemplo, aquíferos salinos localizados a grandes profundidades na terra, poços de petróleo ou de gás esgotados, poços no oceano a grande profundidade). É necessário mencionar que existem tecnologias para realizar esse tipo de operação e também existem vários projetos – a diferentes escalas – operando em todo o mundo com diferentes graus de avanço. Por exemplo, os projetos de Estados Unidos, Holanda, Noruega, entre outros (Keating et al., 2011; Klock et al., 2010; Middleton & Bielicki, 2009a).

Este artigo explora o impacto econômico e a relação que existe entre estabelecer uma política de preços (imposto) para a emissão de carbono na atmosfera e as diversas variáveis associadas ao projeto de uma rede de *supply chain* (SC) – nos termos definidos por Klibi et al. (2010) – que permita a captura e sequestro (armazenamento) de CO₂ (PSC-CCS). O problema PSC-CCS é modelado com um Problema de Programação Linear Inteira Mista (MILP) e procuramos minimizar o investimento, os custos operacionais e de transporte e os impostos pagos pelas empresas como uma maneira de reduzir as emissões de CO₂ que vão para a atmosfera. Em alguns aspectos, a abordagem que usamos para modelar o problema PSC-CCS pode ser comparada às utilizadas para modelar problemas de localização de instalações e problemas de projeto de fluxo em rede (por exemplo, Melkote & Daskin, 2001). Relacionando esse problema (PSC-CCS) a outros problemas da literatura, tais como o problema de otimização de fluxo em redes com custo fixo e problemas de localização, podemos dizer que se trata de um problema da classe NP-*hard*, portanto, um problema de otimização combinatória difícil de resolver.

O problema de CCS tem sido estudado recentemente em forma individual sem conexão com políticas de incentivo econômico. As metodologias propostas por alguns autores visam resolver parcialmente o problema de CCS e em outros casos são desenvolvidas metodologias para resolver estudos de casos específicos (por exemplo, (Massachusetts Institute of Technology, 2007)). Alguns autores também propuseram o uso de modelos matemáticos em forma integrada com sistemas de informação para resolver as complexidades

do problema de CCS (por exemplo, Middleton et al., 2012). Apesar disso, ainda é pouca a pesquisa em modelos matemáticos que considerem a complexidade real de um problema de projeto da rede de *supply chain* para CCS. A solução do problema deve considerar aspectos como: várias fontes de emissão de carbono, diversos caminhos alternativos para o transporte do CO₂ capturado a partir de uma fonte até um reservatório, várias alternativas de tubos para o transporte de CO₂ com dimensões diferentes, várias alternativas de locais geológicos (reservatórios) para sequestro de CO₂, investimentos que podem ser feitos em um horizonte de planejamento de vários anos, limitações sobre o número de plantas de captura de CO₂ a instalar, limitações sobre o número de reservatórios para ativar, incerteza sobre a capacidade de armazenamento de CO₂ dos reservatórios disponíveis, entre outros fatores.

Quanto à questão da CCS em conexão com políticas de incentivo econômico, como algumas das mencionadas previamente, existe ainda pouca literatura disponível. Kuby et al. (2011) recentemente abordaram o problema, estendendo os trabalhos apresentados por Middleton & Bielicki (2009a, b). O modelo proposto em nosso artigo considera e estende em alguns aspectos essas pesquisas. Para validar o modelo proposto, realizamos um estudo de caso da indústria de cimento no Brasil.

Observe-se que o problema estudado neste artigo torna-se ainda de maior relevância no cenário em que governo e indústria discutem a implementação de um imposto sobre as emissões de CO₂ como uma das estratégias para mitigar os efeitos da mudança climática.

Podemos dizer que este artigo apresenta duas contribuições importantes: (i) Propõe um modelo MILP que relaciona o estabelecimento de uma política de preço para as emissões de carbono na atmosfera com uma estratégia de captura e sequestro de carbono. O modelo permite avaliar o impacto de limitar a quantidade de plantas que podem ser instaladas para capturar CO₂ e também o número de reservatórios de CO₂ que podem ser abertos. De acordo com nosso conhecimento, não existem na literatura modelos MILP que integrem esses fenômenos como um projeto da rede de *supply chain* para CCS; (ii) Analisar e validar o modelo MILP proposto para diferentes cenários de preço. Usamos dados reais para o caso hipotético de mitigação das emissões de carbono na indústria de cimento em alguns estados do Brasil.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Na seção 2 apresentamos uma revisão da literatura relacionada com este artigo. A seção 3 apresenta a formulação matemática do problema. O estudo de caso da indústria de cimento do Brasil é apresentado na seção 4. Os resultados obtidos no estudo de caso

são discutidos na seção 5. Finalmente, na seção 6 são apresentadas as conclusões da pesquisa.

2. Revisão da literatura

As pesquisas sendo desenvolvidas neste tema podem ser classificadas em dois grandes grupos:

2.1. Políticas de incentivo econômico

Políticas de incentivo econômico estão orientadas para a desmotivação das emissões de carbono na atmosfera mediante o estabelecimento de um custo adicional para o emissor. Basicamente, para reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera, na literatura, existem dois tipos de políticas de incentivo econômico reguladas pelo mercado (Furman et al., 2007):

a. Estabelecer um imposto – chamado de CO₂ tax – sobre as emissões de CO₂. Nesse caso, o governo estabelece um custo pela emissão de uma tonelada de CO₂ na atmosfera. Esse sistema também é conhecido como Pigouvian tax, em homenagem ao economista que foi o primeiro a propor esse mecanismo. O conceito é que o produtor ou consumidor paga um imposto equivalente ao dano social de emitir o carbono na atmosfera. Como consequência da imperfeição do mercado, esse custo social é difícil de calcular (Yohe et al., 2007). Neste artigo não nos propomos discutir a forma de determinar esse custo social e consideramos, como referência para nosso estudo, os impostos estabelecidos em outros países. Os produtores (por exemplo, indústria geradora de energia, refinarias, produtores de cimento etc.), com base nesse imposto (preço), decidem o volume de CO₂ que vão emitir (reduzir) na atmosfera. Em 1991, a Noruega implementou o imposto e tem um dos mais antigos projetos funcionando com essa política (Massachusetts Institute of Technology, 2011). Trata-se do projeto de exploração de gás natural da empresa Statoil Sleipner West que desde 1996 captura e sequestra cerca de 1 milhão de toneladas de CO₂ por ano (Mt CO₂/ano). Segundo a International Energy Agency – IEA (2005), os ingressos gerados por esse imposto para a Noruega no ano de 2004 foram de US\$ 1,3 bilhão (base 2010). Além da Noruega, existem outros países que também têm implementado essa política com distintos graus de progresso, por exemplo, Irlanda e Taiwan.

b. Estabelecer um sistema *cap-and-trade*. Nesse outro caso, o governo emite quotas permitidas de emissão de CO₂ e estabelece um mecanismo de comercialização dessas quotas, no qual empresas compram e vendem os créditos (quotas) para emissão de carbono. Assim, empresas que desejam emitir carbono devem comprar parte dessas quotas (ou ações) ao preço que o mercado estabelece. Com esse sistema estão

operando, por exemplo, o Acid Rain Program, nos Estados Unidos, que tem como fim reduzir as emissões de dióxido de enxofre, e o European Union Emissions Trading Scheme, destinado a reduzir as emissões de carbono.

2.2. Captura e sequestro de carbono

Vários autores têm pesquisado o problema de modelar e resolver a captura e sequestro de carbono, dando ênfase a alguns aspectos do problema de forma isolada, quer para simplificar a solução ou para resolvê-lo em forma separada e posteriormente integrar os demais fatores na análise. Com uma ênfase diferente da encontrada em estudos anteriores, formulamos o problema como um problema de projetar uma rede de *supply chain* para CCS. Para resumir as pesquisas, sem a pretensão de discutir todas elas, podemos classificá-las da seguinte forma:

2.2.1. Modelos seguindo a metodologia de avaliação econômica de projetos de investimento

Essas pesquisas têm contribuído para entender a complexidade técnica envolvida no projeto, como também a complexa estrutura de custos associada a ele. Encontramos pesquisas com metodologias para avaliar topologias de rede simples (Figuras 1 e 2), focadas na avaliação técnica e econômica de um projeto de investimento para resolver o problema de transporte e injeção do CO₂. As figuras mostram uma rede ligando fontes de emissão de CO₂ (círculos de cor azul com tamanhos diferentes para refletir o volume de emissões de CO₂, o que também se aplica às outras instalações), locais intermediários (quadrados amarelos) e reservatórios potenciais (triângulos verdes). O termo topologia de rede é usado neste artigo para descrever as diferentes ligações físicas entre as fontes, reservatórios e pontos intermediários. Por exemplo, em MIT CCSTP (Massachusetts Institute of Technology, 2007, 2009) a metodologia considera as fontes e

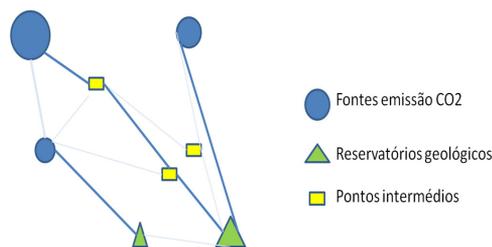


Figura 1. Topologia rede de *supply chain* CCS conexão direta fonte-reservatório.

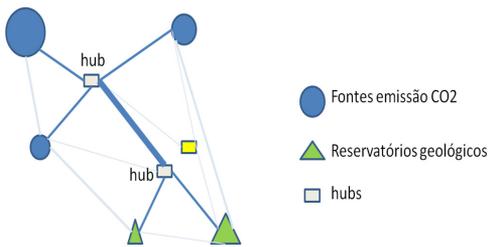


Figura 2. Topologia rede de *supply chain* CCS conexão fonte-reservatório através de *hubs*.

reservatórios potenciais para o sequestro de CO₂, métodos para o cálculo do diâmetro dos tubos que devem ser usados e resolve o problema do projeto da rede supondo rotas diretas de conexão entre as fontes e locais para sequestro de CO₂. Portanto, a construção e instalação de tubos entre fonte e reservatório dependem da quantidade máxima que pode ser sequestrada no destino (ou capturada na fonte). Uma vez calculados os custos de instalação, construção, transporte e operação, bem como um horizonte de planejamento, em seguida é avaliado economicamente o projeto de investimento, calculando-se, por exemplo, o valor presente líquido (VPL) e a taxa de rentabilidade financeira do investimento (TIR). Nesse tipo de trabalho o foco não está na proposta de um modelo matemático que considere simultaneamente os vários aspectos do problema já mencionados anteriormente. Por exemplo, a combinação de diferentes soluções viáveis de caminhos para ligar cada par fonte-reservatório utilizando diferentes tipos de tubos. Em Energy (2010), descrevem-se e pesquisam-se o uso de topologias de rede de transporte de CO₂ um pouco mais complexas para resolver o problema de projeto da rede (por exemplo, Figura 2). Eles definem uma rota central com alta capacidade de transporte entre dois pontos chamados *hubs*; um desses pontos está localizado perto das fontes e é o ponto que coleta o CO₂ que vem dessas fontes; o outro ponto, intermediário, localiza-se perto dos reservatórios para sequestro de CO₂. Nesse problema, eles decidiram construir um *pipeline* de alta capacidade de transporte de CO₂ entre os pontos *hubs*. Cada uma das fontes será conectada diretamente ao *hub* mais próximo através de dutos de menor capacidade de transporte de CO₂. O mesmo procedimento é realizado pelo lado dos reservatórios de destino. O impacto econômico entre essas topologias de rede simples e outras que resultam de uma abordagem mais complexa, como as que apresentaremos a seguir, foi estudado, por exemplo, por Kuby et al. (2011). Essa pesquisa estabelece que os custos totais de uma topologia de rede simples

podem ser várias vezes superiores aos custos de uma topologia de rede de *supply chain* otimizada.

2.2.2. Modelos de Programação Linear Inteira

Nesse grupo, as pesquisas consideram o uso de Programação Linear (LP) e modelos MILP para resolver o problema da definição da rede de tubos, com suas várias dimensões e capacidades, que irão capturar o CO₂ desde as fontes e transportar esse CO₂ para destinos onde finalmente será armazenado. Neste artigo continuamos essa linha de pesquisa.

Middleton & Bielicki (2009b) propuseram um MILP para modelar e resolver o problema parcialmente, considerando alguns dos aspectos que definimos anteriormente. Eles descrevem um sistema de informação de infraestrutura escalável – chamado SimCCS – que usa um modelo MILP para a otimização geoespacial e econômica do projeto de rede de CCS. O MILP proposto pelos autores determina a infraestrutura de rede de dutos que deve ser construída e operada para capturar, transportar e sequestrar um volume preestabelecido de CO₂. O modelo é estático, ou seja, não considera um horizonte de planejamento, e também é determinístico, porque não considera a incerteza em qualquer aspecto do problema. O modelo permite decidir as fontes de captura de CO₂ que vão ser ativadas, os reservatórios nos quais vai ser injetado e sequestrado CO₂ e a quantidade, onde construir a rede de tubos (ou seja, que caminhos da rede básica vão ser usados) e a capacidade (diâmetro) de cada tubo. A otimização da função objetivo determina quais serão os custos de investimento, construção, operação e transporte para um nível de captura de CO₂ preestabelecido. Esse mesmo modelo foi apresentado e aplicado pelos mesmos autores para resolver um problema de projeto da rede de CCS hipotético no estado da Califórnia, EUA (Middleton & Bielicki, 2009a). Nesse artigo, são considerados 12 possíveis fontes de emissão de CO₂ (plantas geradoras de energia, refinarias de petróleo e fábricas de cimento), e dois locais com potencial para sequestro de CO₂ (poços de petróleo e gás esgotados). Os autores não entregaram detalhes sobre os tempos computacionais necessários para resolver o modelo.

Keating et al. (2011) apresentaram resultados para um estudo de caso nos Estados Unidos em uma área entre o noroeste de Colorado e o nordeste de Utah. Eles propuseram o uso de três ferramentas de forma integrada: (a) uma para estimar a capacidade de armazenamento de CO₂ dos reservatórios potenciais (chamada de CO₂-PENS); (b) outra para o cálculo das emissões de CO₂ provenientes de diferentes fontes (chamada CLEAR); e (c) o sistema SimCCS, que já foi explicado anteriormente. O modelo MILP original

proposto por Middleton & Bielicki (2009b) não foi alterado. Um ponto interessante desse trabalho é que considera o impacto que a incerteza na capacidade de armazenamento de CO₂ dos reservatórios tem sobre a infraestrutura da rede de *supply chain*. Essa incerteza foi analisada usando o método de Monte Carlo com a ferramenta de CO₂-PENS.

Middleton et al. (2012) melhoraram em vários aspectos o modelo MILP apresentado por Kuby et al. (2011) e Middleton & Bielicki (2009b). Essa nova versão melhorada do modelo considera que os investimentos em infraestrutura são realizados ao longo de um horizonte de planejamento. O modelo melhorado também considera a construção de vários poços (com capacidade máxima) para cada reservatório potencial de armazenamento de CO₂ e a possibilidade de instalação de várias unidades de captura de CO₂ para cada fonte de emissão de CO₂. O novo modelo é testado para um caso de redução das emissões de CO₂ em uma área geográfica do Texas que sedia um conjunto de nove fontes de emissão de CO₂ e três possíveis reservatórios para o armazenamento. Utilizou-se um horizonte de planejamento de 50 anos. Os autores usaram CPLEX versão 12.2 para resolver o estudo de caso, em um computador PC de 3.16 GHz, demoraram 8.092 s para obter uma solução com um *gap* de 0,12%.

Morbee et al. (2012) propuseram um MILP para resolver o problema de planejamento de uma rede de tubos que é capaz de transportar o CO₂ capturado a partir de fontes de emissão para reservatórios de destino onde ele será armazenado. O objetivo é minimizar o custo atualizado dos investimentos nos dutos que serão instalados em um horizonte de planejamento preestabelecido. Para reduzir a complexidade do problema a resolver, essencialmente a quantidade de fontes e reservatórios potenciais, como também as rotas possíveis, os autores propõem algumas heurísticas que são aplicadas antes da solução do MILP. Para resolver um estudo de caso na Europa, o modelo é programado em GAMS, usando como otimizadores CPLEX 12.2 e, como alternativa, XPRESS 20.0.

Os trabalhos de Van den Broek et al. (2010) e Strachan et al. (2011), à diferença dos já mencionados, combinam o uso de sistemas de informação geográfica e modelos de planejamento energético baseados na Programação Linear. Os modelos não consideram otimizar a natureza combinatória das soluções viáveis para a topologia da rede, ao invés disso, as soluções viáveis de topologias de redes são preestabelecidas e os custos avaliados. Van den Broek et al. (2010) apresentaram a aplicação de ArcGis e MARKAL (Market Allocation) para o planejamento de uma rede de infraestrutura em grande escala de captura e

sequestro de CO₂ nos Países Baixos, considerando um período entre 2010 e 2050. Já Strachan et al. (2011) descreveram o uso dos modelos de planejamento da energia MARKAL e TIMES para um problema de projeto de infraestrutura da rede de CCS na região de Utsira. As fontes de emissão de CO₂ estão localizadas em países como Alemanha, Dinamarca, Holanda, Noruega e Reino Unido. O horizonte de planejamento utilizado para o estudo foi 2010-2050.

Os modelos de Klock et al. (2010) e Han & Lee (2011) propõem maximizar uma função de lucro associada ao projeto da rede de CCS. Klock et al. (2010) apresentaram um modelo MILP para maximizar o valor presente líquido da receita gerada pela recuperação de petróleo e a economia realizada pelo não pagamento de multas relacionadas com CO₂. O modelo considera o investimento em infraestrutura e os custos de operação ao longo do tempo para otimizar a rede de transportes. É um modelo dinâmico – considera um horizonte de planejamento – e determinístico. Observe-se que esse modelo inclui os benefícios econômicos da utilização da técnica de recuperação de petróleo (EOR – *enhanced oil recovery*). Essa técnica considera a injeção de CO₂ em poços de petróleo em operação, permitindo melhorar a viscosidade do petróleo e, portanto, aumenta a quantidade de petróleo recuperado (barris de petróleo por ano). Os autores aplicam esse modelo para resolver um estudo de caso na Noruega, considerando um total de cinco fontes de emissão de CO₂, 14 aquíferos e dois poços de petróleo. Os resultados ótimos foram obtidos em 496 s usando o otimizador XPRESS versão 19.00 em um computador HP Compaq Intel Celeron de 2.4 GHz. Han & Lee (2011) propuseram um MILP para resolver um problema de CCS com algumas variações interessantes sobre os modelos apresentados até então. Nesse caso eles modelaram variáveis de localização diferenciando entre indústria, planta e tipo de produção de cada planta. O modelo também considera a localização de diferentes tipos de instalações para a captura de CO₂ e, finalmente, modela a possibilidade de capturar o CO₂ em diferentes estados físicos. O modelo resolve o problema de otimização da rede de *supply chain* da CCS com o objetivo de maximizar os lucros anuais. O modelo é determinístico e estático (sem horizonte de planejamento). Esse modelo foi aplicado a um caso da Coreia; GAMS/CPLEX 9.0 foi utilizado para obter os resultados em um computador Pentium 4 de 3.16 GHz.

Kuby et al. (2011) apresentaram um modelo MILP que considera o custo da emissão de CO₂ para a indústria através de um imposto ou um sistema tipo *cap-and-trade*. Esse modelo amplia o MILP proposto previamente por Middleton & Bielicki (2009b), determinando explicitamente a quantidade

ideal de CO₂ que deve ser capturada desde as fontes emissoras, otimizando simultaneamente os vários outros componentes da infraestrutura de rede de CCS.

Neste artigo seguimos a linha de pesquisa dos autores Klock et al. (2010) e Kuby et al. (2011). Em resumo, podemos dizer sobre a pesquisa realizada até agora e mencionada neste artigo que o problema do projeto da rede de *supply chain* de CCS é resolvido por diferentes metodologias e chamado de diferentes formas. No entanto, só alguns autores abordam o problema de otimização do projeto da rede de *supply chain* de forma abrangente usando modelos tipo MILP. O problema em questão, do ponto de vista prático, é um dos mais importantes atualmente, tendo em conta os objetivos de redução das emissões de carbono e a consequente mitigação do aquecimento global da terra. O problema de otimização combinatória é complexo de resolver, e pela associação com outros problemas ele pode ser classificado como um problema NP-hard. Por outro lado, no contexto de mitigar a mudança climática é ainda pouco explorado o estudo de políticas de incentivo econômico, por exemplo, imposto às emissões de CO₂ na atmosfera em conjunto com uma estratégia de captura e sequestro de carbono. Nossa contribuição nesse sentido é propor um modelo MILP para resolver o problema do estabelecimento de preços das emissões em conjunto com o planejamento dos investimentos necessários para operar um sistema de captura e sequestro de carbono. O problema é modelado como a otimização do projeto da rede de *supply chain*, que considera o estabelecimento de preços para a emissão de carbono na atmosfera e os custos fixos e variáveis em um horizonte de planejamento preestabelecido e, ainda, com limitações na quantidade de plantas de captura que podem ser instaladas, como também no número de reservatórios que podem ser abertos.

3. Formulação matemática

O problema de estabelecer preços para as emissões de CO₂ e projetar uma rede de *supply chain* para a captura e sequestro de CO₂ pode ser definido da seguinte maneira: Seja N^{source} o conjunto de todas as fontes de CO₂; N^{sink} o conjunto de todos os lugares candidatos (reservatórios) onde é possível sequestrar CO₂; N o conjunto de todos os lugares candidatos (fontes de emissão, reservatórios, pontos intermédios) que podem fazer parte de um caminho de q ; Q o conjunto de todos os caminhos possíveis q que ligam uma fonte de CO₂ a um reservatório; E o conjunto de todas as ligações (arestas) $e = (i, j)$ onde $i, j \in N$; R o conjunto de todas as alternativas de tubo r caracterizado pelo seu diâmetro (capacidade). Note-se que N^{source} e N^{sink} são subconjuntos de N . Cada fonte

$i \in N^{source}$ tem uma capacidade de captura (oferta) K_i , e cada reservatório $j \in N^{sink}$ tem uma capacidade de sequestro K_j . Para que um caminho q , começando em i e terminando em j , seja viável, deve ocorrer que pelo menos um $i \in N^{source}$ e $j \in N^{sink}$; também os tubos r instalados nesse caminho q devem ter capacidade suficiente (K_r^{max}) para transportar um fluxo x_{ij} de CO₂ e um mínimo de capacidade operacional (K_r^{min}), e para todos os $i \in N^{source}$ e $j \in N^{sink}$ o fluxo total de i deve ser menor ou igual a K_i e o fluxo total chegando a j deve ser menor ou igual a K_j . Considere f_{ijr} o custo de instalação do tubo r em (i, j) ; f_i os custos fixos para instalar uma tecnologia de captura de CO₂ na fonte i (w_i); f_j os custos fixos da ativação de um reservatório j (w_j) para o sequestro de CO₂; c_{ij} o custo de transporte de CO₂ entre i e j ; c_i o custo de captura de CO₂ na fonte $i \in N^{source}$; c_j o custo de injetar e operar o reservatório $j \in N^{sink}$; p o preço (imposto) por tonelada de emissão de CO₂ na atmosfera. Observe também que em nosso problema queremos avaliar o impacto do preço p sobre a topologia da rede de *supply chain*, como também o impacto de limitar a quantidade de plantas de captura de CO₂ nas fontes (τ^{source}) e o número de reservatórios que podem ser ativados (τ^{sink}). O problema é encontrar, para um preço p preestabelecido, o volume de CO₂ que deve ser capturado e os caminhos viáveis p de menor custo de investimento, operação e transporte. Para colocar de outra maneira, desejamos encontrar para um preço p uma rede de *supply chain* de custo mínimo que seja capaz de capturar, transportar e armazenar CO₂.

No que se relaciona às variáveis de decisão, observe-se o seguinte:

- w_i é 1 se a planta de captura de CO₂ é instalada em $i \in N^{source}$, 0 caso contrário;
- w_j é 1 se um reservatório para armazenar CO₂ é aberto em $j \in N^{sink}$, 0 caso contrário;
- x_{ij} é o fluxo (Kt/ano) de CO₂ entre os pontos i e j ;
- y_{ijr} é 1 se um tubo de tipo r (diâmetro) é construído entre i e j , 0 caso contrário;

Matematicamente, podemos formular o problema como um problema de Programação Linear Inteira Mista (MILP) da seguinte forma:

Minimizar

$$\sum_{(i,j) \in E} \sum_{r \in R} f_{ijr} y_{ijr} + \sum_{i \in N^{source}} f_i w_i + \sum_{j \in N^{sink}} f_j w_j + \quad (1)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} \sum_{r \in R} c_{ijr} x_{ij} + \sum_{i \in N^{source}} c_i x_{ij} + \sum_{j \in N^{sink}} c_j x_{ij} + \sum_{i \in N^{source}} p(K_i - \sum_{(i,j) \in E} x_{ij}) \quad (2)$$

sujeito a

$$x_{ij} \leq \sum_{r \in R} K_r^{max} y_{ijr} \quad \forall (i, j) \in E \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq \sum_{r \in R} K_r^{min} y_{ijr} \quad \forall (i,j) \in E \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} \leq K_i w_i \quad \forall i \in N^{sour} \quad (5)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} \leq K_j w_j \quad \forall j \in N^{sink} \quad (6)$$

$$\sum_{r \in R} y_{ijr} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in E \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} = \sum_{(j,i) \in E} x_{ji} \quad \forall j \in [N - (N^{sour} \cup N^{sink})] \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N^{sink}} w_i \leq \tau^{sink} \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N^{sour}} w_i \leq \tau^{source} \quad (10)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in E \quad (11)$$

$$y_{ijr} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E, r \in R \quad (12)$$

$$w_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in (N^{sour} \cup N^{sink}) \quad (13)$$

Os termos da função objetivo minimizam os custos de investimento e construção (1) e os custos de captura, transporte e armazenamento de carbono mais o custo da emissão de CO₂ para a atmosfera (2). As restrições (3) e (4) garantem que o fluxo de carbono entre os dois pontos *i* e *j* é apenas possível se um tubo com capacidade suficiente é instalado e operado. A restrição (5) garante que as emissões totais capturadas em cada fonte sejam menores que a capacidade total de geração de carbono nessas fontes. A restrição (6) garante que a quantidade total de emissões de carbono armazenado no reservatório não exceda sua capacidade. A restrição (7) força para colocar como máximo um tipo de tubo para cada conexão. A restrição (8) reflete o equilíbrio do fluxo que deve existir em cada lugar que não seja fonte nem reservatório. A restrição (9) garante que seja aberto um número máximo de reservatórios para o armazenamento de CO₂. A restrição (10) garante que seja instalado um número máximo de plantas de captura de CO₂. O restante das restrições (11)-(13) são as restrições de variáveis binárias e não negativas. Observe-se que no caso da rede original contemplar conexões potenciais entre as fontes de emissão de CO₂, essa formulação requer agregar uma fonte artificial para cada fonte ligada com outra(s) fonte(s). Essa mesma observação é válida para os reservatórios. Observe-se também que no caso de ser preciso contabilizar o

efeito neto do custo de captura de CO₂ nas fontes emissoras será necessário introduzir uma variável adicional no problema. Nesse modelo, os custos de captura nas fontes são considerados conjuntamente com os custos de operação da passagem de CO₂ por fontes emissoras com plantas de captura instaladas.

Como pode ser observado, é provável que exista um preço *p* para o qual o volume de CO₂ seja zero. A interpretação para um resultado como esse é que para as empresas economicamente é mais barato pagar o preço (custo, imposto) das emissões de CO₂ e não investir em uma infraestrutura de rede para capturar, transportar e sequestrar carbono. Em nosso caso analisamos cenários para vários preços e observamos o impacto na rede.

A Figura 3 mostra uma rede inicial com diferentes opções de conexão entre as fontes de emissão de CO₂ (círculos de cor azul com tamanhos diferentes para refletir o volume de emissões de CO₂, também se aplica às outras instalações), locais ou pontos de transição (quadrados amarelos) e potenciais reservatórios (triângulos verdes). Os pontos de transição são potenciais locais que podem fazer parte do caminho *p* que liga fontes e reservatórios. Uma solução viável para o problema de projeto da rede de *supply chain* de captura e sequestro de CO₂ é mostrada na Figura 4. Note-se que as linhas azuis são de diferentes espessuras e estão unindo pontos diferentes, formando um

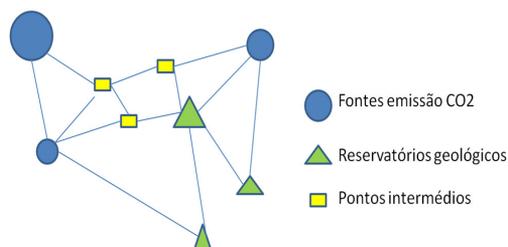


Figura 3. Exemplo da rede potencial para captura e sequestro de CO₂.

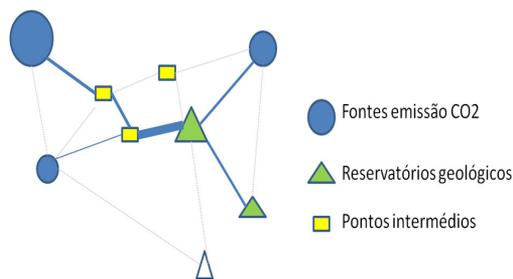


Figura 4. Uma solução viável para a rede *supply chain* da Figura 3.

caminho desde as fontes até os reservatórios para o armazenamento de CO₂. A espessura ilustra que os tubos estão aumentando seu diâmetro para transportar uma maior quantidade de CO₂.

4. Um estudo de caso: captura e sequestro de CO₂ na região sudeste do Brasil

Apresentamos a aplicação do modelo MILP proposto para a região sudeste do Brasil. Nosso interesse é analisar o desenvolvimento da rede *supply chain* para CCS em diferentes cenários de preços para as emissões de CO₂ da indústria de cimento, considerado globalmente um dos setores industriais que gera quantidades importantes de CO₂.

De acordo com dados publicados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento do Brasil – SNIC (2012), a indústria de fabricação de cimento do Brasil está formada por 14 grupos de negócios e um total de 79 fábricas distribuídas em vários estados do país. Segundo o mesmo SNIC, um total de 66,80 milhões de toneladas de cimento foi vendido entre junho de 2011 e maio de 2012. Em nosso estudo de caso, supomos fábricas com capacidade de produção média anual entre 800 mil toneladas (t) e 2,50 milhões de toneladas. Esses dados foram obtidos a partir de informações publicadas pelo SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2012).

Neste artigo, a região em estudo está composta pelos estados de Minas Gerais e região noroeste do estado de São Paulo, incluindo a Bacia do São Francisco e a parte oriental da bacia do Paraná. Nosso objetivo é responder à pergunta: para que valores de p é economicamente conveniente para as empresas pagar impostos e/ou investir em uma rede *supply chain* para a captura e sequestro de carbono gerado pelas fábricas de cimento localizadas nessa região?

As fontes de emissão de CO₂ correspondem a 10 plantas de fabricação de cimento. A capacidade de produção de cimento específica de cada fábrica considerada em nosso estudo foi atribuída aleatoriamente usando os dados de capacidade de produção média anual (entre 800 mil toneladas e 2,50 milhões de toneladas). Dados sobre o consumo de energia e emissões de CO₂ por tonelada de cimento produzido, fórmulas para a estimativa da capacidade da usina geradora de energia em cada planta, o investimento em instalações de captação, investimento na aquisição e construção de dutos, entre outros dados estão disponíveis com o autor. Consideramos um investimento de US\$ 2.310/kW (75% valor publicado em MIT CCSTP (Massachusetts Institute of Technology, 2007)). Os dados de investimento

e volume de emissão de CO₂ de cada planta são mostrados na Tabela 1.

Como alternativas para o sequestro de CO₂ foram identificados três reservatórios geológicos, no caso três aquíferos salinos: dois na bacia do São Francisco e um na bacia do Paraná, em Bauru. A capacidade total de armazenamento de CO₂ das diferentes bacias do Brasil é de 2.035 Gt (Rockett et al., 2011). A bacia do São Francisco possui 10% da capacidade total de armazenamento de CO₂ em aquíferos salinos, enquanto a do Paraná ultrapassa os 400 Gt. Para nosso estudo, assumimos uma capacidade muito menor, menos de 5% do total distribuído entre os reservatórios potenciais mencionados anteriormente. Os dados são mostrados na Tabela 2. Os tubos para transporte de CO₂ e outros dados são mostrados na Tabela 3. Observe-se que a capacidade de fluxo mínima do tubo de oito polegadas foi artificialmente reduzida para 400 kT por ano, caso contrário teríamos algumas plantas que não poderiam escoar o CO₂ capturado. Custos de investimento, operação e transporte foram obtidos a partir de várias fontes, por exemplo, Energy

Tabela 1. Fábricas de cimento: emissões de CO₂ e investimento em plantas de captura.

#	Planta	Emissões KtCO ₂ /ano	Investimento MUS\$
1	Arcos	828,1	47.443,2
2	Barroso	1.236,9	70.864,1
3	Carandai	672	38.500,0
4	Ijaci	1.415,4	81.090,6
5	Itaú de Minas	1.646,4	94.325,0
6	Matozinhos	1.243,2	71.225,0
7	Montes Claros	948,5	54.341,1
8	Pedro Leopoldo	1.652,7	94.685,9
9	Santa Luzia	1.480,5	84.820,3
10	Vespasiano	959	54.942,7

Tabela 2. Potenciais reservatórios: capacidade, profundidade e tipo.

Reservatório	Capacidade Kt CO ₂ /ano	Profundidade (m)	Tipo
São Francisco-1	10.000	800	Aquífero
São Francisco-2	16.000	800	Aquífero
Paraná-1	8.000	800	Aquífero

Tabela 3. Tipos de tubos, capacidades e custos usados no estudo de caso.

Diâmetro (polegadas)	Capacidade (min.) Kt/ano	Capacidade (máx.) Kt/ano	Custo MUS\$/km
8	1.000	2.000	400,0
12	1.600	4.000	600,0
16	3.200	8.000	800,0
20	6.400	12.000	1.000,0
24	9.600	20.000	1.200,0
30	16.000	36.000	1.500,0

(2010) e MIT CCSTP (Massachusetts Institute of Technology, 2007). Usamos para nosso estudo um horizonte de 25 anos, com os custos atualizados a uma taxa de juros de 10% aa.

A Figura 5 mostra a área de estudo, identificando as diferentes fontes e reservatórios potenciais. Note-se que há várias fábricas de cimento com menos de 40 km de distância entre elas e que, por causa da escala utilizada no mapa, não estão claramente diferenciadas. Por essa razão, a Figura 6 não está em escala e ilustra a rede de potenciais conexões que ligam diferentes fontes, lugares de transição e os potenciais reservatórios. Nesse tipo de projeto é normal definir uma função de custo que considere (e pondere de maneira diferenciada) o impacto dos diferentes fatores (por exemplo, o tipo de terreno, taxas de direito de passagem) no cálculo de construir os dutos para transporte de CO₂. Para simplificar a explicação do estudo de caso, poupamos ao leitor esses detalhes, embora o modelo proposto possa considerá-los.

Para facilitar a leitura do estudo de caso e visualizar as possíveis aplicações do modelo proposto, simplificamos alguns dados e detalhes técnicos que não afetam o objetivo principal deste artigo. Por exemplo, a compressão para atingir uma pressão de CO₂ necessária para o transporte (10MPa), queda de pressão durante o transporte, a injetividade do reservatório conforme determinado por condições geológicas (por exemplo, porosidade e espessura), a

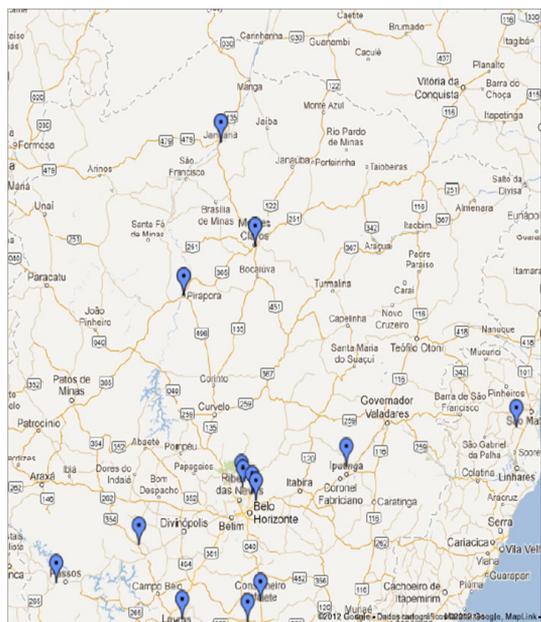


Figura 5. Área de estudo, considerando a localização das fábricas de cimento e dos reservatórios (construído usando www.googlemaps.com).

pressão de chegada do CO₂ no reservatório. Todas essas questões tecnológicas foram resolvidas e comentadas por outros autores (por exemplo, Middleton & Bielicki, 2009b) e podem ser incorporadas no modelo. Por exemplo, a queda de pressão de CO₂ durante o transporte pode ser resolvida com a instalação na rede, a cada certa quantidade de quilômetros, de estações *boosters*. Cada um dos custos que existem na fonte como no reservatório foram expressos em um único valor fixo e outro valor variável. Custos fixos incluem os custos de investimento em plantas de captura de CO₂, compressão, bombeamento e outras instalações. Para os custos fixos no reservatório também estão incluídos em um valor único as atividades de avaliação e sondagem, os custos de perfuração, construção, repressurização e bombeamento para cada poço, entre outros. O modelo permite que esses custos possam ser divididos e analisados em detalhe caso seja necessário.

5. Análise dos resultados para o estudo de caso

O modelo proposto foi programado em GAMS e foi usado CPLEX 12.3 (parâmetros e configuração padrão) como otimizador. Todos os resultados foram obtidos em menos de 1 s usando um PC i5 de 2.3 GHz e 3 Gb RAM. A Tabela 4 apresenta os tempos computacionais para o cenário A. Como poderá ser observado, esses tempos são similares aos tempos (menos de 1s) obtidos por Han & Lee (2011) para um problema de captura e sequestro de carbono com diferentes instâncias.

Com o objetivo de ilustrar os resultados do modelo, avaliamos dois cenários (A e B) para diferentes preços

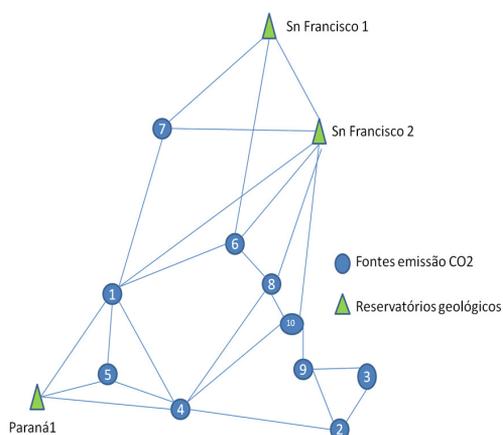


Figura 6. Rede básica apresentando localização de fábricas de cimento, possíveis reservatórios geológicos e conexões potenciais entre os pontos.

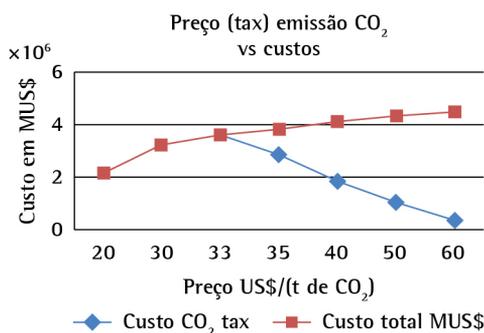
Tabela 4. Cenário A: valores de CO₂ capturado, custo total da solução, custo de emissões não capturadas para diferentes valores de p (CO₂ tax).

Preço US\$/tCO ₂	CO ₂ capturado Kt/ano	Custo total MUS\$ (z*)	Custo CO ₂ MUS\$	Solução Relaxação Linear (z _{rl})	Gap %	Tempo segs
20	0	2.174.886,0*	2.174.886,0	2.174.886,0	0	0,015
30	0	3.262.329,0	3.262.329,0	3.180.257,37	2,6	0,078
33	0	3.624.810,0	3.624.810,0	3.281.939,37	10,4	0,125
35	3.061,0	3.848.358,8	2.886.700,0	3.349.727,37	14,9	0,234
40	6.906,2	4.079.742,0	1.863.500,0	3.485.303,37	17,1	0,187
50	9.734,3	4.369.297,1	1.056.800,0	3.695.783,88	18,2	0,124
60	11.410,7	4.490.467,2	362.880,0	3.756.263,88	19,5	0,047

(p) sobre as emissões de CO₂ não capturado por ano (US\$/t): entre 20,0 e 60,0.

- Cenário A: O número máximo de plantas de captura que podem ser instaladas e reservatórios que podem ser ativados foi limitado a três.
- Cenário B: A quantidade máxima de reservatórios que podem ser ativados é limitada a um.

A Tabela 4 apresenta os resultados para o cenário A e para o intervalo de preços US\$ 20-60/t. Para ilustrar os resultados, os preços estão identificados na primeira coluna, as colunas seguintes mostram o volume de CO₂ capturado em Kt/ano, o custo total em milhares de US\$ (z*), o custo total pago (MUS\$) pelas emissões de CO₂ não capturadas, o custo obtido pela solução de relaxação linear do modelo MILP, o gap ótimo ($100*(z^*-z_{rl})/z_{rl}$) e o tempo computacional em segundos (segs) para achar a solução ótima (z*). Por exemplo, para um preço de US\$ 35/tCO₂ observamos que o total de CO₂ capturado é de 3,061 milhões de toneladas por ano, o projeto de implementação e operação da rede *supply chain* para CCS tem um custo total de MUS\$ 3.848.358,8 e o custo das emissões de CO₂ não capturadas é de MUS\$ 2.886.700,0. A solução de relaxação linear (z_{rl}) é de MUS\$ 3.349.727,37, o gap ótimo é de 14,9%. Pode-se dizer que para um preço (*tax*) menor ou igual que US\$ 33/tCO₂ resulta conveniente para as empresas pagarem esse custo pelas emissões e não capturarem CO₂. Observe-se que todos os tempos computacionais são menores que 1 segundo. O gap máximo é de 19,5%, o qual indica que a solução de relaxação linear está longe da solução ótima inteira. Observe-se também que o gap vai aumentando em relação ao preço e tem o mesmo comportamento crescente do volume de CO₂ capturado. Isto pode ser explicado por a complexidade da rede de captura e sequestro ir também aumentando com o preço, pois aumentam as alternativas para ligar diferentes fontes de emissão, reservatórios para sequestrar CO₂ e dutos para construir. Vale observar que existem outros problemas classificados como *NP-hard* que são resolvidos em menos de 1 segundo usando CPLEX e um computador de características similares ao

Figura 7. Gráfico preço p para emissão de CO₂ não capturado vs. Custo total e Custo impostos.

usado neste trabalho, por exemplo, o problema de localização de instalações combinado com árvores de Steiner (Gollowitzer & Ljubić, 2011).

Como era de esperar, pode-se observar na Figura 7 que quanto maior é o preço p (*tax*) por tCO₂ emitido e não capturado, a tendência é que as empresas implementem uma rede *supply chain* para CCS, diminuindo com isso o custo pago pelas emissões de CO₂ não capturadas. Por exemplo, para um preço $p = US\$ 60/tCO_2$, o custo pago pelas emissões não capturadas é de MUS\$ 362.880,0, muito menor que o valor pago quando $p = US\$ 35/tCO_2$. Na Figura 8 observa-se que quanto maior é o preço p , maior o volume de CO₂ capturado por ano. A quantidade de CO₂ capturado é zero para preços entre US\$ 20 e 33/t.

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam um detalhe da evolução da topologia da rede *supply chain* para CCS para diferentes valores de p . Observe-se que quanto maior o preço da tonelada de CO₂ não capturado mais aumenta em complexidade a topologia da rede *supply chain*. Por exemplo, na Figura 9, quando $p = US\$ 35/tCO_2$, a rede de *supply chain* está constituída por duas plantas de captura de CO₂ instaladas nas fábricas 4 e 5, é aberto o reservatório Paraná 1 (13) e as plantas são ligadas diretamente a esse reservatório com dutos de oito polegadas. Já quando $p = US\$ 60/tCO_2$ (Figura 10), a rede cresce para nove plantas de captura de CO₂ instaladas (só a

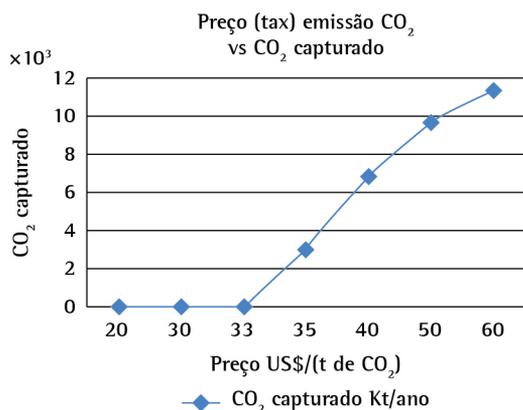


Figura 8. Gráfico preço p para emissão de CO₂ não capturado vs. CO₂ capturado.

Tabela 5. Cenário A: $p = \text{US\$ } 35/\text{KtCO}_2$ – plantas de captura e tubulação instalada, fluxo e transporte de CO₂.

Captura de planta w_i	CO ₂ capturado Kt/ano	Conexão y_{ij}	Diâmetro tubo (polegadas)	Fluxo KtCO ₂ /ano x_{ij}
4	1.415,4	4-13	8	1.415,4
5	1.646,4	5-13	8	1.646,4
Total	3.061,8			

Tabela 6. Cenário A: $p = \text{US\$ } 50/\text{KtCO}_2$ – plantas de captura e tubulação instalada, fluxo e transporte de CO₂.

Captura de planta w_i	CO ₂ capturado Kt/ano	Conexão y_{ij}	Diâmetro tubo (polegadas)	Fluxo KtCO ₂ /ano x_{ij}
1	828,1	1-13	8	828,1
4	1.415,4	4-13	8	1.415,4
5	1.646,4	5-13	8	1.646,4
6	1.243,2	6-12	8	1.243,2
7	948,5	7-12	8	948,5
8	1.652,7	8-12	8	1.652,7
9	1.041,0	9-10	8	1.041,0
10	959,0	10-12	8	2.000,0
Total	9.734,3			

Tabela 7. Cenário A: $p = \text{US\$ } 60/\text{KtCO}_2$ – plantas de captura e tubulação instalada, fluxo e transporte de CO₂.

Captura de planta w_i	CO ₂ capturado Kt/ano	Conexão y_{ij}	Diâmetro tubo (polegadas)	Fluxo KtCO ₂ /ano x_{ij}
1	828,1	1-13	8	828,1
2	1.236,9	2-4	8	1.236,9
4	1.415,4	4-13	12	2.652,3
5	1.646,4	5-13	8	1.646,4
6	1.243,2	6-12	8	1.243,2
7	948,5	7-12	8	948,5
8	1.652,7	8-12	8	1.652,7
9	1.480,5	9-10	8	1.480,5
10	959,0	10-12	12	2.439,5
Total	11.410,7			

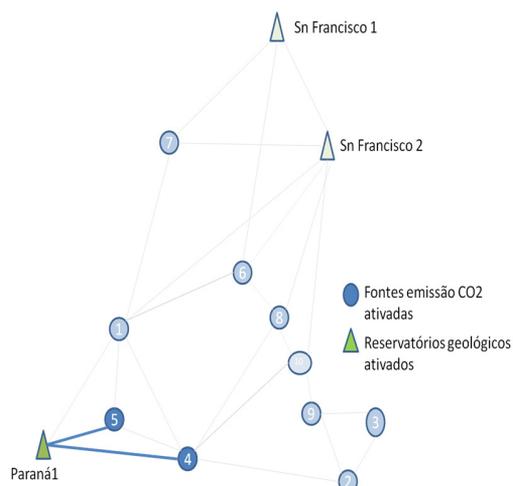


Figura 9. Cenário A: $p = \text{US\$ } 35/\text{tCO}_2$ – rede supply chain de CCS.

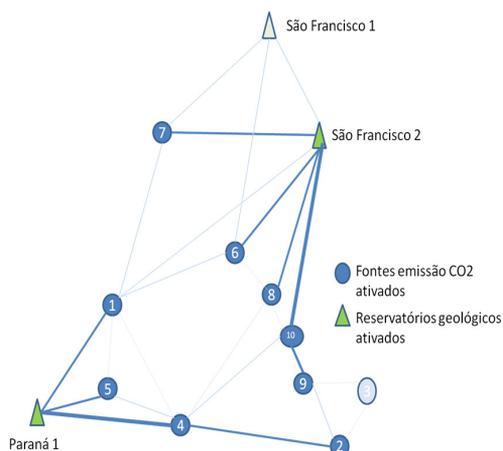


Figura 10. Cenário A: $p = \text{US\$ } 60/\text{tCO}_2$ – rede supply chain de CCS.

fábrica 3 não tem planta instalada e portanto todo o CO₂ vai direto para a atmosfera). São ativados dois reservatórios: São Francisco 2 (12) e Paraná 1 (13) e são formadas 2 sub-redes para capturar o CO₂ desde nove (de 10) fábricas de cimento. Observe-se também que foi necessário usar tubos de 12 polegadas para alguns trechos.

A Figura 11 ilustra graficamente para $p = \text{US\$ } 60/\text{tCO}_2$ a participação de cada fábrica no volume total de CO₂ capturado, transportado e armazenado. Para ilustrar, observe que a planta 5 (cor verde) proporciona 17% do total de CO₂ capturado. Já a Figura 12, para o mesmo valor de p , ilustra para cada fábrica de cimento quanto CO₂ é capturado (cor azul) sobre o total de CO₂ emitido pela fábrica (cor vermelha). Observe-se que para todas

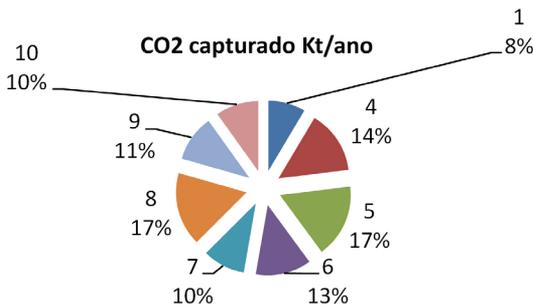


Figura 11. Cenário A: $p = \text{US\$ } 60/\text{tCO}_2$ – gráfico de participação de cada fábrica sobre o total de CO_2 capturado.

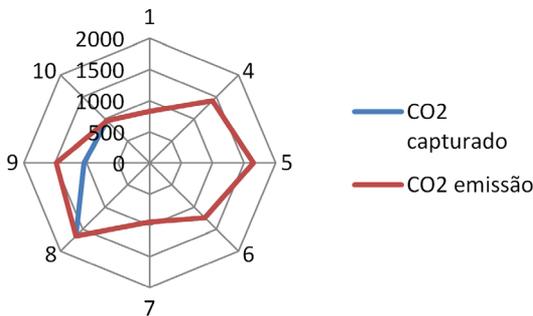


Figura 12. Cenário A: $p = \text{US\$ } 60/\text{tCO}_2$ – gráfico de emissão e captura de CO_2 para cada fábrica com planta de captura instalada.

Tabela 8. Cenário B: valores de CO_2 capturado, custo total da solução e custo de emissões não capturadas para diferentes valores de p (CO_2 tax).

Preço $\text{US\$}/\text{tCO}_2$	CO_2 capturado Kt/ano	Custo total MUS\$	Custo CO_2 MUS\$
50	7.844,4	4.812.283,8	1.907.200,0
60	9.734,3	5.035.843,1	1.268.100,0

as fábricas com plantas de captura de CO_2 instaladas é capturado, transportado e armazenado o total das emissões de CO_2 , exceto para a fábrica 9, na qual só 70% do CO_2 é capturado.

Para o cenário B, a Tabela 8 mostra como exemplo os resultados obtidos para um preço $p = \text{US\$ } 60/\text{tCO}_2$. O custo total é de MUS\$ 5.035.843,1, representando um aumento de 12% sobre o custo obtido (MUS\$ 4.490.467,2) para o cenário A e mesmo valor de p . O custo de emissão de CO_2 não capturado teve um forte aumento. Nesse cenário, o custo é de MUS\$ 1.268.100,0, representando um aumento de 250% sobre o valor pago no cenário A (MUS\$ 362.880,0). Esse aumento é explicado por o total de CO_2 capturado por ano ser de 9.734,3 Kt, diminuindo 15% em relação ao valor capturado no cenário A (11.410,7 Kt CO_2 /ano). Para um $p = \text{US\$ } 50/\text{tCO}_2$, observamos que os valores de custo total, custo de

Tabela 9. Resultados computacionais para instâncias geradas aleatoriamente.

τ^{sink}	Rede de 29 nós		Rede de 68 nós	
	z^*	t(segs)	z^*	t(segs)
2	8.684.688,9	0,359	-	-
3	7.974.037,7	0,218	-	-
5	7.712.227,6	0,577	26.089.340,2	1,170
8	7.712.227,6	0,203	24.861.027,2	1,467
10	7.712.227,6	0,483	24.487.893,6	0,858

emissão de CO_2 não capturado e CO_2 capturado são, respectivamente, MUS\$ 4.812.283,8, MUS\$ 1.907.200,0 e 7.844,4 Kt CO_2 /ano. Comparando-se esses valores com aqueles obtidos no cenário A, captura-se menos CO_2 e os custos são maiores. Finalmente, observe-se que a quantidade de CO_2 capturado para o cenário B com $p = \text{US\$ } 60/\text{tCO}_2$ é a mesma capturada para o cenário A com $p = \text{US\$ } 50/\text{tCO}_2$. A diferença nos valores pagos em ambos cenários pelas emissões de CO_2 não capturadas é resultado da diferença entre os valores de p . Concluímos que limitar a quantidade de reservatórios que podem ser ativados pode resultar em maiores custos de implementação da rede *supply chain* de CCS e em maiores custos também pelas emissões de CO_2 não capturadas.

5.1. Simulações adicionais

Com o objetivo de analisar o tempo computacional gasto pelo CLPEX na solução do problema MILP com instâncias de maior tamanho foram geradas aleatoriamente duas novas redes de 29 e 68 nós (a rede original tem um total de 13 nós). As redes foram geradas usando o método *locality* com os seguintes parâmetros: área quadrada = 1.000; radio = 120. O método gera um grafo conexo tal que a distância máxima entre dois nós conectados é de 120 (Zegura et al., 1997). Para essas novas redes foram usados os mesmos parâmetros e coeficientes de custo do caso base de estudo. Para as duas redes, o número de fontes emissoras que podem ser abertas não foi restringido. Para a primeira rede de 29 nós usamos τ^{sink} (número máximo de reservatórios que podem ser abertos) = 10 e para a rede de 68 nós usamos $\tau^{\text{sink}} = 11$. As 10 instâncias foram geradas para o cenário A com preço $p = \text{US\$ } 60$, pois com esse preço, no caso base, a rede de captura e sequestro de carbono resultou mais complicada de resolver. Para as duas redes, o valor da solução ótima (z^*) obtido e o tempo computacional (segs) para cada instância são mostrados na Tabela 9. Para a rede de 68 nós foram rodadas as instâncias de $\tau^{\text{sink}} = 5, 8$ e 10. Observamos que os tempos computacionais continuam a se manter abaixo de dois segundos, tempos comparáveis

aos obtidos na resolução de algumas instâncias de problemas de captura e sequestro de carbono (por exemplo, Han & Lee, 2011). Vale a pena também comentar que para algumas instâncias do problema NP-*hard* de localização combinado com árvore de Steiner o CPLEX teve um comportamento similar em termos de tempo computacional (Gollowitzer & Ljubić, 2011).

6. Conclusões e trabalho futuro

Neste artigo estudamos em forma integrada duas estratégias propostas pela comunidade científica para mitigar os efeitos das alterações climáticas no mundo: o estabelecimento de preços para as emissões de CO₂ na atmosfera e o problema de captura e sequestro de carbono. Para estudar e analisar as relações entre ambas propomos um modelo de otimização baseado na Programação Linear Inteira Mista, que considera aspectos técnicos e econômicos, para resolver simultaneamente o estabelecimento de preços e o desenvolvimento de uma rede para a captura, transporte e sequestro de CO₂ em reservatórios geológicos. O problema de otimização é considerado NP-*hard* e teoricamente difícil de resolver. Para validar o potencial de aplicação da metodologia proposta, usamos um estudo de caso da indústria de cimento do Brasil. Em particular, analisamos como muda frente a diferentes preços o projeto da rede *supply chain* para CCS para fábricas de cimento localizadas em uma área entre o noroeste do estado de São Paulo e o estado de Minas Gerais, incluindo potenciais reservatórios geológicos (aquíferos salinos) localizados na zona oriental da bacia do Paraná e da bacia do São Francisco. Apresentamos resultados para diferentes preços sobre as emissões de CO₂/ano não capturadas, variando entre US\$ 20 e 60/tCO₂. Propomos dois cenários de análise para cada um desses preços. Como era de se esperar, verificamos que um aumento no preço do CO₂ não capturado é uma motivação para que as fábricas desenvolvam infraestrutura de rede *supply chain* para CCS cada vez mais complexa, reduzindo com isso as emissões de CO₂ na atmosfera e também reduzindo o custo dessas emissões. Também observamos que limitar o número de reservatórios que podem ser ativados pode ter como consequência, para um mesmo preço, um aumento das emissões de CO₂ na atmosfera e um aumento importante nos custos pagos pelas empresas. As plantas para captura de CO₂ e os custos de construção de dutos representam itens importante no custo total de implementar redes *supply chain* para CCS. Pesquisas futuras deveriam avaliar diferentes estruturas de custos para esses itens e como podem

essas topologias da rede ser impactadas pelos preços das emissões de CO₂ na atmosfera.

Referências

- Energy, E. (2010). *CO₂ Pipeline Infrastructure: An analysis of global challenges and opportunities*. Cambridge.
- Energy Information Administration - EIA. (2011). *Electric Power Annual 2010*. EIA. Retrieved from <http://www.eia.gov/electricity/capacity/>.
- Furman, J., Bordoff, J. E., Deshpande, M., & Noel, P. J. (2007). *An Economic Strategy to Address Climate Change and Promote Energy Security*. Hamilton Project Strategy Paper.
- Gollowitzer, S., & Ljubić, I. (2011). MIP models for connected facility location: A theoretical and computational study. *Computers & Operations Research*, 38(2), 435-449. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2010.07.002>
- Han, J.-H., & Lee, I.-B. (2011). Development of a Scalable and Comprehensive Infrastructure Model for Carbon Dioxide Utilization and Disposal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(10), 6297-6315. <http://dx.doi.org/10.1021/ie200344t>
- International Energy Agency. (2005). *Energy Policies of IEA Countries - Norway- 2005 Review*. Retrieved from <http://www.iea.org/>.
- Keating, G. N., Middleton, R. S., Stauffer, P. H., Viswanathan, H. S., Letellier, B. C., Pasqualini, D., Pawar, R. J., & Wolfsberg, A. V. (2011). Mesoscale carbon sequestration site screening and CCS infrastructure analysis. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 215-22. <http://dx.doi.org/10.1021/es101470m>
- Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 283-293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.011>
- Klokk, Ø., Schreiner, P. F., Pagès-Bernaus, A., & Tomasgard, A. (2010). Optimizing a CO₂ value chain for the Norwegian Continental Shelf. *Energy Policy*, 38(11), 6604-6614. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.031>
- Kuby, M. J., Bielicki, J. M., & Middleton, R. S. (2011). Optimal Spatial Deployment of CO₂ Capture and Storage Given a Price on Carbon. *International Regional Science Review*, 34(3), 285-305. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.185>
- Kuby, M. J., Middleton, R. S., & Bielicki, J. M. (2011). Analysis of cost savings from networking pipelines in CCS infrastructure systems. *Energy Procedia*, 4, 2808-2815. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.185>
- Massachusetts Institute of Technology - MIT. (2007). Carbon Capture and Sequestration Technologies Program - CCSTP. *MIT CO₂ Pipeline Transport and Cost Model Version 1*. Boston.
- Massachusetts Institute of Technology - MIT. (2009). Carbon Capture and Sequestration Technologies Program - CCSTP. *Carbon Management GIS: CO₂ Pipeline Transport Costs Estimation*. Boston.
- Massachusetts Institute of Technology - MIT. (2011). Carbon Capture and Sequestration Technologies - CCS TECHNOLOGIES. *Sleipner Fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage Project*. Retrieved from <http://sequestration.mit.edu/tools/projects/sleipner.html>.

- Melkote, S., & Daskin, M. S. (2001). Capacitated facility location-network design problems. *European Journal of Operational Research*, 129, 481-495. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00464-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00464-6)
- Middleton, R. S., & Bielicki, J. M. (2009a). A comprehensive carbon capture and storage infrastructure model. *Energy Procedia*, 1(1), 1611-1616. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.211>
- Middleton, R. S., & Bielicki, J. M. (2009b). A scalable infrastructure model for carbon capture and storage: SimCCS. *Energy Policy*, 37(3), 1052-1060. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.049>
- Middleton, R. S., Kuby, M. J., Wei, R., Keating, G. N., & Pawar, R. J. (2012). A dynamic model for optimally phasing in CO₂ capture and storage infrastructure. *Environmental Modelling & Software*, 37, 193-205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.04.003>
- Morbee, J., Serpa, J., & Tzimas, E. (2012). Optimised deployment of a European CO₂ transport network. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 7, 48-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.11.011>
- Pacala, S., & Socolow, R. (2004). Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science*, 305(5686), 968-72. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1100103>
- Rockett, G. C., Machado, C. X., Ketzner, J. M. M., & Centeno, C. I. (2011). The CARBMAP project: Matching CO₂ sources and geological sinks in Brazil using geographic information system. *Energy Procedia*, 4, 2764-2771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.179>
- Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC. (2012). Retrieved from <http://www.snic.org.br/>.
- Strachan, N., Hoefnagels, R., Ramírez, A., van den Broek, M., Fidje, A., Espegren, K., Seljom, P., Blesl, M., Kober, T., & Grohnheit, P. E. (2011). CCS in the North Sea region: A comparison on the cost-effectiveness of storing CO₂ in the Utsira formation at regional and national scales. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(6), 1517-1532. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.08.009>
- Van Den Broek, M., Brederode, E., Ramírez, A., Kramers, L., Kuip, M., Wildenborg, T., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2010). Designing a cost-effective CO₂ storage infrastructure using a GIS based linear optimization energy model. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1754-1768. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.015>
- Yohe, G. W., Lasco, R. D., Ahmad, Q. K., Arnell, N. W., Cohen, S. J., Hope, C., Janetos, A. C., & Perez, R. T. (2007). Perspectives on climate change and sustainability. In: M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. Van Der L. & Hanson, C. E. (Ed.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 811-841). University Cambridge. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Zegura, E. W., Calvert, K. L., & Donahoo, M. J. (1997). A quantitative comparison of graph-based models for Internet topology. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(6), 770-783. <http://dx.doi.org/10.1109/90.650138>

Agradecimentos

O autor agradece aos revisores anônimos pelos úteis comentários e sugestões. Agradeço também o apoio parcial da FAPEMIG, CNPq e UFOP.

Price incentive for developing a carbon capture and storage supply chain network: a Brazilian case study

Abstract

In this study, we analyze a strategy to reduce carbon emissions that combines the creation of an economic incentive policy and the deployment of a network infrastructure for carbon capture and storage (CCS). We propose a mixed-integer linear optimization model that integrates technical and economic aspects and allows simultaneous analysis of the effects of establishing a price for carbon emissions (i.e., a carbon tax) and a strategy for developing a supply chain network that can capture, transport and sequester CO₂ in geological reservoirs. We present the results for a case study of the Brazilian cement industry using a CO₂ tax currently established in other countries.

Keywords

Carbon capture and storage. Carbon emission price. Linear optimization. Supply chain.