



**OPÇÕES DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)  
EM SETORES-CHAVE DO BRASIL**

**ANÁLISE DE CO-BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DE ESTRATÉGIAS DE BAIXO  
CARBONO**

**Coordenação Geral:**

Alexandre Szklo

André Lucena

Roberto Schaeffer

**Equipe Técnica:**

Francielle Carvalho

Joana Portugal Pereira

Mariana Império

Rio de Janeiro

Maio de 2017

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Interações entre Poluentes Atmosféricos e o Clima.....	6
Figura 2 – Interações Múltiplas entre Processos Químicos na Troposfera, Ciclos Biogeoquímicos e o Sistema Climático.....	6
Figura 3 – Integração entre os Modelos MSB8000 e GAINS-Brasil.....	9
Figura 4 – Planilhas de Atividade do GAINS .....	16
Figura 5 – <i>Upload</i> de Dados no GAINS .....	16
Figura 6 – Planilha de Estratégia de controle do GAINS.....	17
Figura 7 – Opções para Visualização de Resultados no GAINS.....	18
Figura 8 – Exemplo de Gráfico de Resultado Exibido no Modelo .....	18
Figura 9 – Emissões de SO <sub>2</sub> para os Cenários Avaliados (LB, BC0 e BC50) .....	32
Figura 10 – Emissões de SO <sub>2</sub> e GEE no período de 2015-2050 <sup>8</sup> .....	33
Figura 11 – Emissões de NO <sub>x</sub> para os Cenários Avaliados (LB, BC0 e BC50) <sup>8</sup> .....	34
Figura 12 – Emissões de GEE e NO <sub>x</sub> no Período de 2015-2050 <sup>8</sup> .....	35
Figura 13 – Emissões de PM <sub>10</sub> para os Cenários Avaliados (LB, BC0 e BC50) <sup>8</sup> .....	36
Figura 14 – Emissões de GEE e PM <sub>10</sub> no Período de 2015-2050 <sup>8</sup> .....	37

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	II
APRESENTAÇÃO.....	4
1 COBENEFÍCIOS AMBIENTAIS: MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E MELHORIA DE QUALIDADE DO AR.....	5
2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	8
2.1 Cenários de referência e de baixo carbono .....	9
2.1.1 <i>Cenário LB</i> .....	9
2.1.2 <i>Cenários BC</i> .....	10
2.2 Modelo Greenhouse Gas – Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS) .....	11
2.2.1 <i>Descrição e dados do modelo</i> .....	11
2.2.2 <i>Criação e edição de cenários no GAINS: princípios gerais e definições</i> ....	13
2.2.3 <i>Agregação de dados de energia no GAINS</i> .....	19
2.2.4 <i>Aplicações</i> .....	25
2.3 Desenvolvimento da plataforma GAINS-Brasil.....	27
2.4 Indicadores de cobenefícios de qualidade do ar .....	28
3 RESULTADOS .....	31
3.1 Emissões de SO <sub>2</sub> .....	31
3.2 Emissões de NO <sub>x</sub> .....	33
3.3 Emissões de PM <sub>10</sub> .....	35
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	38
REFERÊNCIAS .....	40

## **Apresentação**

O Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) firmaram, em 2012, acordo de cooperação técnica visando à implementação do Projeto de Cooperação Técnica “Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Setores-Chave do Brasil”, que tem por objetivo ajudar o governo brasileiro a reforçar a sua capacidade técnica de apoiar a implementação de ações de mitigação de emissões de GEE nos principais setores da economia (indústria, energia, transporte, residencial e serviços, LULUCF, gestão de resíduos e alternativas intersetoriais) no Brasil (incluindo custos), de acordo com o Plano Nacional sobre Mudança do Clima e a estratégia brasileira definida no Acordo de Paris sobre mudança do clima (Contribuições Nacionalmente Determinadas – NDC).

O presente relatório constitui o produto associado à terceira etapa do projeto, que tem por objetivo avaliar cobenefícios ambientais locais, em termos de qualidade do ar e poluição atmosférica, de cenários de mitigação de GEE. Trata-se de identificar em que medida os cenários denominados de baixo carbono (BC) levariam a cobenefícios em termos de emissões de poluentes atmosféricos locais.

Assim, este documento compreende a metodologia adotada para a construção do modelo GAINS-Brasil, síntese de resultados obtidos, assim como implicações para a implementação de políticas de baixo carbono e adoção de tecnologias limpas, previamente identificadas em análises anteriores deste projeto. Após uma introdução sobre o conceito de cobenefícios ambientais e descrição dos indicadores ambientais selecionados (capítulo 1), segue-se ao procedimento metodológico (capítulo 2), incluindo a descrição dos cenários de referência e de baixo carbono avaliados, assim como a estrutura do modelo GAINS, parâmetros de entrada do modelo e adaptações realizadas para que este seja representativo do contexto brasileiro. Em seguida, apresentam-se os parâmetros de saída do modelo e analisam-se indicadores ambientais em termos de poluição atmosférica local (capítulo 3). Conclui-se este relatório com considerações finais e análise crítica das limitações do presente estudo (capítulo 4).

## **1 Cobenefícios ambientais: mitigação de gases de efeito estufa e melhoria de qualidade do ar**

As fases preliminares do projeto foram responsáveis pela construção de diferentes cenários de mitigação de GEE que consideram a implementação de diferentes medidas e políticas para a redução de emissões de GEE. Apesar de seus benefícios serem observados globalmente e no longo prazo, essas medidas podem ainda ser consideradas como barreira ao desenvolvimento econômico (RAFAJ et al., 2013). Contudo, sua implementação pode promover, além da mitigação da mudança climática, inúmeras vantagens em nível local e no curto prazo, resultando, por exemplo, em melhorias da qualidade do ar, ecossistemas e economia (NEMET et al., 2010). Esses efeitos associados são conhecidos como cobenefícios.

Dentre os cobenefícios mais importantes das medidas de mitigação das mudanças climáticas, podem-se citar os associados à melhoria da qualidade do ar em meios urbanos e seus impactos positivos na saúde humana e nos ecossistemas. Embora não sejam questões usualmente avaliadas em conjunto, a poluição atmosférica local e as mudanças climáticas estão fortemente relacionadas por processos químicos, radiativos e dinâmicos na atmosfera (Figura 1)(US EPA, 2009). Os GEE e poluentes atmosféricos têm fontes comuns e interagem na atmosfera, provocando uma série de efeitos interconectados no meio ambiente em nível local, regional e global (THAMBIRAN; DIAB, 2011). Essa sinergia ocorre em ambas as direções, e sua compreensão representa um desafio para a comunidade científica por envolver uma série de processos biológicos, físicos e químicos (Figura 1 e Figura 2) (US EPA, 2009).

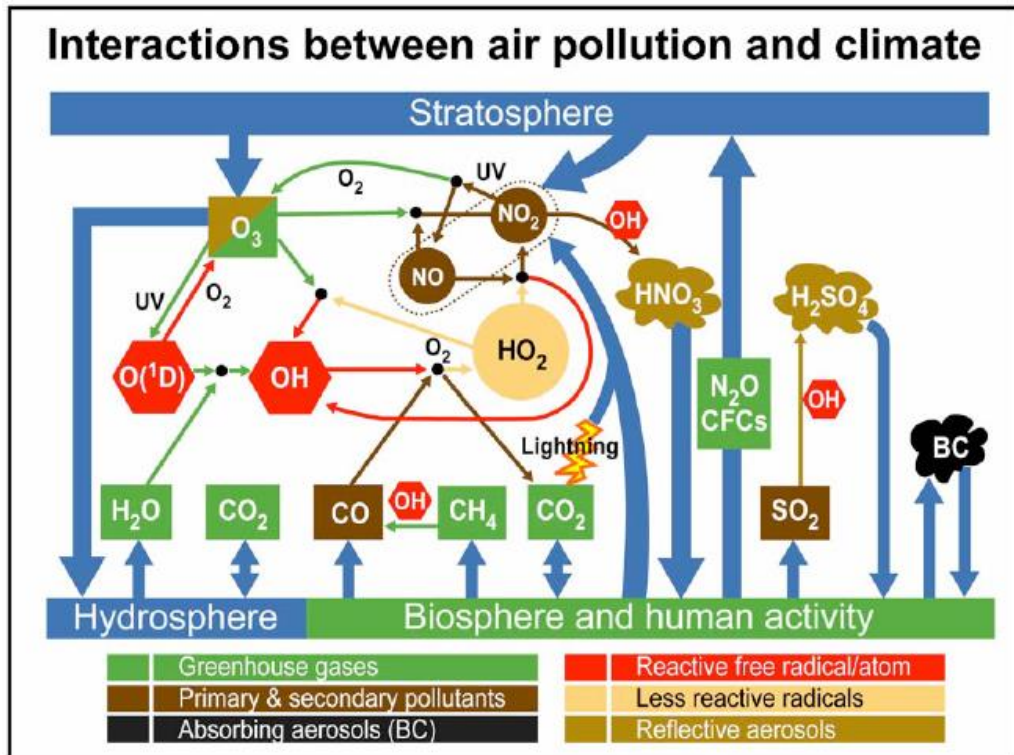


Figura 1 – Interações entre Poluentes Atmosféricos e o Clima

Fonte: 21STCENTURYTECH, 2012

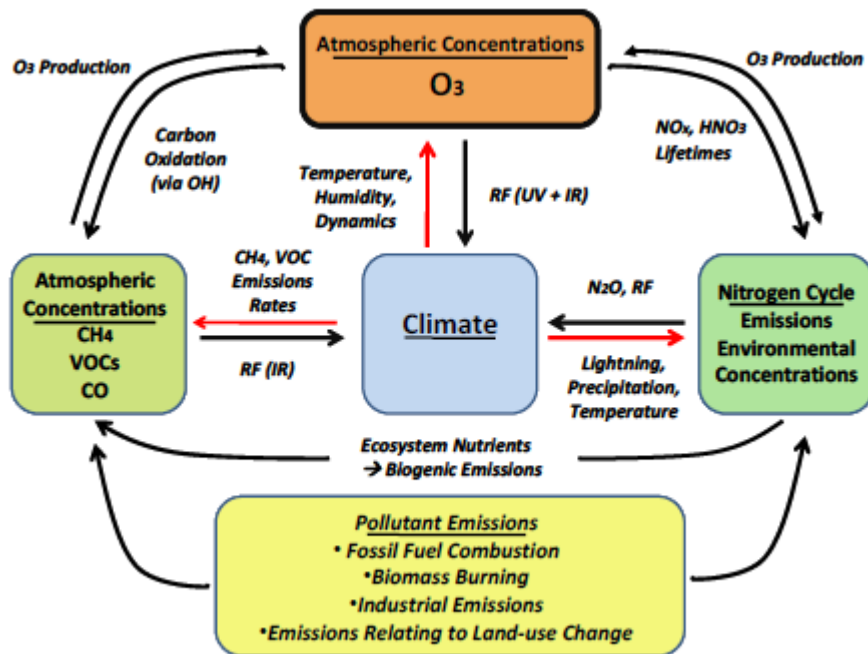


Figura 2 – Interações Múltiplas entre Processos Químicos na Troposfera, Ciclos Biogeoquímicos e o Sistema Climático

Fonte: US EPA, 2009

Diversos poluentes atmosféricos alteram o forçamento radiativo, contribuindo não somente com o aquecimento (pela emissão de carbono negro e metano, por exemplo), mas também com resfriamento da atmosfera (pela emissão de dióxido de enxofre, que produz aerossóis sulfato). A poluição atmosférica também compromete o funcionamento dos sistemas naturais e agrícolas, alterando o crescimento das culturas vegetais, o ciclo do carbono e do nitrogênio, entre outros (RADU et al., 2016). Por outro lado, as mudanças climáticas também influenciam a poluição atmosférica local, provocando mudanças meteorológicas, no regime de ventos e na precipitação, e alterando transformações químicas, transporte, distribuição, dispersão e deposição de poluentes atmosféricos (BYTNEROWICZ et al., 2007).

Por essas razões, políticas climáticas são capazes de reduzir a poluição atmosférica local e regional de modo a dispensar ou minorar investimentos em tecnologias para controle da poluição, diminuindo seus custos de abatimento. Todavia, existe uma diferença na escala temporal e espacial dos efeitos das medidas de mitigação climática e poluição atmosférica local. Enquanto a última tem impactos locais em curto prazo, a primeira tem impactos globais só percebidos no longo prazo. Assim, os resultados dos esforços para controle da poluição atmosférica são percebidos mais rapidamente do que no caso das mudanças climáticas, que requerem um longo período de tempo pra alcançar benefícios globais (SMITH et al., 2014). Nesse sentido, torna-se pertinente avaliar os benefícios colaterais da implementação de medidas de baixo carbono, relativamente à melhoria de qualidade do ar no Brasil. Mesmo que algumas tecnologias de baixo carbono apresentem custo de implementação superior às tecnologias convencionais, as vantagens de curto prazo em escala local podem justificar *per se* a sua implementação.

## 2 Procedimento metodológico

Nas primeiras fases do projeto, foram elaborados cenários de mitigação de GEE, em que foi possível observar a difusão de diversas tecnologias de baixo carbono. Para isso, foi desenvolvido o modelo Message Brasil (denominado neste estudo de MSB8000),<sup>1</sup> que tem por objetivo a otimização do sistema energético sob a ótica do menor custo e horizonte de longo prazo.

O MSB8000 tem duas fontes de informação: oferta e demanda de energia. A demanda de energia útil é proveniente dos modelos setoriais e é tratada como um dado exógeno ao MSB8000. As instalações energéticas (oferta de energia) são consideradas pelo modelo como opções tecnológicas, escolhidas em ordem de menor custo, para garantir o mínimo custo total do sistema em cada cenário. O MSB8000 é composto pelas cinco regiões geográficas brasileiras – Sul, Sudeste, Norte, Nordeste e Centro-Oeste –, mais uma região denominada Brasil. O ano-base é 2010, e o horizonte de análise vai até 2050, com detalhamento a cada cinco anos. A sazonalidade é mensal, e a curva de carga diária é de 24 horas. O modelo conta com cerca de oito mil tecnologias, sendo mais de 300 tecnologias de baixo carbono.

Nesta etapa do projeto, buscam-se avaliar os cobenefícios ambientais locais decorrentes dos resultados obtidos na etapa anterior de modelagem integrada do sistema energético, por meio de uma simulação no modelo GAINS-Brasil. O procedimento metodológico para a realização da análise de cobenefícios compreende uma compatibilização dos resultados obtidos na modelagem integrada, para que esses dados sirvam de entrada (*input*) no modelo GAINS-Brasil. Alguns esforços de compatibilização incluem agregação de resultados do MSB8000, passando de seis regiões para apenas uma região Brasil no GAINS, e agregações de segmentos industriais. Note-se que a desagregação do GAINS não segue aquela do MSB8000.

O principal resultado do modelo energético que alimenta o GAINS-Brasil é o consumo de energia final do país, detalhado por fonte, tipo de combustível, tipo de tecnologia e/ou segmento industrial. Além disso, são considerados as perdas de energia e o percentual de biocombustível na gasolina e no diesel.

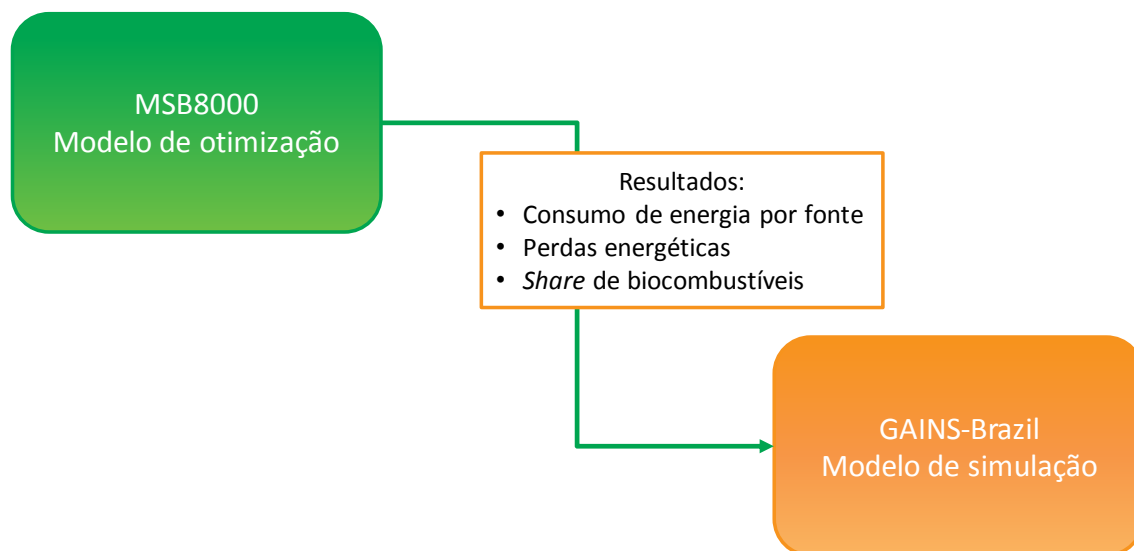
A integração do modelo MSB8000 e GAINS-Brasil foi feita por um *soft-link* de planilhas em Excel. Dessa forma, os resultados do MSB8000 foram importados para uma

---

<sup>1</sup> Da ferramenta MSB8000, o laboratório Cenergia derivou uma variante com uso do solo, denominado Blues, ainda em estágio de teste em março de 2017.



planilha intermediária, onde são compatibilizados com os dados requeridos pelo GAINS-Brasil. Como resultado dessa interação, obtém-se uma planilha em Excel para cada cenário analisado, que será utilizada na simulação dos cobenefícios ambientais locais por meio do GAINS-Brasil (Figura 3).



**Figura 3** – Integração entre os Modelos MSB8000 e GAINS-Brasil

## 2.1 Cenários de referência e de baixo carbono

Os cenários de longo prazo elaborados no projeto “Opções de Mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Setores-Chaves do Brasil” podem ser divididos em dois grandes grupos: cenário de linha de base (LB) e cenários de baixo carbono (BC). Todos esses cenários seguem as premissas gerais do projeto, com ano-base 2010, e projeções de oferta e demanda até 2050. O cenário macroeconômico utilizado foi elaborado pela Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (Fipe/USP). Ademais, o ano-base foi calibrado com os documentos disponíveis, entre eles, Balanço Energético Nacional, Terceira Comunicação Nacional, relatórios corporativos, como o Relatório de Sustentabilidade da Petrobras, entre outros.

### 2.1.1 Cenário LB

O primeiro cenário construído foi o cenário LB, que é o ponto de partida da análise. Por linha de base, entende-se um cenário onde não ocorrem mudanças estruturais no sistema energético (oferta e demanda de energia). Por isso, consideram-se apenas as tecnologias que

estão disponíveis no mercado, e são mantidas as tendências setoriais. Nesse sentido, o cenário LB é aquele sobre o qual há maior consenso ou aceitação das premissas básicas.

É usual o conceito e a aplicação dos cenários referenciais serem confundidos com o que se chamam cenários LB. Muitas vezes, os cenários LB representam cenários conservadores que são utilizados como o ponto de partida para construção de novos cenários alternativos.

Portanto, rigorosamente falando, o cenário LB tem definição diferente de cenário referencial. Porém, justamente por se caracterizar como ponto de partida para a análise, é extremamente usual que o cenário LB seja utilizado como cenário referencial. Note-se, no entanto, que isso não é uma necessidade, sendo possível utilizar outros cenários como referência. Para o caso do projeto “Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Setores-Chave do Brasil”, o cenário LB é utilizado como cenário referencial – ou o cenário sobre o qual se fazem as comparações.

### 2.1.2 Cenários BC

No contexto de ações de mitigação de GEE, também é comum encontrar os termos “cenário de mitigação” e “cenários de baixo carbono”. Tais cenários correspondem a cenários alternativos cujo objetivo específico envolve o esforço de redução de emissões de GEE.

Os cenários BC são aqueles que consideram as melhores tecnologias disponíveis no mercado, mesmo que não sejam aplicadas atualmente aos setores. As medidas de baixo carbono propiciam benefícios ambientais, mas enfrentam barreiras de caráter econômico, tecnológico, regulatório e informacional, entre outras, que impedem ou dificultam a sua implementação. Nos cenários BC, foram consideradas, por exemplo, medidas de eficiência energética, novos processos produtivos e troca de combustíveis. Esse cenário difere do cenário LB justamente pela possibilidade de entrada de novas tecnologias de baixo carbono. Dessa forma, o modelo MSB8000 tem a liberdade de otimização em face das opções tecnológicas.

Nos cenários BC, foram considerados um cenário onde não há custo de carbono na economia e outro com custo de 50 US\$/tCO<sub>2</sub>e. Esses valores representam o custo de carbono que as instalações energéticas teriam que assumir quando emitissem esse CO<sub>2</sub>.<sup>2</sup> Para cada

---

<sup>2</sup> Note-se que não se trata necessariamente de uma tributação de carbono. Trata-se do valor do carbono na função objetivo da otimização. O instrumento por meio do qual esse valor pode ser internalizado na economia pode tanto ser uma taxa de carbono, quanto sistemas de certificados e quotas, quanto instrumentos de comando e controle como padrões de emissão.

cenário BC, com um custo de carbono diferente, foi adotada a nomenclatura BCx, onde x representa o custo de carbono (em US\$/tCO<sub>2e</sub>). Dessa forma, foram considerados os cenários BC0 e BC50. O custo de carbono zero indica que não há custo de carbono associado à emissão de CO<sub>2</sub> para o primeiro cenário de baixo carbono, o BC0. Se não há custo de carbono, a diferença do BC0 para o cenário LB está na implementação de medidas de baixo carbono que tenham custo negativo. Enquanto no cenário LB nenhuma medida de baixo carbono é considerada, nos cenários BC, as melhores tecnologias disponíveis começam a entrar no sistema energético. Para o BC0, apenas opções tecnológicas com custo nulo ou negativo são selecionadas pelo modelo, que são basicamente medidas de eficiência. Com o aumento do custo de carbono no cenário BC50, outras opções tecnológicas mais caras começam a ser escolhidas pelo modelo MSB8000.

O custo de carbono pode ser calculado pela implementação de instrumentos econômicos, como taxas de carbono e mesmo mercados de carbono (associados a quotas e certificados). Neste último caso, referente a mercados de carbono, claro está que não se trata normalmente de uma política setorial, mas de política intersetorial, em que quotas são alocadas entre setores conforme diferentes critérios, e há a possibilidade de trocas de certificados de emissão entre instalações industriais e/ou energéticas incluídas no mercado de carbono (o chamado *cap-and-trade*).

## **2.2 Modelo Greenhouse Gas – Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS)**

### **2.2.1 Descrição e dados do modelo**

O modelo Greenhouse Gas – Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS) é uma ferramenta de análise integrada do potencial e dos custos de medidas de controle de poluição atmosférica e mitigação de GEE. Foi criado a partir do modelo RAINS, desenvolvido pelo Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA) há mais de 20 anos. O RAINS é uma ferramenta de análise da poluição atmosférica e seus impactos associados, que contribui para a avaliação de políticas de controle de emissões e auxilia na elaboração de estratégias custo-efetivas para sua redução. O GAINS é uma extensão do modelo RAINS que inclui os principais GEE (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e gases fluorados), ozônio troposférico, assim como poluentes atmosféricos locais (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM, VOC<sub>s</sub>, NH<sub>3</sub>, por exemplo), possibilitando a análise simultânea dos efeitos das medidas de mitigação de GEE e da poluição atmosférica. Sua

utilização possibilita estudar as principais interações e sinergias entre a mitigação das mudanças climáticas e o controle da poluição atmosférica.

O modelo GAINS tem interface *on-line* com acesso permitido de versões regionais para diferentes partes do mundo. Tem acesso interativo para inserção de dados, projeção de emissões e custos para diferentes cenários de controle de emissões e seus respectivos impactos ambientais. A versão mais recente contém:

- Inventário de emissões, projeção de emissões e custos de controle para poluentes atmosféricos (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC, PM, NH<sub>3</sub>);
- Inventário de emissões e projeção de emissões e custos de controle para GEE (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e F-gases);
- Listas de medidas de controle e seus custos associados para implementação de diferentes cenários, incluindo soluções custo-efetivas;
- Indicadores de qualidade do ar (concentração no ambiente e deposição de poluentes atmosféricos);
- Indicadores que avaliam os impactos da poluição atmosférica na saúde humana e no meio ambiente;
- Controle de dados, por ter uma interface interativa onde dados específicos do usuário podem ser modificados, atualizados e exportados.

O modelo avalia impactos na saúde humana e no meio ambiente como emissão de particulados, acidificação e eutrofização de ecossistemas. São avaliados simultaneamente os efeitos de diversos cenários de mitigação de GEE e seus cobenefícios para poluição atmosférica. As emissões históricas de poluentes atmosféricos e GEE são estimados para cada país com base em inventários de emissões nacionais, estatísticas e dados de colaboradores. As emissões são avaliadas no médio prazo, até o ano de 2050, com intervalos de cinco anos.

O GAINS pode ser operado em dois modos: modo de simulação de cenários e modo de otimização. No modo de análise de cenários, o modelo produz estimativas dos custos e benefícios ambientais regionais para diferentes alternativas de controle de emissões. No modo de otimização, são identificadas as alocações mais custo-efetivas para redução de emissões de forma a alcançar determinado limite de emissões, concentração ou nível de deposição. A versão mais recente também pode ser utilizada para visualização dos níveis de atividade, das estratégias de controle de emissões e para o cálculo de emissões e custos associados.

## 2.2.2 Criação e edição de cenários no GAINS: princípios gerais e definições

Uma das características principais do GAINS é a possibilidade de os usuários utilizarem diretamente a base de dados do modelo. Os usuários podem modificar, criar e atualizar dados de entrada e elaborar seus próprios cenários de emissão. As Equação 1 e Equação 2 representam os princípios básicos utilizados pelo modelo para calcular as emissões e os custos das medidas de controle.

$$\text{Emissão} = \text{Atividade} * \text{Fator de emissão} * \text{Tecnologia implementada} \quad \text{equação (1)}$$

$$\text{Custo} = \text{Atividade} * \text{Custo unitário} * \text{Tecnologia implementada} \quad \text{equação (2)}$$

Os componentes do lado direito de ambas as equações são dados de entrada organizados em diferentes categorias: atividade, vetores de emissão e estratégias de controle. As atividades econômicas, responsáveis pelas emissões, são organizadas em níveis de atividade. Os dados de atividade são divididos em cinco grupos no modelo: energia (ENE), fontes móveis (MOB), agricultura (AGR), processos (PROC) e VOC-específicos (VOC). Os fatores de emissão e custos unitários das tecnologias de controle, juntamente com dados históricos, formam os chamados vetores de emissão (*emission vector*). As tecnologias implementadas para cada atividade são especificadas nas estratégias de controle. Dessa forma, os cenários de emissão criados no modelo representam uma combinação de dados específicos para cada país das três categorias descritas acima.

Os cenários criados são de propriedade do usuário e apenas este pode modificá-los e mantê-los. A criação de um novo cenário de emissão depende da mudança de um (ou mais) componente(s) do cenário de pelo menos um país. O usuário pode utilizar arquivos já existentes na base de dados ou inserir dados novos, que representem novas premissas. Contudo, a modificação de vetores de emissão só é permitida para membros do Instituto Internacional de de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA).

Os principais passos metodológicos seguidos para criação de um novo cenário no GAINS serão explicados abaixo e podem ser divididos em diferentes etapas:

1. Criação de um novo cenário de emissão;
2. Criação de uma nova atividade;
3. Criação de uma nova estratégia de controle;
4. Atribuição de atividade e estratégias de controle ao cenário;
5. *Download* de dados de atividade;

6. *Download* de estratégias de controle;
7. Análise de resultados.

A criação de um novo cenário de emissão é o primeiro passo a ser adotado no GAINS. Para isso, devem ser definidas uma identificação e uma legenda para o cenário, assim como sua descrição. A identificação representa o nome sob o qual o cenário ficará definido no banco de dados do modelo e não pode ser modificada. A legenda representa o nome do cenário que aparecerá em tabelas, gráficos etc., podendo ser alterada pelo usuário. O passo seguinte é a importação de dados para o novo cenário criado. Para isso, é necessário selecionar primeiramente um cenário fonte, que representa um cenário já existente cujos dados serão importados para o novo cenário. Dessa forma, o novo cenário está definido e os dados contidos nele serão posteriormente modificados para inclusão dos dados do usuário.

O segundo passo é a criação de uma nova atividade, que representa a evolução temporal das atividades econômicas. Em outros termos, ao atribuir uma atividade ao novo cenário, define-se como o consumo de energia, agricultura, gado, produção de produtos energointensivos, resíduos etc. vão se desenvolver ao longo dos anos. Para a criação de uma nova atividade no modelo, devem-se definir uma identificação e uma breve descrição. Em seguida, dados de uma atividade já existente no modelo (atividade fonte) são importados para a nova atividade. Posteriormente, modificações são realizadas para inclusão dos dados do usuário.

O próximo passo é a criação de uma nova estratégia de controle. A estratégia de controle representa um conjunto de dados que contêm as premissas adotadas para a penetração de tecnologias de controle de emissões em um dado cenário. A estratégia completa inclui informação de tecnologias implementadas em diferentes setores para diferentes poluentes. Esses dados são captados pelo modelo de forma a especificar, para cada fonte de emissão, diferentes tipos e taxas de implementação de tecnologias de controle requeridas. Analogamente às etapas anteriores, para a criação de uma nova estratégia de controle, devem-se definir uma identificação e sua descrição. No GAINS, as estratégias de controle estão associadas a uma determinada região. Contudo, a aplicação da estratégia não se restringe a essa região, de forma que pode ser utilizada para avaliar seus efeitos em outras localidades. Novamente, devem-se importar dos dados de uma estratégia de controle existente para a nova estratégia criada, que será posteriormente modificada para inclusão dos dados do usuário.

Após proceder aos passos acima descritos, criam-se um novo cenário e as atividades e estratégias de controle associadas a ele. No entanto, esse novo cenário criado ainda utiliza a

estrutura importada do cenário fonte. Dessa forma, as próximas etapas consistem na inclusão dos dados do usuário ao modelo e na atribuição destes ao cenário. Para realizar a modificação dos dados, deve-se primeiramente alterar a região de análise e, em seguida, modificar (i) a estratégia de controle e (ii) a atividade para energia e fontes móveis. Em (i), devem-se alterar o usuário (proprietário da estratégia) e a estratégia de controle, sendo esta a nova estratégia criada e descrita acima. Em (ii), devem-se novamente alterar o usuário (proprietário da atividade) e os tipos de atividade (energia, agricultura, fontes móveis etc.), sendo estas as novas atividades criadas e descritas acima. O proprietário dos vetores de emissão não pode ser alterado pelo usuário, pois tais dados são predefinidos pelo IIASA.

Feito isso, o cenário criado encontra-se associado às atividades e estratégias de controle do usuário. Procede-se, então, à modificação do novo cenário pela inclusão dos dados do usuário no modelo. O GAINS disponibiliza o *download* de planilhas modelo (arquivos sem dados no formato .xlxs), nas quais o usuário insere os dados para cada um de seus cenários. As planilhas de atividade são formadas por diversas abas (Figura 4) que contêm dados do consumo e produção de energia para diversos setores econômicos da região escolhida. A aba “Explanations” contém informações sobre o conteúdo da planilha e instruções para modificação de dados. A aba “Main” é utilizada para definir as configurações para o *upload* de dados após as modificações do usuário. As células de cor branca representam dados que podem ser modificados. Células de outras cores representam somatórios (amarela), combinações inapropriadas (cinzas) e dados de outras planilhas (azul) (Figura 4). Após realizar todas as modificações necessárias, a nova planilha de atividade do usuário para o novo cenário deve ser inserida no modelo (Figura 5).

Upload name	Year	Act_Sht	CON_CON	CON_LBS	M_BSD	M_LOCTO	DOM	TRA_BI	TRA_OT	TRA_OTI
En_tot	2040	GSL	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3013.6	527.4	0.0
En_ppl	2040	LPG	442.1	0.0	19.3	7.3	133.9	0.0	0.0	0.0
Ren_ppl	2040	GAS	201.6	0.0	0.0	1125.2	201.6	0.0	1.6	0.0
En_ind	2040	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ren_ind	2040	REN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
En_dom	2040	HYD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ren_dom	2040	NUC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
En_mob	2040	ELE	0.0	393.0	0.0	969.2	569.8	0.0	22.0	0.0
Veh_xm	2040	HT	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Veh_no	2040	Sum	3195.8	2199.6	1258.3	3547.3	1117.7	4927.1	993.1	131.2

Figura 4 – Planilhas de Atividade do GAINS

**GAINS Global**  
Greenhouse Gas - Air Pollution Interactions and Synergies

Activity data | Emission controls | Emissions | Costs | Air quality & impacts | Scenario Management | Data Management | Admin

**Data Management**  
Upload  
Upload File  
Download  
Activity Data  
Control Strategies  
Regional Parameters  
Common Data  
Download Emissions  
Applic  
Shipping emissions [EMEP28]  
Basic Data  
Manage Pollutants  
Manage Technologies

**Upload data** Toggle debug info visibility

Please note that the excel format 97-2003 [.xls] is not supported.

To upload data to the GAINS application please save your data in the latest Excel [.xlsx] format.

Application [\*]: Global  
Current User [\*]: Joana Portugal Pereira  
Uploading for Owner [\*]: jportugal

Data Spreadsheet [\*]:  
choose file: Escolher arquivo Nenhum arq...elecionado  
Upload spreadsheet Reset form

© International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) • Air Quality and Greenhouse Gases (AIR)  
A-2361 Laxenburg, Austria • Phone: (+43 2236) 807 0 • Fax: (+43 2236) 71 313 • Web: www.iiasa.ac.at Disclaimer

Figura 5 – Upload de Dados no GAINS

A modificação dos dados de estratégia de controle é similar à modificação dos dados de atividade. O modelo permite o *download* de planilhas modelo (sem dados) de estratégias de controle para que o usuário insira os dados do seu novo cenário. As planilhas são formadas por diversas abas que contêm informações das estratégias de controle para cada poluente e/ou setor. Essas abas trazem, no lado esquerdo, uma lista de todas as atividades, setores e tecnologias de



controle disponíveis para um determinado poluente no GAINS (Figura 6). A linha superior mostra os anos de análise do cenário (Figura 6). Cada célula da planilha especifica a porcentagem da capacidade total das plantas ou fontes emissoras que têm algum tipo de controle. As abas “Main” e “Explanations” têm a mesma função que nas planilhas de atividade. Após realizar todas as modificações, o usuário procede ao *upload* da planilha de estratégias de controle no modelo (Figura 5).

			Control strategy - PM												
Uploadname	BRAZ_CLE_2016_E Owner	portugal	Upload: <b>UPLOAD</b>								Unit: % of total activity (fuel use)				
Activity	Sector	Technology	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
17	NOF	AGR_POULT	FEED_MOD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	NOF	AGR_POULT	FREE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	DC	CON_COMB	NSC_PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	DC	CON_COMB	IN_CYC	90	90	60	26	0	0	0	0	0	0	0	0
21	DC	CON_COMB	IN_ESP1	0	0	30	70	100	100	100	100	100	100	100	100
22	DC	CON_COMB	IN_ESP2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	DC	CON_COMB	IN_HED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	HF	CON_COMB	NSC_PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	HF	CON_COMB	GHIND	25	50	50	50	50	50	75	90	100	100	100	100
26	HF	CON_COMB	IN_HED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	MD	CON_COMB	NSC_PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	MD	CON_COMB	GHIND	25	50	50	50	50	50	75	90	100	100	100	100
29	OS1	CON_COMB	NSC_PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	OS1	CON_COMB	IN_CYC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	OS1	CON_COMB	IN_ESP1	0	0	0	8	18	28	37	55	75	75	75	75
32	OS1	CON_COMB	IN_ESP2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	OS1	CON_COMB	IN_HED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	OS2	CON_COMB	NSC_PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	OS2	CON_COMB	IN_CYC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	OS2	CON_COMB	IN_ESP1	85	96	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100
37	OS2	CON_COMB	IN_ESP2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	OS2	CON_COMB	IN_HED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	BC1	CON_COMB1	NSC_PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	BC1	CON_COMB1	IN_CYC	90	90	60	26	0	0	0	0	0	0	0	0
41	BC1	CON_COMB1	IN_ESP1	0	0	30	70	100	100	100	100	100	100	100	100
42	BC1	CON_COMB1	IN_ESP2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6 – Planilha de Estratégia de controle do GAINS

Após o *upload* das planilhas com os dados do usuário para o novo cenário, os resultados podem ser visualizados no modelo. O GAINS disponibiliza os resultados para emissões totais, por setor e por combustível/atividade para cada poluente (Figura 7). Resultados são apresentados na forma de gráficos e tabelas para cada cenário (Figura 8).

**IIASA GAINS Global**  
Greenhouse Gas - Air Pollution Interactions and Synergies

Activity data | Emission controls | **Emissions** | Costs | Air quality & impacts | Scenario Management | Data Management | Admin

**Emissions**  
NOx

**Summary results**  
National/regions totals  
Key sectors  
Key fuels/activities  
Key fuels/activities and key sectors

**Detailed results**  
Sectors  
Fuels/activities  
Fuel/activity by sector

**International formats**  
SNAP sectors  
UNFCCC-CRF sectors

**Sector results**  
Electricity production  
All mobile sources  
All mobile sources, by fuel  
Road transport  
Non-road mobile sources  
Source Category - Country group  
Sum mobile over country group  
Vehicle emissions in urban areas

**Display emissions**  
This option displays emissions for a selected scenario and provides details on the emission-relevant input data used for the calculations. Emissions can be displayed at different granularity:  
National totals (for one or several regions), aggregated by  
GAINS key sector,  
GAINS key activity/fuel,  
GAINS Key sector and key activity,  
different international reporting formats,  
as well for the native GAINS source categories;  
Furthermore, details on emission factors, etc. are provided.

**Emissions of NOx**  
Methodology of calculating NOx emissions is described in [Cofala J., Syri S. \(1998\) Nitrogen Oxides Emissions, Abatement Technologies and Related Costs for Europe in the RAINS Model Database.](#)

**Figura 7 – Opções para Visualização de Resultados no GAINS**



**Figura 8 – Exemplo de Gráfico de Resultado Exibido no Modelo**

### 2.2.3 Agregação de dados de energia no GAINS

A base de dados do GAINS tem três componentes majoritários para os sistemas de produção e consumo de energia:

- Geração de eletricidade e calor no setor elétrico e de aquecimento (PP);
- Uso de energia para produção primária de combustíveis, conversão de energia primária e secundária (excluindo-se a geração de eletricidade e calor nas plantas geradoras) e entrega de energia ao consumidor final (CON);
- Uso de energia final: indústria (IN), setor doméstico (DOM), transportes (TRA) e uso não energético de combustíveis (NONEN). O setor doméstico inclui os setores residencial e comercial, assim como agricultura, silvicultura, pesca e serviços.

Como mencionado, os dados históricos no GAINS são extraídos de estatísticas de energia e inventários nacionais e internacionais. O modelo simula diferentes alternativas para o uso de energia até 2050, baseadas em projeções nacionais e internacionais, como cenários desenvolvidos para a Europa no modelo PRIMES<sup>3</sup> e projeções da Agência Internacional de Energia (IEA).

O formato dos dados nas planilhas de atividade do GAINS é conveniente para o cálculo das emissões de poluentes atmosféricos e GEE. As abas com dados de energia (ENE) informam quais combustíveis são atualmente utilizados nos processos de diferentes setores econômicos. Atividades que envolvem a produção de combustíveis, como mineração e extração de óleo e gás, são reportadas nas abas de processo (PROC). Dados da demanda de petróleo pelas refinarias e carvão para coquearias não aparecem nas abas de energia. Por outro lado, os produtos das refinarias e coquearias são reportados como consumo de combustível nos setores consumidores de energia. Assim, a demanda/entrada de petróleo cru nas refinarias pode ser encontrada nas abas de processo.

O consumo total de energia em determinado país ou região pode ser obtido pela soma do uso de combustível nos setores de conversão (CON), geração (PP) e de demanda final (IN,

---

<sup>3</sup> O modelo Primes simula o sistema energético e o mercado europeu com base nos dados de cada país para todo o continente. O modelo fornece projeções de balanços energéticos detalhados para demanda e oferta, emissões de CO<sub>2</sub>, investimentos em demanda e oferta, penetração tecnológica, preços e custos. As projeções cobrem o período de 2015-2050 em intervalos de cinco anos (E3MLAB, 2017).

DOM, TRA e NONEN). Embora esse total represente um somatório de energia primária e secundária, ele é igual à demanda total de energia primária em nível regional/nacional.

### 2.2.3.1 Agregação das fontes energéticas

O GAINS disponibiliza uma especificação detalhada das fontes energéticas. Isso é necessário, pois os fatores de emissão para poluentes atmosféricos e GEE dependem fortemente do tipo e da qualidade do combustível utilizado. A lista de fontes energéticas está disponível no Quadro 1. São especificados diferentes tipos de um mesmo combustível, de forma a considerar suas diferenças qualitativas, como poder calorífico, teor de enxofre, cinzas etc. A diferenciação dos combustíveis fica a critério do usuário. Combustíveis de biomassa e de origem residual são subdivididos em categorias ainda mais detalhadas para considerar os diferentes fatores de emissão. Novamente, a desagregação desses combustíveis em diferentes tipos é específica para cada país/região, ficando a critério do usuário o modo como será realizada.

**Quadro 1 – Produtos Energéticos da Base de Dados do GAINS**

Abbreviation	Description
BC1	Brown coal/lignite, grade 1
BC2	Brown coal/lignite, grade 2 (includes peat)
DC	Derived coal (coke, briquettes)
ELE	Electricity
GAS	Natural gas (incl. CNG and derived gases)
GSL	Gasoline and other light fractions of oil; includes biofuels
H2	Hydrogen
HC1	Hard coal, grade 1
HC2	Hard coal, grade 2
HC3	Hard coal, grade 3
HF	Heavy fuel oil
HT	Heat (steam, hot water)
HYD	Hydro
LPG	Liquefied petroleum gas
MD	Medium distillates (diesel, light fuel oil; includes biofuels)
NUC	Nuclear
OS1	Biomass fuels
ARD	Agricultural residuals - direct use
BGS	Bagasse
BIO	Biogas
BMG	Biomass gasification
CHCOA	Charcoal
DNG	Dung
FWD	Fuelwood direct
OS2	Other biomass and waste fuels
BLIQ	Black liquor
WSFR	Waste fuel, renewable
WSFNR	Waste fuels, non-renewable
REN	Renewable energy other than biomass

<b>GTH</b>	Geothermal
<b>SHP</b>	Small hydro power
<b>SPV</b>	Solar photovoltaic
<b>STH</b>	Solar thermal
<b>WND</b>	Wind

Abaixo, segue uma descrição mais detalhada da agregação de dados para os diferentes setores no modelo: setor de geração, conversão, industrial, doméstico e transportes.

### **Setor de geração (PP)**

As plantas de geração elétrica (aba PP\_TOTAL nas planilhas de atividade) podem ser subdivididas em plantas com caldeiras (PP\_EX\_WB), outras plantas existentes (PP\_EX\_OTH), plantas de ciclo combinado (PP\_IGCC) e plantas novas (PP\_NEW). As plantas existentes são definidas como toda a capacidade em operação antes de 31 de dezembro de 1995. Plantas industriais, de cogeração, assim como plantas de aquecimento, são incluídas neste setor.

No GAINS, o setor de geração compreende as entradas de combustível para geração de eletricidade e calor pelas plantas de geração. A entrada de combustível é reportada nas planilhas com o sinal positivo (+) e a produção bruta de eletricidade e calor com o sinal negativo (-). Perdas e autoconsumo são contabilizadas no setor de consumo (CON).

O GAINS emprega a convenção Total Primary Energy Supply (TPES) para quantificar a energia primária equivalente da geração de eletricidade por combustíveis não fósseis. Essa convenção assume 100% de eficiência de conversão para plantas eólicas, solar, hidroelétricas e outras tecnologias renováveis que não realizam combustão. Para a geração geotérmica, considera-se 10% de eficiência de conversão e, para plantas nucleares, 33%.

### **Setor de produção e transformação/conversão de energia (CON)**

O setor de conversão (CON) no GAINS é definido de acordo com o setor de transformação energética (*energy transformation sector*) dos balanços energéticos da IEA. Contudo, as entradas e saídas de eletricidade e calor nas plantas de geração são reportadas no setor de geração (PP). O setor de conversão inclui o consumo interno de combustíveis e energia nas minas de carvão, refinarias de petróleo, coquearias, plantas de gaseificação etc. Também inclui autoconsumo de eletricidade e calor nas plantas de geração, assim como perdas na distribuição e transmissão de eletricidade, gás e calor.

Este setor é dividido de acordo com o combustível utilizado nos processos (CON\_COMB) e com o autoconsumo e as perdas não associadas à combustão (CON\_LOSS). Essa distinção é necessária para considerar os diferentes os fatores de emissão de cada processo.

O modelo também discrimina a combustão em *boilers* e caldeiras devido às diferentes condições de operação, fatores de emissão e tecnologias de controle de emissões disponíveis.

O setor CON\_COMB representa a combustão em caldeiras utilizadas no setor de energia, por exemplo, nas unidades de destilação e craqueamento catalítico das refinarias de petróleo. O combustível utilizado em aquecedores (caldeiras de aquecimento?) é contabilizado no setor denominado *combustion in industrial boilers* (IN\_BO). Caso não seja possível fazer a distinção entre a combustão em *boilers* e caldeiras, deve-se reportar todo o combustível utilizado industrialmente no setor CON\_COMB.

O setor de autoconsumo e perdas (CON\_LOSS) inclui:

- Perdas de combustível, eletricidade e calor na transmissão e distribuição até o consumidor final;
- Autoconsumo de eletricidade e calor no setor de geração e também a energia utilizada para bombeamento nas plantas hidrelétricas reversíveis;
- Uso de eletricidade, calor e combustível em outras plantas do setor energético, como minas de carvão, refinarias, coquearias e plantas de gaseificação, liquefação etc.;
- Diferença entre entradas e saídas de combustível nos processos de conversão.

Essas diferenças representam:

- Para coquearias: a diferença entre a entrada de carvão e a produção bruta de coque e gás de coque. O combustível perdido é o carvão;
- Para refinarias: a diferença entre a entrada de petróleo cru e outros insumos e a produção de derivados (óleo residual, gasolina, destilados médios, gás de refinaria e outros). Como o GAINS não considera o petróleo cru no balanço de energia, considera-se que o combustível perdido é o óleo pesado (*heavy fuel oil*, HF);
- Para plantas de liquefação e gaseificação de biomassa: a diferença entre a entrada de biomassa e a saída bruta de produtos como combustíveis líquidos e biogás. O combustível perdido é a biomassa.

Existe a possibilidade de que, nas estatísticas energéticas, a entrada de petróleo cru e outros insumos nas refinarias seja menor que o somatório dos produtos produzidos. Isso ocorre devido à dificuldade de reportar os complexos fluxos energético dentro das refinarias e os fluxos particulares entre a parte petroquímica e de energia. Nesse caso, assume-se que as perdas são nulas.

## **Setor industrial (IN)**

O consumo de energia na indústria é dividido em: combustão em *boilers* (IN\_BO), outras combustões industriais (IN\_OCTOT) e usos não energéticos (NONEN).

O consumo nos *boilers* é dividido nos setores de conversão (IN\_CON\_BO), na indústria química (IN\_CHEM\_BO), indústria de papel e celulose (IN\_PAP\_BO) e outras indústrias (IN\_OTH\_BO). Caso a divisão detalhada desses subsetores não seja conhecida, o consumo total deve ser reportado em IN\_OTH\_BO.

O setor IN\_OC\_TOT é dividido em: ferro e aço (IN\_ISTE\_OC), químicos (IN\_CHEM\_OC), metais não ferrosos (IN\_NFME\_OC), minerais não metálicos (IN\_NMMI\_OC), papel e celulose (IN\_PAP\_OC) e outras indústrias manufatureiras (IN\_OTH\_OC). Se a divisão detalhada entre esses subsetores não for conhecida, o consumo total deve ser reportado em IN\_OTH\_OC.

Para a combustão em outros setores industriais, o GAINS calcula as emissões, baseando-se nos dados de atividade reportados em IN\_OC. Os dados são internamente calculados pelo GAINS por meio da subtração entre o uso energético reportado nas indústrias cimenteiras e o uso total de energia na indústria (IN\_OCTOT). Desse modo, o modelo considera a alta retenção de enxofre na produção de cimento e cal e contabiliza as emissões dessas atividades nas emissões de processos industriais. Tais medidas têm por objetivo evitar a dupla contagem de emissões.

## **Setor doméstico**

O setor doméstico no GAINS inclui os seguintes subsetores: residencial (DOM\_RES), comercial e serviços públicos (DOM\_COM) e outros serviços (agricultura, silvicultura, pesca e outros subsetores não especificados, DOM\_OTH). O consumo de combustível por fontes móveis na pesca e agricultura deve ser incluído na demanda de energia do setor de transportes. Uma vez que as estatísticas energéticas incorporam essas categorias no setor doméstico (DOM), correções apropriadas devem ser realizadas nos dados estatísticos. Se a divisão detalhada no consumo de energia do setor doméstico não for conhecida, o consumo total do setor deve ser reportado em DOM\_OTH.

## **Transportes e outras fontes móveis**

O setor de transportes e outras fontes móveis (TRA) é dividido em: transporte rodoviário (TRA\_RD), outras fontes não rodoviárias (TRA\_OT) e fontes derivadas do tráfego marítimo

(TRA\_OTs), como navios e barcos de pesca que operam entre portos dentro do mesmo país. Cada um desses setores é dividido em categorias mais detalhadas de acordo com o tipo de veículo utilizado.

O setor rodoviário é dividido nas seguintes categorias:

- Motocicletas, ciclomotores e carros com motores de dois tempos (TRA\_RD\_LD2-GSL);
- Motocicletas e ciclomotores com motores de quatro tempos (TRA\_RD\_M4-GSL);
- Carros e ônibus de pequeno porte com motores de quatro tempos (TRA\_RD\_LD4C);
- Caminhões comerciais leves com motores de quatro tempos (TRA\_RD\_LD4T);
- Ônibus pesados (TRA\_RD\_HDB);
- Caminhões pesados (TRA\_RD\_HDT).

Para cada tipo de veículo, o modelo necessita de informações sobre o consumo anual por tipo de combustível, o total percorrido em veículo-km e o número de veículos.

O setor outras fontes móveis é dividido nas seguintes categorias:

- Veículos e pequenas máquinas com motores de dois tempos (TRA\_OT\_LD2): equipamentos de jardinagem, serradeiras, lanchas, *scooters* de neve etc.;
- Máquinas móveis na indústria de construção (TRA\_OT\_CNS). Esse consumo de combustível está incluído nas estatísticas energéticas da indústria manufatureira. Caso não esteja reportado nas estatísticas nacionais, o modelo assume que 100% da gasolina e do diesel utilizados no setor de construção e 50% do gásóleo utilizado em outras indústrias manufatureiras são consumidos pelas fontes móveis;
- Tratores e máquinas utilizados na agricultura e silvicultura (TRA\_OT\_AGR). Esse consumo é contabilizado nas estatísticas nacionais no setor de agricultura e silvicultura. Caso não seja conhecido, o modelo assume que 80% do gásóleo são utilizados por fontes móveis no setor agrícola;
- Transporte por rios (TRA\_OT\_INW);
- Ferrovias (TRA\_OT\_RAI);
- Aviação civil (TRA\_OT\_AIR). Seguindo a metodologia dos balanços da IEA, considera-se o consumo total de combustível pelo setor de aviação (doméstico e internacional). Contudo, as emissões de poluentes atmosféricos do setor são calculadas apenas nas fases de decolagem, taxiamento e pouso (*landing, taxi and take-off, LTO*).



As emissões de CO<sub>2</sub> são calculadas apenas para os voos domésticos (TRA\_OT\_AIR\_DOM);

- Navegação nacional (TRA\_OTS), que inclui a movimentação de navios e barcos de pesca dentro do mesmo país. Esses navios são subdivididos em navios de grande porte (TRA\_OTS\_L) e de médio porte (TRA\_OTS\_M). Dados nacionais não incluem o *bunker* marítimo internacional. As emissões do tráfego marítimo internacional são calculadas fora do modelo;
- Outras fontes não móveis com motores de quatro tempos (TRA\_OT\_LB): pequenos veículos domésticos, veículos militares, máquinas florestais e lanchas, assim como o uso de gás por compressores de dutos.

Novamente, para cada tipo de veículo, o GAINS requer informações do consumo anual por tipo de combustível e do número de veículos.

#### 2.2.4 Aplicações

A abordagem metodológica do GAINS se propõe a identificar alternativas custo-efetivas que contribuem com a qualidade do ar e a mitigação das mudanças climáticas. Essa abordagem, que se concentra em ações que promovam cobenefícios em diferentes escalas de tempo e espaço, torna o modelo uma ferramenta útil no desenvolvimento de políticas climáticas e de qualidade do ar em diversos países e regiões do mundo. Atualmente, o IIASA contribui com as seguintes instituições e convenções:

- Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP);
- European Union (EU);
- Climate and Clean Air Coalition (CCAC);
- UN Convention on Climate Change, UNFCCC);
- Arctic Council;
- The China Council for International Cooperation on Environment and Development (CCICED).

Assim, o GAINS é utilizado em diversos projetos do IIASA em parceria com demais instituições, como o EC4MACS (Consórcio Europeu para Modelagem de Estratégias Climáticas e de Poluição Atmosférica) e o Projeto EnerGEO (Energy Use Impacts on the

Environment).<sup>4</sup> O EC4MACS é um projeto conduzido pelo IIASA em parceria com as principais instituições científicas e financiado pelo Europe's Thematic Strategy on Air Pollution e pelo European Climate Change Programme. O projeto se baseou na utilização de um conjunto de modelos para identificar interações e sinergias entre estratégias climáticas e de qualidade do ar e políticas econômicas e sociais. Dentre os demais modelos utilizados, citam-se Primes, Tremove, Capri e Chimere, que são modelos de análise energética, de transportes, agricultura e dispersão atmosférica, respectivamente. O EnerGEO é um projeto desenvolvido para avaliar impactos atuais e futuros do uso da energia no meio ambiente, associando os sistemas de observação ambiental com os processos envolvidos na exploração de recursos energéticos. Os modelos Message, Globiom e G4M foram utilizados juntamente com o GAINS.

Ademais, o modelo é atualmente utilizado em diversos estudos, em diferentes regiões do mundo. Henneman et al. (2016) analisaram os efeitos da implantação de diferentes estratégias de mitigação na África do Sul, baseando-se nas estimativas de custo e emissões fornecidas pelo modelo GAINS. Zhang et al. (2015) avaliaram os cobenefícios alcançados em termos de redução nas emissões de GEE e poluentes atmosféricos na China pela implementação de medidas de eficiência energética nas indústrias de aço e cimento. Dong et al. (2015) combinaram um modelo de análise integrada/equilíbrio geral e o GAINS para projetar futuras emissões de CO<sub>2</sub> e poluentes atmosféricos na China, avaliando os cobenefícios e as reduções de custo obtidas.

Tais estudos corroboram, portanto, o uso da ferramenta GAINS aqui proposto, indicando que a integração entre o modelo de otimização Message e a ferramenta de simulação GAINS é um procedimento reconhecido e aplicado internacionalmente para análises de cobenefícios.

---

<sup>4</sup> Para informações mais detalhadas sobre os projetos do IIASA, consultar:  
<http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/Projects.en.php>

### 2.3 Desenvolvimento da plataforma GAINS-Brasil

Na seção 2.2.2, os principais dados de entrada no modelo GAINS foram explicados, assim como a metodologia de construção dos cenários. Para o desenvolvimento da plataforma GAINS-Brasil, foram criados três cenários no GAINS, associados às rodadas do MSB8000, sendo um cenário LB e dois cenários BC (BC0 e BC50). Cada um com dados de atividade e estratégia de controle, que são as principais entradas inseridas no modelo. Foram adotados todos os passos metodológicos descritos na seção anterior para a construção dos cenários. A principal diferença em relação à metodologia descrita (seção 2.2.2) foi que, como as planilhas de atividade foram geradas por um *soft-link* com as rodadas do modelo MSB8000, a etapa de *download* de planilhas de atividade (em branco, para inserção dos dados do usuário) não foi realizada.

O *soft-link* MSB8000-GAINS foi desenvolvido para criar planilhas de atividade no formato do GAINS a partir dos resultados das rodadas do modelo MSB8000 para os cenários LB, BC0 e BC50. Essas planilhas de atividade foram carregadas no GAINS e alocadas aos seus respectivos cenários. Foi necessário ajustar os dados de consumo de querosene de aviação (QAV) e *bunker* marítimo para descontar o combustível exportado. Para tal, o consumo de querosene foi dividido por 2 e o de *bunker* marítimo por 3.

Quanto às estratégias de controle,<sup>5</sup> foram utilizadas duas planilhas distintas. A primeira foi alocada para os cenários LB e BC0, e a segunda para o cenário BC50. A principal diferença entre elas é que, para a planilha utilizada no cenário BC50, considerou-se que 100% da capacidade instalada de novas plantas de geração termelétrica a carvão têm tecnologia de dessulfurização de alta eficiência para o controle das emissões de SO<sub>2</sub>. Isso ocorre, pois, nesse cenário, as plantas a carvão adotam sistemas de captura de carbono, que necessitam lidar com níveis de SO<sub>x</sub> no exausto muito reduzidos. O mesmo vetor de emissão, já existente na base de dados do GAINS, foi escolhido para os três cenários.

Ademais, para representação da realidade brasileira, foi necessário alterar alguns dados da planilha de fatores de emissão. Destarte, foram ajustados o teor de enxofre do diesel e do óleo combustível para 0,01% (100 ppm) e 1% (10000 ppm), respectivamente, assim como o poder calorífico inferior dos combustíveis. Dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás

---

<sup>5</sup> As planilhas das estratégias de controle contendo todas as premissas consideradas para o controle de emissão encontram-se anexadas a este documento.

Natural e Biocombustíveis (ANP) indicam teores de enxofre no diesel de uso rodoviário de 10 ppm (diesel S10) e 500 ppm (diesel 500) no Brasil (ANP, 2017b). O valor de 100 ppm de enxofre no diesel adotado nas planilhas de fatores de emissão representa uma estimativa média para o período avaliado nos cenários (2015 a 2050), sendo otimista na fase inicial e pessimista na fase final. Para os óleos pesados, o valor de 10000 ppm representa o limite máximo de enxofre permitido no óleo combustível comercializado nas principais regiões do país (ANP, 2017a).

## **2.4 Indicadores de cobenefícios de qualidade do ar**

A qualidade do ar é um parâmetro fundamental para a qualidade de vida dos indivíduos e um componente essencial do desenvolvimento sustentável. Más condições podem prejudicar a saúde humana e provocar diversos impactos no meio ambiente, como acidificação, eutrofização e danos a vegetação e construções. Tais condições são comumente relacionadas a processos industriais, produção e consumo de energia e transporte rodoviário. Os principais poluentes associados à má qualidade do ar são o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), material particulado (PM<sub>10</sub>) e compostos orgânicos voláteis (VOC) (ENVIRONMENT, 2017). Por esse motivo, no presente trabalho, os poluentes PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> foram escolhidos como indicadores de cobenefícios de qualidade do ar para as medidas de mitigação adotadas em diferentes cenários.

O SO<sub>2</sub> é um dos poluentes atmosféricos mais relevantes e normalmente utilizado como indicador para o grupo de gases de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>). A emissão de SO<sub>2</sub> na atmosfera está associada à queima de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. Outras fontes incluem processos industriais como mineração, meios de transporte (trens, navios e veículos), equipamentos que utilizam combustíveis com elevado teor de enxofre e fontes naturais como vulcões (EPA, 2016d).

Emissões de elevadas concentrações de SO<sub>2</sub> conduzem à formação de outros óxidos de enxofre. Estes, ao reagir com diversos componentes, produzem partículas de tamanho reduzido e aumentam os níveis de PM na atmosfera (EPA, 2016d). Os principais impactos na saúde humana são a irritação das vias respiratórias, sendo mais grave para indivíduos com doenças pulmonares (WHO, 2006). Em altas concentrações, podem danificar florestas e culturas vegetais e prejudicar o seu crescimento (EPA, 2016d). Ademais, SO<sub>2</sub> e outros SO<sub>x</sub> são gases precursores da chuva ácida, que tem efeitos adversos sobre solo, águas, florestas, culturas e saúde humana (MMA, 2017).

O dióxido de nitrogênio pertence ao grupo de gases altamente reativos, conhecidos como óxido de azoto (ou óxidos de nitrogênio). O NO<sub>2</sub> é usualmente empregado como indicador para esse grupo, no qual estão presentes, por exemplo, os ácidos nitroso e nítrico. Sua emissão está principalmente associada à queima de combustíveis em carros, caminhões, ônibus, plantas de geração elétrica e demais equipamentos (EPA, 2016a). Dentre suas fontes naturais, destacam-se atividades como vulcanismo, atividades bacterianas e descargas elétricas, que têm menor impacto sobre as concentrações desse poluente na atmosfera (MMA, 2017).

Em elevadas concentrações, o NO<sub>2</sub> é altamente tóxico e provoca problemas pulmonares no longo prazo. Por ser um forte agente oxidante, reage no ar produzindo ácido nítrico e nitratos orgânicos tóxicos. Juntamente com outros óxidos de nitrogênio, participa em diversas reações atmosféricas, produzindo ozônio troposférico e material particulado, que também afetam a saúde respiratória humana. Assim como o SO<sub>2</sub>, é um precursor da chuva ácida ao interagir com água, O<sub>2</sub> e outras substâncias na atmosfera. Ademais, prejudica a visibilidade do ar e contribui com a poluição por nutrientes<sup>6</sup> em águas costeiras (EPA, 2016a).

Os materiais particulados (PM) representam uma mistura complexa de sólidos e gotículas líquidas com diâmetro reduzido e diferentes características e são classificados de acordo com seu diâmetro (MMA, 2017). Podem ser classificados em duas categorias: PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>. O PM<sub>10</sub> é formado por partículas inaláveis com diâmetro de até 10 µm, enquanto o PM<sub>2,5</sub> é formado por partículas inaláveis finas com diâmetros de até 2,5 µm (EPA, 2016c). Atualmente, a maioria dos sistemas de monitoramento da qualidade do ar se baseia na medição de material particulado do tipo PM<sub>10</sub>, pois este inclui tanto as partículas maiores (diâmetro entre 2,5 e 10 µm) quanto partículas finas (com menos de 2,5 µm) (WHO, 2006).

As principais fontes antropogênicas de PM são a queima de combustíveis fósseis,<sup>7</sup> atividades de construção, estradas não pavimentadas, entre outros (MMA, 2017; WHO, 2006). Fontes naturais incluem vulcões, tempestades de areia, aerossóis marinhos e incêndios florestais (EEA, 2012). Esses poluentes também são produzidos na atmosfera a partir de reações entre outros poluentes, como SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Em algumas localidades, a combustão de madeira e outros combustíveis de biomassa representam importantes fontes de poluição por PM, sobretudo na forma de partículas mais finas (WHO, 2006).

---

<sup>6</sup> A poluição por nutrientes é provocada pelo excesso de nitrogênio e fósforo no ar e na água, afetando o meio ambiente e a saúde humana (EPA, 2016b).

<sup>7</sup> Dentre as principais fontes de emissão antropogênica de PM, incluem-se o transporte rodoviário, os processos de não combustão, as plantas industriais e os processos de combustão, combustão comercial e residencial e as plantas geradoras de eletricidade (UK AIR, 1996).

Os sólidos e as gotículas de líquidos que compõem o PM podem ser inalados, causando sérios riscos à saúde humana. Partículas com diâmetro inferior a 10  $\mu\text{m}$  causam os riscos mais severos, pois podem alcançar os pulmões e até a corrente sanguínea (EPA, 2016c). Diferentes estudos associam a exposição ao PM a diversos problemas de saúde, como doenças pulmonares, ataques cardíacos, arritmia, entre outros (MMA, 2017; EPA, 2016c).

No âmbito dos impactos ambientais, o PM, sobretudo formado por partículas mais finas, provoca redução da visibilidade em algumas localidades (EPA, 2016c). Esses poluentes podem ser transportados por longas distâncias pela ação dos ventos, depositando-se no solo e na água. Dependendo da sua composição, provocam acidificação de lagos, alteração do balanço de nutrientes em águas costeiras e bacias hidrográficas, depleção de nutrientes no solo, danos a florestas e colheitas agrícolas e intensificam os efeitos da chuva ácida (EPA, 2016c).

### 3 Resultados

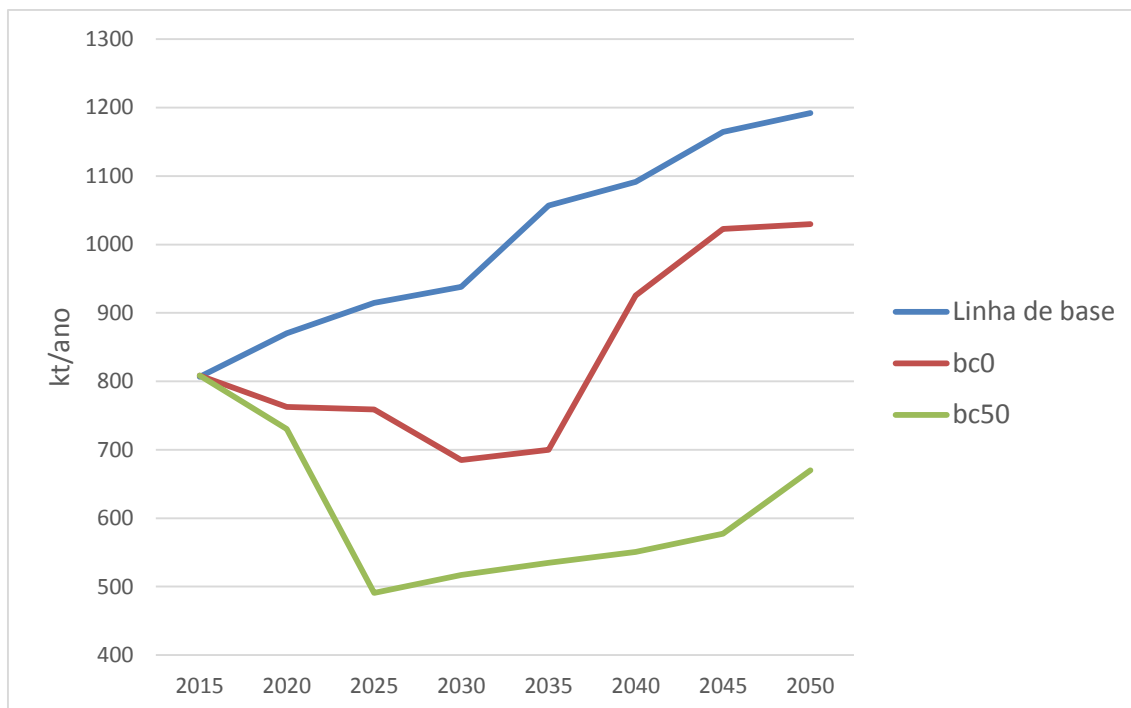
De acordo com a metodologia descrita, o modelo GAINS foi utilizado para avaliar a emissão de poluentes atmosféricos para os três cenários considerados. Serão apresentados os resultados das emissões dos poluentes escolhidos como indicadores discutidos no capítulo anterior.

#### 3.1 Emissões de SO<sub>2</sub>

Os resultados obtidos mostram expressiva redução nas emissões de SO<sub>2</sub> para os cenários BC em relação ao cenário LB (Figura 9). Os cenários BC apresentam ganhos de eficiência nas tecnologias utilizadas. Somente por esse motivo, espera-se menor volume de emissões mesmo na ausência de tecnologias de controle. Para o cenário BC0, há redução de 1.341 kt de SO<sub>2</sub> no período de 2015-2050 em relação ao cenário LB. Para o cenário BC50, há redução de 3.155 kt no mesmo período. No ano de 2050, os cenários BC0 e BC50 registram redução de 14% e 44% em relação ao cenário LB, respectivamente.

As emissões de SO<sub>2</sub> estão principalmente associadas à queima de óleo combustível e carvão no setor de combustíveis e combustão industrial. Nota-se expressiva diferença das emissões do cenário BC50 em relação aos demais a partir do ano de 2035. Essa diferença pode ser explicada pela captura de carbono (CCS) em plantas de geração de eletricidade, que, para ser exitosa, necessita de sistemas de controle de emissão de SO<sub>2</sub> para níveis muito reduzidos (usualmente denominados *polisher*). De fato, a tecnologia de captura de carbono visa principalmente à captura de dióxido de carbono, porém, para eficácia do processo, é necessário remover previamente os gases de dióxido de enxofre e particulados (EEA, 2011).

A substituição de óleo combustível por gás natural também justifica a redução dessas emissões nos cenários BC. Ademais, a utilização de um fator de emissão médio para o enxofre no diesel para todo o período torna os resultados otimistas nos períodos iniciais, com emissões reduzidas de SO<sub>2</sub>. Porém, considerando-se que o teor de S do diesel deve ser reduzido para uma média abaixo de 100 ppm a partir de 2030, os resultados podem ser considerados sobrestimados no final do período.



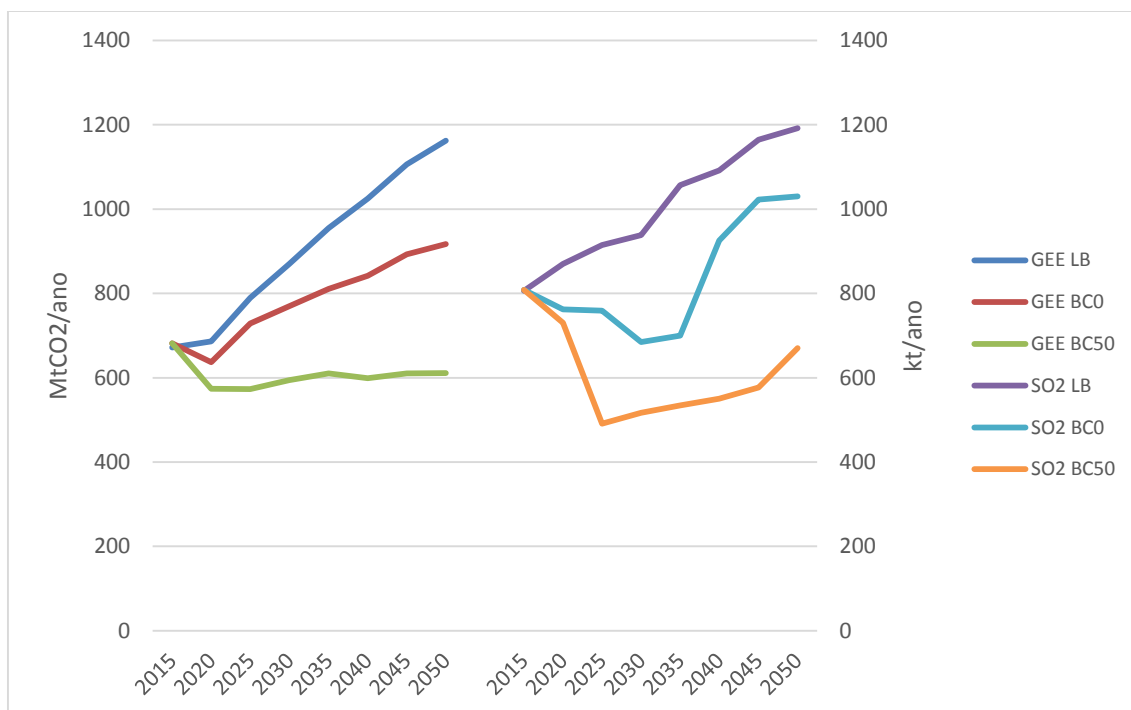
**Figura 9** – Emissões de SO<sub>2</sub> para os Cenários Avaliados (LB, BC0 e BC50)<sup>8</sup>

Para melhor visualização dos cobenefícios das medidas de mitigação de GEE em termos de qualidade do ar, foi construído um gráfico com as emissões dos GEE e de SO<sub>2</sub> para os três cenários no período de 2015-2050 (Figura 10).

---

<sup>8</sup> Essas emissões representam as emissões derivadas da combustão, de processos industriais e do tratamento de resíduos. Não foram consideradas as emissões de uso do solo.



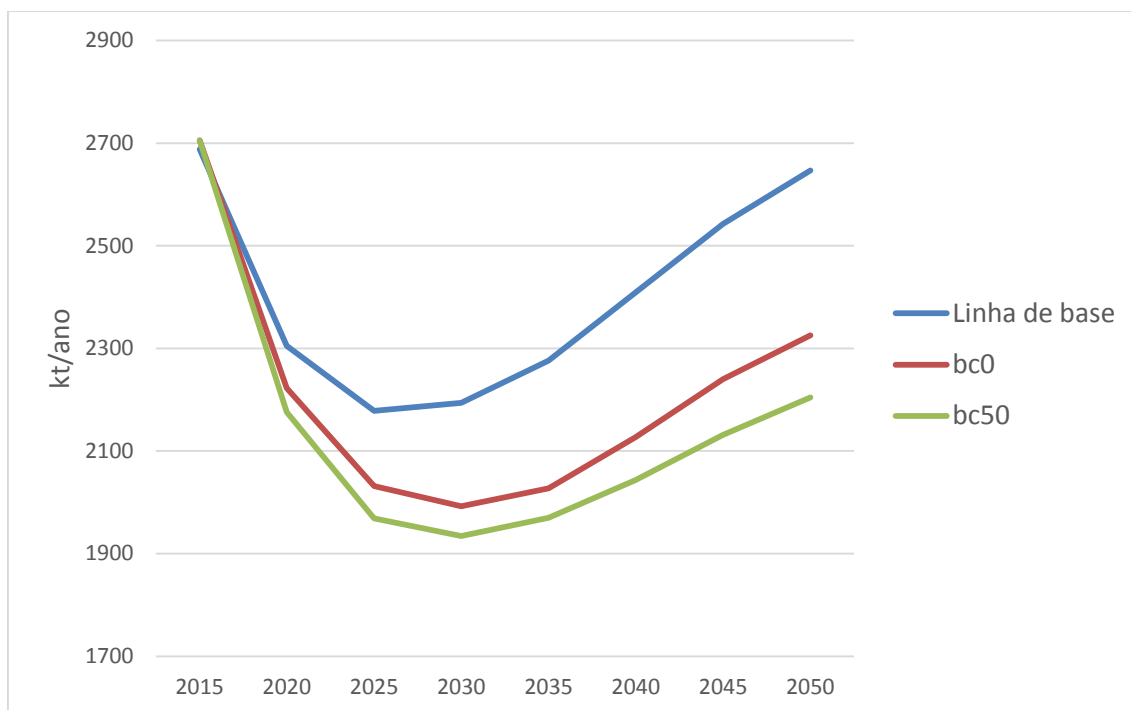


**Figura 10** – Emissões de SO<sub>2</sub> e GEE no período de 2015-2050<sup>8</sup>

### 3.2 Emissões de NOx

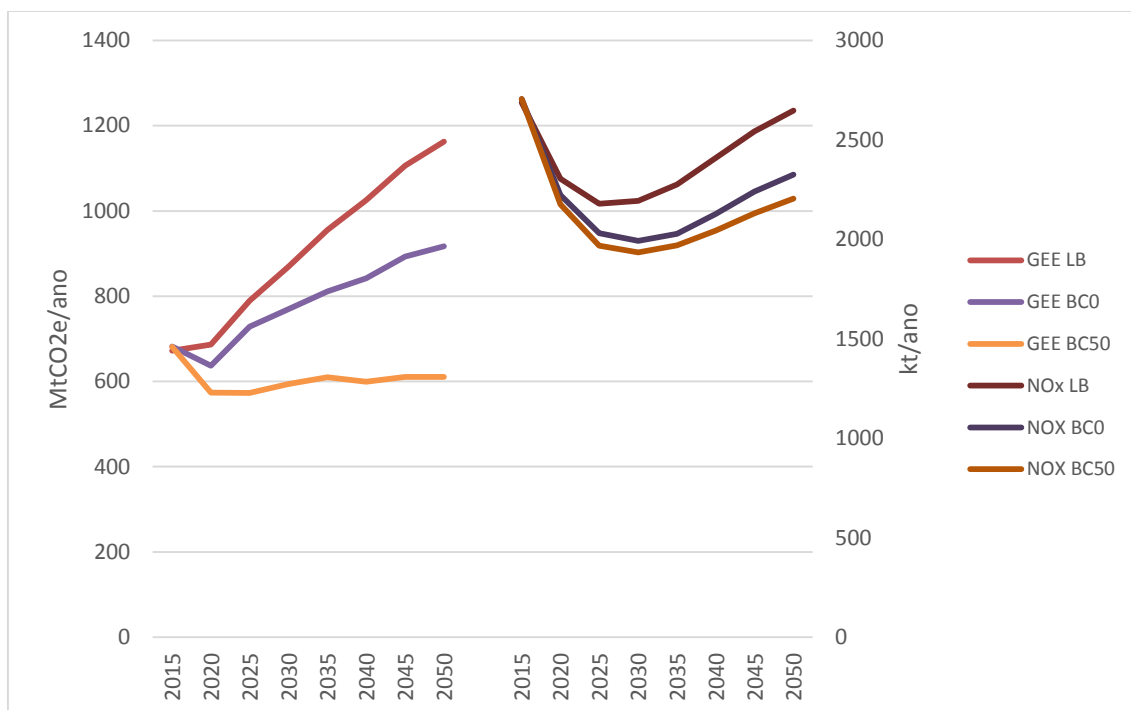
Os resultados obtidos mostram as emissões de NOx para os cenários BC e LB (Figura 11). Assim como para o poluente anterior, os cenários BC, por apresentarem maior eficiência energética, registram emissões reduzidas em relação ao cenário LB, independentemente da adoção de tecnologias de controle. Para o cenário BC0, há redução de 1.586 kt de NOx no período de 2015-2050 em relação ao cenário LB. Para o cenário BC50, a redução é de 2.107 kt. No ano de 2050, as emissões caem 12% e 17% em relação ao cenário LB para os cenários BC0 e BC50, respectivamente.

Nos períodos iniciais, nota-se queda expressiva para as emissões de NOx. Contudo, a partir do ano de 2030, essas emissões aumentam na mesma proporção para os três cenários avaliados. No cenário BC0, a penetração de tecnologias *low NOx burners* nas indústrias proporciona redução simultânea nas emissões de NOx e CO<sub>2</sub> devido ao controle da razão ar/combustível (esse controle proporciona simultaneamente ganhos de eficiência energética e controle de emissão de NOx, formado por aumento da temperatura de queima). As emissões de NOx estão, em sua maior parte, associadas ao consumo de diesel no transporte rodoviário e combustão estacionária.



**Figura 11** – Emissões de NO<sub>x</sub> para os Cenários Avaliados (LB, BC0 e BC50)<sup>8</sup>

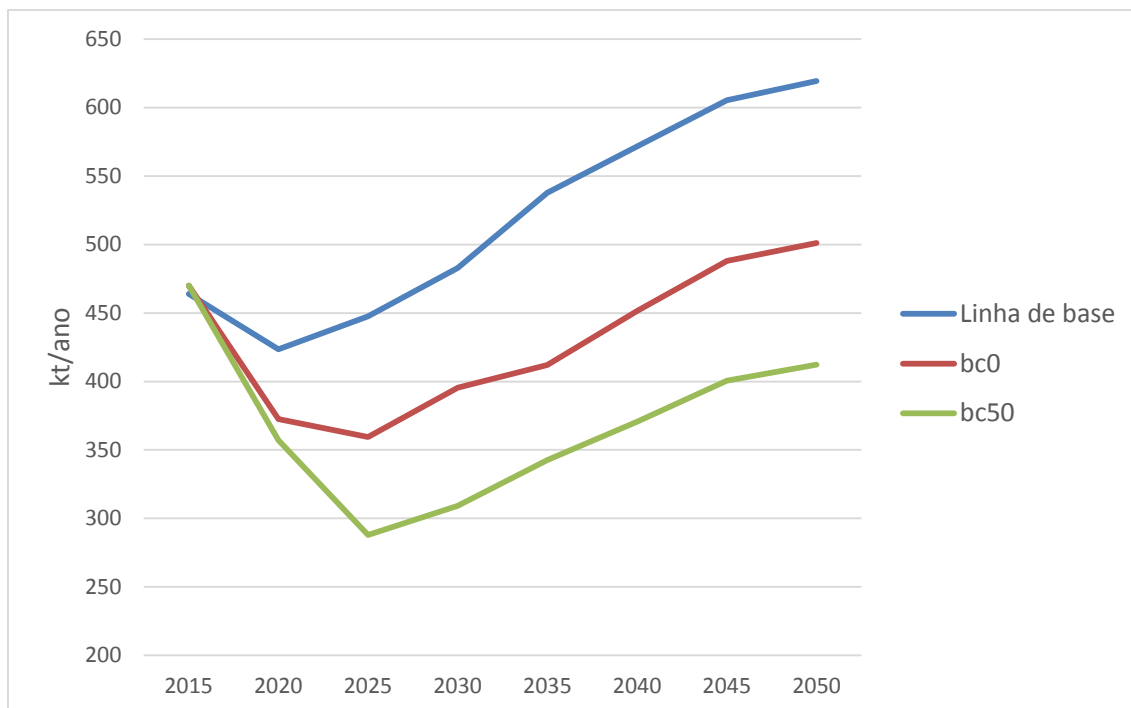
Analogamente ao poluente anterior, para melhor visualização dos cobenefícios das medidas de mitigação de GEE em termos de qualidade do ar, foi construído um gráfico com as emissões dos GEE e de NO<sub>x</sub> para os três cenários no período de 2015-2050 (Figura 12).



**Figura 12** – Emissões de GEE e NOx no Período de 2015-2050<sup>8</sup>

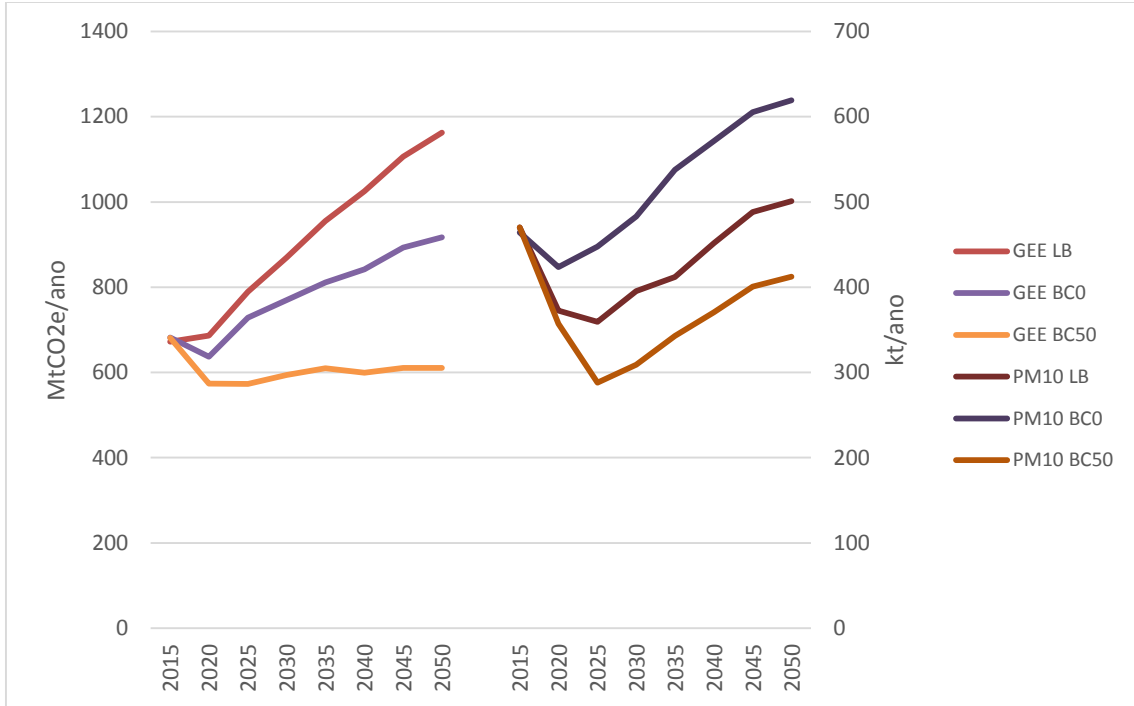
### 3.3 Emissões de PM<sub>10</sub>

Os resultados obtidos mostram a evolução das emissões de PM<sub>10</sub> para os cenários BC e para o cenário LB no período de 2015-2050 (Figura 13). Novamente, por apresentarem maior eficiência energética, os cenários BC têm níveis de emissões inferiores em relação ao cenário LB, mesmo se as medidas de controle de emissão de poluentes não forem consideradas. Para o cenário BC0, há redução de 702 kt de PM<sub>10</sub> em relação ao cenário LB nesse período, enquanto, para o cenário BC50, a redução foi de 1.202 kt. No ano de 2050, os cenários BC0 e BC50 apresentam redução de 19% e 33% em relação ao cenário LB, respectivamente. Observa-se a mesma tendência para emissões nos três cenários no período considerado. As emissões de PM<sub>10</sub> estão, sobretudo, associadas à queima de carvão e biomassa pelos setores de geração de eletricidade e indústrias.



**Figura 13** – Emissões de PM<sub>10</sub> para os Cenários Avaliados (LB, BC0 e BC50) <sup>8</sup>

Novamente, foi construído um gráfico com as emissões dos GEE e de PM<sub>10</sub> para os três cenários no período de 2015-2050, para melhor visualização dos cobenefícios das medidas de mitigação de GEE em termos de qualidade do ar (Figura 14).



**Figura 14** – Emissões de GEE e PM<sub>10</sub> no Período de 2015-2050<sup>8</sup>

#### 4 Considerações finais

O presente trabalho realizou uma análise dos cobenefícios de medidas de mitigação de GEE em relação à qualidade do ar. Para isso, um *soft-link* foi desenvolvido para integrar os dados dos modelos MSB8000 e GAINS. A plataforma GAINS-Brasil foi utilizada para avaliar os impactos de diferentes cenários de baixo carbono nas emissões de poluentes atmosféricos no país, no período de 2015 a 2050. Um cenário de linha de base também foi avaliado. Os poluentes SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub> foram escolhidos como os indicadores de qualidade do ar.

Os cenários de baixo carbono, por apresentarem maior eficiência energética, implicam emissões reduzidas se comparados ao cenário de linha de base, mesmo desconsiderando a implementação de tecnologias de controle. Ao avaliar cada cenário individualmente, percebe-se aumento absoluto nas emissões em relação ao ano-base. Esse aumento pode ser justificado pela penetração de tecnologias que utilizam biomassa como alternativa aos combustíveis fósseis, o que reduz as emissões de GEE, mas contribui para a emissão de poluentes atmosféricos. Ademais, nos primeiros anos do período avaliado, a crise econômica enfrentada pelo país faz com que parte considerável da geração elétrica ocorra em UHE, além de reduzir as emissões do setor industrial.

Os resultados obtidos indicam que as políticas de mitigação de GEE de fato contribuem para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos no Brasil. As emissões de SO<sub>2</sub> tiveram os resultados mais expressivos, chegando a uma redução de 44% no cenário BC50 em relação ao cenário de linha de base. Para as emissões de NO<sub>x</sub>, a redução foi de 12% e 17% para os cenários BC0 e BC50 em relação ao cenário de linha de base, enquanto, para as emissões de PM<sub>10</sub>, as reduções foram de 19% e 33%. Ao analisar em conjunto as emissões de GEE e dos poluentes selecionados no período de 2015 a 2050, comprova-se a existência de uma sinergia significativa entre a mitigação das mudanças climáticas e o abatimento da poluição atmosférica local.

Dessa forma, tendo em vista que os poluentes avaliados neste trabalho têm efeitos adversos no meio ambiente e na saúde humana, as alternativas de mitigação consideradas têm o potencial de gerar benefícios para o meio ambiente em nível local e para a saúde humana. Tais cobenefícios podem compensar os custos das medidas de mudanças climáticas, se monetizados de maneira apropriada. Por esse motivo, o abatimento da poluição atmosférica local representa um incentivo adicional para a adoção de esforços expressivos para mitigação de GEE. Contudo, considerando-se as diferenças espaciais e temporais entre os efeitos de medidas para mitigação das mudanças climáticas e controle da poluição atmosférica, é

necessário tratar essas questões a partir de uma abordagem integrada, capaz de avaliar simultaneamente seus diferentes aspectos.

Finalmente, embora os resultados deste estudo enfatizem a importância da inclusão da análise da poluição atmosférica nos debates sobre mudanças do climáticas, existem algumas incertezas associadas às premissas consideradas e aos parâmetros de modelagem, como fatores de emissão, tecnologias de controle de poluição atmosférica local, caracterização de sistemas energéticos e adoção de políticas de mitigação.

## Referências

21STCENTURYTECH. *Urban landscapes update: Megacities impose health challenge for developing world*. 2012. Disponível em: <<http://www.21stcentech.com/urban-landscapes-update-megacities-impose-health-challenge-for-developing-world/>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. *Óleo combustível*. 2017a. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-derivados/155-combustiveis/1858-oleo-combustivel>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. *Óleo diesel*. 2017b. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. *Poluentes atmosféricos*. 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos>>. Acesso em: 4 maio 2017.

BYTNEROWICZ, A.; OMASA, K.; PAOLETTI, E. Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. *Environmental Pollution*, 147, p. 438-445, 2007.

DONG, H. et al. Pursuing air pollutant co-benefits of CO<sub>2</sub> mitigation in China: A provincial leveled analysis. *Applied Energy*, 144, p. 165-174, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191500197X>>. Acesso em: 23 set. 2016.

E3MLAB. *Primes Model*. 2017. Disponível em: <[http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/index.php?option=com\\_content&view=category&id=35&Itemid=80&lang=en](http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/index.php?option=com_content&view=category&id=35&Itemid=80&lang=en)>. Acesso em: 2 maio 2017.

ENVIRONMENT, S. *Air pollution*. 2017. Disponível em: <[http://www.sustainable-environment.org.uk/Action/Air\\_Pollution.php](http://www.sustainable-environment.org.uk/Action/Air_Pollution.php)>. Acesso em: 3 maio 2017.

EU. European Environment Agency – EEA. *Air pollution impacts from carbon capture and storage (CCS)*. Paris: EEA, 2011.

\_\_\_\_\_. *Particulate matter from natural sources and related reporting under the EU Air Quality Directive in 2008 and 2009*. Paris: EEA, 2012.

HENNEMAN, L. R. F. et al. Assessing emissions levels and costs associated with climate and air pollution policies in South Africa. *Energy Policy*, 89, p. 160-170, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.11.026>>. Acesso em: 23 ja. 2017.

NEMET, G. F.; HOLLOWAY, T.; MEIER, P. Implications of incorporating air-quality co-benefits into climate change policymaking. *Environmental Research Letters*, 5 (1), p. 14007, 2010.

RADU, O. B. et al. Exploring synergies between climate and air quality policies using long-term global and regional emission scenarios. *Atmospheric Environment*, 140, p. 577-591, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.021>>. Acesso em: 5 maio 2017.



RAFAJ, P. et al. Co-benefits of post-2012 global climate mitigation policies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18 (6), p. 801-824, 2013.

SMITH, K. R. et al. *Human health: Impacts, adaptation, and co-benefits*. Cambridge and New York. 2014. Disponível em: <<http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415379A032>>. Acesso em: 13 dez. 2016.

THAMBIRAN, T.; DIAB, R. D. The case for integrated air quality and climate change policies. *Environmental Science and Policy*, 14 (8), p. 1008-1017, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2011.08.002>>. Acesso em: 21 ago. 2016.

UK AIR. *Airborne Particulate Matter in the United Kingdom*. London, 1996, p. 176.

USA. Environmental Protection Agency – EPA. Assessment of the impacts of global change on regional U.S. air quality: A synthesis of climate change impacts on ground-level ozone. *Synthesis*, April 2009.

\_\_\_\_\_. *Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) pollution*. 2016a. Disponível em: <[https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What is NO2](https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2)>. Acesso em: 4 maio 2017.

\_\_\_\_\_. *Nutrient pollution*. 2016b. Disponível em: <<https://www.epa.gov/nutrientpollution/problem>>. Acesso em: 4 maio 2016.

\_\_\_\_\_. *Particulate matter pollution*. 2016c. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>>. Acesso em: 4 maio 2017.

\_\_\_\_\_. *Sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) pollution*. 2016d. Disponível em: <[https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what is so2](https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what%20is%20so2)>. Acesso em: 4 set. 2016.

WHO. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment. *Geneva: World Health Organization*, p. 1-22, 2006. Disponível em: <[http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_eng.pdf?ua=1](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf?ua=1)>. Acesso em: 4 set. 2016.

ZHANG, S.; WORRELL, E.; CRIJNS-GRAUS, W. Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry. *Applied Energy*, 147, p. 192-213, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261915002664>>. Acesso em: 4 set. 2016.