

CARACTERIZAÇÃO E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PRESENTES EM MINAS SUBTERRÂNEAS DE CARVÃO NO SUL DO BRASIL

**Beatriz BONETTI¹, Rafael Colombo ABRUZZI², Arthur Kunitz BITENCOURT³, Carolina PEGLOW⁴,
Nathan Luca KARPINSKI⁵, Berenice Anina DEDAVID⁶, Marçal José Rodrigues PIRES⁷, Cleber José
Baldoni GOMES⁸, Giovana DALPONT⁹.**

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, beatriz.bonetti@acad.pucrs.br; ² Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, rafael.abruzzo@acad.pucrs.br; ³ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, arthur.bitencourt@acad.pucrs.br; ⁴ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, carolina.peglow@acad.pucrs.br; ⁵ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, nathan.karpinski@acad.pucrs.br; ⁶ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, berenice@pucrs.br; ⁷ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, mpieres@pucrs.br; ⁸Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, cleberjbg@gmail.com; ⁹ Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, giovana.dalpont@satc.edu.br

RESUMO

A caracterização do ar em minas subterrâneas de carvão é importante, pois, é possível avaliar questões voltadas à segurança do trabalho e ao meio ambiente. O presente estudo tem como objetivo determinar as concentrações de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) ao longo do sistema de ventilação de três minas de carvão, denominadas (A, B e C), todas localizadas na jazida Sul Catarinense, Bacia do Paraná, Formação Bonito, camada Barro Branco (minas A e C) e camada Bonito (mina B) e também, realizar estimativas da emissão de gases de efeito estufa (CH₄ e CO₂) provenientes das minas A e B. Foram realizadas quatro campanhas de coleta sendo que na primeira campanha as amostras foram coletadas com *bags* nas minas A e B, nas outras campanhas as coletas foram realizadas com frascos coletores de borosilicato. Foram também realizadas medidas de velocidade, temperatura, pressão e umidade do ar em diferentes pontos das minas para a determinação da vazão mássica. As análises dos gases foram realizadas por cromatografia à gás. Os resultados indicaram que as maiores concentrações de CH₄ estão presentes na Mina A, porém, todas as concentrações estão abaixo do limite de explosividade deste gás (50.000 ppm). O CO₂ apesar de apresentar concentrações semelhantes nas três minas, também destaca-se na mina A, apresentando concentrações acima das estabelecidas pelas legislações NR15 (3.900 ppm) e MSHA (5.000 ppm) em áreas de emanação. As estimativas de emissão de CH₄ e CO₂ (GEE) foram realizadas com diferentes metodologias nas quais se diferenciam de acordo com fatores de emissão, concentração, produção de carvão e vazão total da ventilação. Considerando que este é o primeiro estudo realizado no Brasil referente à emissão de CH₄ em minas subterrâneas de carvão, no qual, são levadas em consideração suas características de lavra, estima-se que os valores encontrados em literatura superestimam os valores emitidos por cada mina. Cabe salientar que os resultados obtidos nesse estudo são uma tentativa de aprimorar os cálculos de emissão. Entretanto, para melhorar a precisão dos inventários, um maior número de amostragens deve ser feito abrangendo todas as minas em operação no país.

Palavras-chave: Carvão, emissão, gases de efeito estufa, cromatografia.

ABSTRACT

A characterization of the air in underground coal mines is important, therefore, it is possible that it is focused on the safety of the work and the environment. (CH₄) and Carbon Dioxide (CO₂) along the ventilation system of three coal mines, named (A, B and C), all located in the South Catarinense deposit, Paraná Basin, Bonito Formation, the Barro Branco layer (mines A and C) and Bonito layer (mine B) and also, make estimates of the emission of greenhouse gases (CH₄ and CO₂). From collection that the first campaign as samples were collected with bags in mines A and B, other campaigns such as collections Were carried out with borosilicate collecting flasks. Surveillance, temperature, pressure and humidity measurements were also carried out at different points of the mines for a higher flow rate determination. Gas analyzes were performed by gas chromatography. The results indicated as higher concentrations of CH₄ are present in Mine A, but all concentrations are below the explosive limit of this gas (50,000 ppm). CO₂, despite having similar concentrations in the three mines, also stands out at mine A, presenting higher concentrations in emanation areas determined for NR15 (3,900 ppm) and MSHA (5,000 ppm). As emission estimates of CH₄ and CO₂ (GHG) were carried out with different methodologies in which they differ according to the values of emission, concentration, coal production and total ventilation flow. Taking into account that the results obtained in Brazil refer to the emission of CH₄ in underground coal mines, in which, considering the mining characteristics, it is estimated that the values found in the literature overestimate the values emitted by each mine. It should be noted that the results obtained in this study are an attempt to improve the emission calculations. However, to improve the accuracy of inventories, more sampling should be done covering all mines in operation in the country.

Key-Words: Coal, emission, greenhouse gases, chromatography.

1 INTRODUÇÃO

O carvão se origina da decomposição de detritos orgânicos e inorgânicos, cuja deposição sofreu processos de diagênese, compactação e transformações devido a aumentos de pressão e de temperatura (GWPRF, 2003). Nos ambientes subterrâneos, além do carvão, as principais fontes de geração dos gases estão relacionadas com fatores operacionais e hidrogeológicos, explosões e incêndios, desmonte de rochas (explosivo), decomposição de substâncias orgânicas, operação de equipamentos com motor, água subterrânea e minerais com enxofre (Torres e Gama, 2005).

A caracterização do ar ambiente na mineração subterrânea desempenha um papel significativo para questões voltadas à segurança, economia e meio ambiente. O metano (CH₄) é um gás presente nesse ambiente que, em altas concentrações (>50.000 ppm), quando misturado ao ar, têm um alto potencial inflamável. Devido a seu potencial de inflamabilidade, este gás exige diferentes estudos e monitoramento de suas concentrações (McPherson, 1993). O dióxido de carbono (CO₂) em concentrações superiores a 3.900 ppm apresenta riscos que estão associados diretamente à saúde do trabalhador, podendo inclusive, ocasionar morte (NR15, 2014). Também, por serem considerados gases de efeito estufa (GEE) o estudo das concentrações desses nas minas permite estimar, através de diferentes metodologias, suas emissões ao meio ambiente.

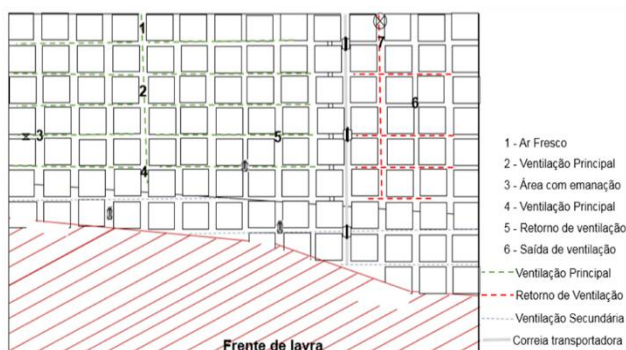
Diante disso, este trabalho tem como objetivo caracterizar o ar ambiente de minas subterrâneas de carvão, localizadas na jazida Sul Catarinense, com enfoque aos gases CH₄ e CO₂ visando avaliar questões voltadas a composição desses gases no circuito de ventilação, segurança de trabalho, aproveitamento energético e estimativa de gases de efeito estufa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram estudadas três minas de carvão, as quais serão genericamente chamadas de minas A, B e C. São minas subterrâneas localizadas na jazida Sul Catarinense, pertencendo a Bacia do Paraná com carvões provenientes da Formação Rio Bonito, das camadas Barro Branco (minas A e C) e Bonito (mina B).

Os pontos de coleta nas minas foram estratégicos sendo associados ao sistema de ventilação e também ao acesso em cada mina, o qual é concedido pelas mineradoras. As coletas foram realizadas na entrada e saída principal, no retorno da ventilação, no exaustor, e em pontos onde ocorrem emanções de gases detectadas com o auxílio do equipamento (Altair 4 MSA). Este equipamento, fornecido pela mineradora, permitiu através de sensores, detectar altos teores de CH₄. Além disso, as coletas foram realizadas também em pontos específicos antes e após a detonação. A Figura 1 apresenta todos os pontos de coletas das minas.

Figura 1 – Pontos de coleta nas minas.

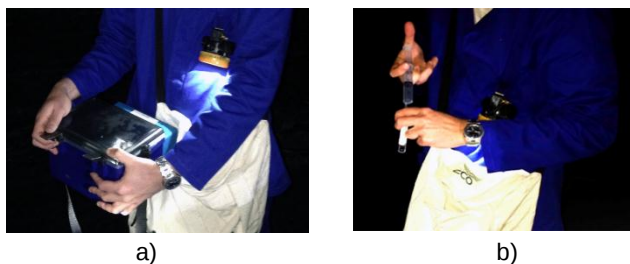


2.1 COLETORES E ANÁLISES DOS GASES

Para a coleta e estocagem dos gases foram utilizados sacos de amostragem tipo Tedlar® de polipropileno (0,5 e 1L) (Supelco) com auxílio de um amostrador simples (Supelco) com capacidade de um *bag* por vez. Com o intuito de garantir o armazenamento e transporte dos gases além de possibilitar a reutilização e a redução de custos, materiais e sistemas alternativos de coleta (AV_BR) foram utilizados para coletar e armazenar as amostras gasosas. Os frascos AV_BR produzidos em borosilicato possuem tampa plástica com rosca e septos de borracha butílica (Supelco) com um septo de Teflon (PTFE)/Silicone utilizado como capa protetora (Bonetti et al., 2016). Os coletores e o sistema de amostragem estão apresentados na Figura 2.

Foram coletadas 15 mL de amostra em cada frasco sendo que para cada ponto de coleta a amostragem foi realizada em triplicata.

Figura 2 - Procedimentos de coleta de amostras gasosas em: a) Coleta nos sacos realizada na mina de carvão. b) Coleta nos frascos realizada na mina de carvão.



Para a determinação da concentração de CH₄ e CO₂, foi utilizado o Cromatógrafo a Gás PerkinElmer, modelo Clarus 580, com detector do tipo FID (*flame ionization detector*), equipado com

metanador e coluna megabore Elite Plot Q com 0,53 mm interno, 20 µm de espessura de filme de fase estacionária polystyrene-divinylbenzene, 30 m de comprimento. A temperatura utilizada no forno foi de 50 °C (isotérmica) (Bonetti et al., 2016). O gás de arraste utilizado foi o hélio (99,9997%) que por ser um gás com alta condutividade térmica, quando associado com o gás hidrogênio e ar sintético, resulta na geração da chama do FID.

2.2 ESTIMATIVAS DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Para a estimativa anual de emissão do CH₄, a primeira metodologia (**M1**) utilizada foi baseada no método *Tier 1* [Eq. 1], desenvolvido pelo IPCC (2006):

$$E_{T1}(GgCH_4) = FE \times TPC \times FC \quad [Eq. 01]$$

Onde:

FE - Fator de emissão (m³ CH₄ t⁻¹);

TPC - Produção de carvão em t/ano;

FC - Fator de conversão (6,7x10⁻⁷ Gg m⁻³).

No método *Tier 1* foram consideradas as seguintes condições: as produções das minas A e B (t/ano); Fator de emissão (10 m³ t⁻¹) referente a minas com baixa geração de gás (IPCC, 2006); Fator de conversão de unidades (6,7x10⁻⁷ Gg m⁻³).

Devido a variabilidade da concentração de gás ao longo do circuito de ventilação das minas, outro método (**M2**) apresentado para determinar a emissão anual de CH₄, é o *Tier 3* [Eq. 2], também desenvolvido pelo IPCC (2006) e apresentado por Irving e Tailakov (1999). Este método foi elaborado para substituir o *Tier 1* em minas com baixa concentração de CH₄ (até 1.000 ppm), considerando para a estimativa o fluxo de ar da ventilação.

$$E_{T2}(GgCH_4) = (0,05\% (CH_4) / 100) \times TFD \times 365 \text{ dias} \quad [Eq. 2]$$

Onde:

TFD é o fluxo diário de gás na saída de ventilação (m³/dia).

Os fatores considerados no método *Tier 3* foram a concentração de CH₄ (0,05%) e o fluxo total

diário de ar emitido pela mina à atmosfera em um ano com 365 dias.

Outra metodologia utilizada para o cálculo de emissão foi desenvolvida por Harpalani e Prusty (2009) para o CH₄. No método (M3) utiliza-se uma média das concentrações do gás na mina e a vazão de ar proveniente do sistema de ventilação. Neste trabalho a concentração e a vazão considerada para este cálculo, foi a da saída das minas visto que é nesse local que a taxa de vazão mássica é maior. O cálculo para a determinação da vazão mássica dos gases, os valores medidos *in situ* foram convertidos para as condições de referência de pressão (1 atm) e temperatura (20 °C), adotados pelo IPCC (2006).

Para a realização das estimativas de emissão de GEE em CO₂ equivalente, foi aplicada a metodologia do IPCC (2006) que considera as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, multiplicando essas pelo Potencial de Aquecimento Global de cada gás em relação ao CO₂ [Eq. 3].

$$ECO_2e = ECO_2 \times 1 + 21 \times ECH_4 + 298 \times EN_2O \quad [Eq. 3]$$

Os valores de óxido nitroso (N₂O) foram desconsiderados neste trabalho, visto que esse gás não é detectado pelo método utilizado para obter as concentrações de CH₄ e CO₂.

3 RESULTADOS

3.1 COMPOSIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM MINAS DE CARVÃO

As concentrações de CH₄ e CO₂ no ar ambiente das três minas subterrâneas de carvão foram decorrentes de quatro campanhas de coleta.

Na mina A (Tabela 1) não foi detectado gás metano e nenhum outro hidrocarboneto leve nos pontos de entrada da Mina A (Camada Barro Branco), nas três primeiras campanhas. As concentrações de CO₂ variaram de 739 a 956 ppm, valores próximos aos observados para o ar externo no entorno da mina (~750 ppm).

Tabela 1 – Concentrações médias de CH₄ e CO₂ em diferentes pontos na Mina A

Mina/Campanha	CH ₄	CO ₂
Local Amostragem	Concentração ± dp (ppm)	
MINA A		
1ª Campanha/2014		
Circuito de alimentação de ventilação	<4 ^a	849 ± 16
Circuito de Retorno da Ventilação	117 ± 1	1.194 ± 8
Saída de Ventilação	18.006 ± 865	6.086 ± 207
2ª Campanha/2015		
Circuito de alimentação de ventilação	<4 ^a	762 ± 2
	1.137 ± 13	1.691 ± 49
	3.523 ± 1.449	1.339 ± 502
Circuito de Retorno da Ventilação	143 ± 2	1.255 ± 20
3ª Campanha/2016		
Saída de Ventilação	110 ± 2	1.012 ± 49
Ar Ambiente externo	<4 ^a	751 ± 52
4ª Campanha/2016		
Circuito de entrada de ventilação	<4 ^a	992 ± 28
Saída de Ventilação	338 ± 28	1.565 ± 28

^aLimite de detecção do CH₄

As concentrações de CH₄ e CO₂ apresentaram um aumento ao longo do circuito de ventilação, atingindo os maiores valores no ponto de saída (exaustor). Para o metano verificou-se incrementos de 40 a 200 vezes (Limite de Detecção inferior a 4 ppm até 117/338 ppm) nas concentrações, confirmando a liberação significativa desse gás durante as atividades de mineração. Para o CO₂ observou-se aumentos menos significativos (1,2 a 1,9 vezes) indicando diferentes fontes e/ou mecanismos de produção desses dois gases nesses ambientes. O aumento na concentração de CO₂ é proveniente, além da mineração, da respiração dos trabalhadores e dos motores de equipamentos utilizados no interior da mina. Neste caso, 5 LHDs (*Load Haul Dumper*) movidas a diesel, 5 carros e 3 tratores.

Cabe destacar o aumento de 5 e 2 vezes nas concentrações de CH₄ (669 ppm) e CO₂ (1.913 ppm) após um evento de detonação, monitorado durante a 2ª campanha nessa mina. Porém, as maiores concentrações medidas nesse estudo foram verificadas nas áreas de emanação de metano, mapeadas anteriormente pela empresa mineradora. Na 1ª campanha concentrações máximas de 18.006 ppm (1,8%) e 5.292 ppm (0,5%) foram observadas para CH₄ e CO₂, respectivamente. Além disso, nessas áreas de emanação foi possível detectar teores de CO (~250 ppm) na qual é decorrente de

processos relacionados a formação do carvão (Oliveira, 2009).

Essas foram as maiores concentrações observadas para esses dois gases durante todo o estudo. Na 2ª campanha outras duas áreas de emissão foram monitoradas obtendo-se valores de 1.137-3.523 ppm e 1.339-1.691 ppm para CH₄ e CO₂, respectivamente.

O gás metano é inflamável, os riscos são de asfixia ou de explosão se estiver misturado com o ar, como nas minas de carvão. Quando a concentração de gás metano no ar chega a níveis de 5% a 15% há risco de explosão (Torres e Gama, 2005). O CO₂ não é considerado tóxico, porém limites de 3.900 ppm e 5.000 ppm, são impostos pelas legislações de segurança no trabalho no Brasil (NR15, 2014) e EUA (MSHA, 2001), respectivamente. Na mina A a máxima concentração de CH₄ (1,8%), verificada nas áreas de emissão de gases, está abaixo do limite, não representando risco imediato de explosão. Todavia, esta concentração é bastante alta, sendo recomendado um monitoramento contínuo da área e verificação da origem da emissão. Por outro lado, o limite para CO₂ foi ultrapassado, indicando a necessidade de aumento do nível de ventilação naquele local.

Nas áreas com emissão, as concentrações dos gases de interesse são mais elevadas devido, provavelmente, a falhas geológicas e a porosidade do carvão. De acordo com Pan et al. (2016), isso resulta em um maior fluxo de liberação dos gases acarretando o aumento de suas concentrações no ambiente subterrâneo. Um estudo realizado por Oliveira (2009) indica que próximo à camada de carvão da mina A, há a ocorrência de arenitos oleosos os quais são responsáveis pela geração de gases que podem através de fraturas, migrarem para as camadas de carvão aumentando dessa forma suas emissões.

Foram observadas variações nas concentrações dos gases ao longo das quatro campanhas de monitoramento nessa mina. Por exemplo, as concentrações de metano medidas na saída de ventilação, variaram de 110 ppm (3ª campanha) a 338 ppm (4ª campanha). Cabe ressaltar que essas variações podem ser associadas ao sistema de ventilação, no qual, varia durante toda a extensão da mina. Pinto et al. (2003) consideram que cada circuito de ventilação possui características únicas que envolvem dados de pressão, fator de

atrito, resistência das galerias, teores de gases, poeiras, temperaturas entre outros. Esse conjunto de mecanismos faz com que haja a alteração da distribuição dos gases em função de sua vazão. Assim, além das diferenças poderem estar associadas a essas questões, cabe ressaltar que as coletas foram realizadas em datas diferentes e diferentes níveis de produção de carvão na mina.

Silva et al. (2010), monitoraram a presença de metano no ar de três minas de carvão da Jazida Sul Catarinense, em estudo pioneiro no país, verificando uma grande variação nos níveis de metano (3 a 270.000 ppm). As maiores concentrações foram verificadas em uma área de forte emissão, coletadas diretamente no ponto de liberação do gás. Foram também avaliadas as concentrações de hidrocarbonetos leves, em três minas subterrâneas, incluindo as Minas A e B desse estudo. Somente na terceira mina estudada foi verificada a presença de C2-C5, na faixa de 1 a 50 ppm. Esse resultado está de acordo com o observado no presente estudo, e indica que a presença destes compostos não é muito comum nas minas subterrâneas avaliadas (SILVA et al., 2010). Cabe ainda destacar, que as áreas de emissão da Mina A estudadas por Silva et al. (2010), foram diferentes das monitoradas no presente estudo. Por medida de segurança as áreas com forte emissão foram inundadas pela empresa mineradora, impedindo o acesso as mesmas.

Em minas de carvão americanas, chamadas *gassy mines*, o ar de ventilação pode conter 0,1 a 1% de metano, enquanto que o gás drenado antes da mineração pode conter de 60% a 95% deste gás. Em ambos os casos o metano pode ser capturado e utilizado como fonte alternativa de energia (Karacan et al., 2011). Na China onde, em 2007, já existiam 40 projetos ativos de recuperação e utilização de metano em minas ativas, os percentuais mínimos necessários para o uso variam de 0,5 a 1% (IEA, 2016). Segundo os resultados obtidos neste estudo a recuperação do metano seria possível na área de emissão, uma vez que a concentração de metano constatada foi de 1,8%. Atualmente equipamentos (microturbinas) são capazes de utilizar metano de ar de ventilação em concentrações igual e algumas vezes inferior a 1% (EPA, 2003).

A Tabela 2 apresenta os resultados referentes as médias da concentração de CH₄ e CO₂ na mina B (camada Bonito) em diferentes pontos, nas quatro campanhas de coleta. Também não foram detectados hidrocarbonetos leves (C1-C5) nos

pontos de entrada da Mina B, exceto na 4ª campanha, onde baixas concentrações de CH₄ (~4 ppm) foram observadas. As concentrações de CO₂ variaram de 624 a 756 ppm, valores próximos aos observados para o ar externo.

Tabela 2 – Concentração média de CH₄ e CO₂ em diferentes pontos na Mina B

Mina/Campanha	CH ₄	CO ₂
Local Amostragem	Concentração ± dp (ppm)	
MINA B		
1ª Campanha/2014		
Circuito de alimentação de ventilação	<4 ^a	717 ± 12
Circuito de Retorno da Ventilação	73 ± 17	1.643 ± 21
2ª Campanha/2015		
Circuito de Alimentação de Ventilação	<4 ^a	756 ± 35
Saída de Ventilação	34 ± 3	1.295 ± 168
3ª Campanha/2016		
Circuito de Alimentação de Ventilação	<4 ^a	741 ± 61
Saída de Ventilação	26 ± 0	1.375 ± 17
4ª Campanha/2016		
Circuito de entrada de ventilação	<4 ^a	894 ± 48
Saída de Ventilação	13 ± 3	1.346 ± 131

^aLimite de detecção do CH₄

As concentrações de CH₄ e CO₂ também apresentaram um aumento ao longo do circuito de ventilação, porém bem menos significativo quando comparado aos valores encontrados na Mina A. Para o metano verificou-se incrementos de 4 a 50 vezes (<4 ppm a 13/54 ppm) nas concentrações. Para o CO₂ observou-se aumentos menos significativos (1,5 a 2,9 vezes), porém maiores que os verificados para a Mina A. Conforme já comentado, o aumento na concentração de CO₂ pode ser proveniente de diversas outras fontes presentes nas minas, o que justifica as diferenças encontradas.

Nessa mina não foram observadas áreas de emissão de gases e as maiores concentrações de metano (13 a 54 ppm), observadas na saída de ventilação, são de 2 a 26 vezes menores que as observadas na Mina A (110 a 338 ppm). As concentrações de CO₂ nesse ponto, variaram de 1.295 a 1.520 ppm, valores similares aos observados na Mina A. Esse resultado sugere que as concentrações de CO₂ são governadas por fontes que apresentam perfis similares entre as duas minas, como a respiração dos trabalhadores e motores a combustão. Por outro lado, as concentrações de metano parecem estar associadas

principalmente as características geológicas da camada de carvão minerada. Na Mina A, é minerada a Camada Barro Branco, com carvão com maior rank e provável maior concentração de metano, quando comparada a Camada Bonito, minerada na Mina B. Cabe destacar, que outros parâmetros operacionais, como a ventilação e a produção de carvão, também devem contribuir para as diferenças observadas entre a concentração de CH₄ nessas minas.

Os resultados referentes ao monitoramento da presença de CH₄ e CO₂ no ar ambiente da Mina C em uma única campanha de coleta (3ª) são mostrados na Tabela 3. Não foram detectados hidrocarbonetos leves (C1-C5) nos pontos de entrada e as concentrações de CO₂ variaram de 867 a 878 ppm valores também próximos aos observados para o ar externo nessa mina que não estava operando no momento das coletas.

Tabela 3 – Concentração média de CH₄ e CO₂ em diferentes pontos na Mina C.

Mina/Campanha	CH ₄	CO ₂
Local Amostragem	Concentração ± dp (ppm)	
MINA C		
3ª Campanha/2016		
Circuito de alimentação de ventilação	<4 ^a	889 ± 52
Circuito de retorno de ventilação	14 ± 1	1.254 ± 24
Saída de Ventilação	14 ± 0	1.480 ± 18

^aLimite de detecção do CH₄

As concentrações de CH₄ e CO₂ foram somente medidas na entrada e saída dessa mina, não sendo possível verificar a influência do sistema de ventilação. Entre esses dois pontos verificou-se incremento de 14 vezes (<4 a 14 ppm) nas concentrações de metano. Para o CO₂ observou-se aumentos menos significativos (1,7 vezes). Conforme já comentado, o aumento na concentração de CO₂ pode ser proveniente de diversas outras fontes presentes nas minas, o que justifica as diferenças encontradas.

Esses resultados quando comparados aos observados para as outras duas minas indicam concentrações de metano de 4 (Mina B) a 25 (Mina A) vezes menores.

Valores similares foram observados na saída de ventilação para as três minas estudadas. Conforme já comentado, esse comportamento está relacionado a diferentes fatores (características químicas e geológicas dos carvões, processos de mineração, produção de carvão, entre outros). Esses

dados confirmam a necessidade da determinação individual da composição do gás de mina, em diferentes pontos do circuito de ventilação e em diferentes condições de funcionamento do processo de mineração.

3.2 ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM MINAS DE CARVÃO

Para a estimativa de emissão de GEE provenientes das minas, diferentes metodologias foram aplicadas, resultando nos valores apresentados na Tabela 4. As estimativas foram realizadas para as minas A e B, visto que as coletas ocorreram nessas minas em diferentes campanhas e em momentos em que estavam ocorrendo atividades associadas à exploração do carvão, ao contrário da mina C. As estimativas foram realizadas a partir de três metodologias diferentes, as quais foram detalhadas na seção experimental. Os Métodos M1 (*Tier 1*) e M2 (*Tier 2*) seguem o procedimento recomendado pelo IPCC, utilizando coeficientes genéricos de emissão baseados na produção de carvão (10 m³ de CH₄ por tonelada de carvão produzido) e numa concentração fixada de metano emitido a atmosfera, respectivamente. Para os cálculos foi escolhida uma concentração baixa de CH₄ (500 ppm) dentre as indicadas pelo IPCC, visto que as minas brasileiras não são consideradas *gassy* (Silva et al., 2010). O Método M3 diferencia-se dos demais por ser baseado nas concentrações e vazões medidas em campo, para cada uma das minas estudadas (Tabela 4).

estimadas emissões de 3.984; 774-816 e 173-461 tCH₄/ano, pelos métodos M1, M2 e M3, respectivamente. Tomando a máxima emissão estimada pelo Método M3 como referência, verifica-se uma superestimação de 2 a 8 vezes pelos outros dois métodos. Diferenças ainda mais significativas são verificadas para a mina B (20 a 114 vezes). Essas diferenças eram esperadas, uma vez que os coeficientes do IPCC foram obtidos por meio de dados de minas com características diferentes das minas brasileiras (baixos rank e conteúdo de metano). No caso do Método M2, a concentração de CH₄ utilizada nos cálculos (500 ppm) é superior aos valores experimentais obtidos nesse estudo (13 a 338 ppm), principalmente para a Minas B.

Comparando os resultados de emissão de metano obtidos pelo Método M3 para as duas minas, verifica-se que a Mina A emite 8 vezes mais que as das Mina B. Esse comportamento corrobora com os dados anteriores, indicando a necessidade da determinação de coeficientes de emissão individuais para cada mina. Cabe ainda indicar que as emissões de metano (tCH₄/ano) foram convertidas para emissão equivalente em CO₂ (tCO₂eq/ano) utilizando coeficiente indicado pelo IPCC (eq. 3). Assim, comparando estes resultados com os reportados por literatura, as emissões de CH₄ e CO₂eq podem ser superestimadas de 20 a 400 vezes nos Inventários de Emissão de GEE do setor carbonífero (MCT, 2006, 2010). Tal estimativa está associada às metodologias que são aplicadas para a quantificação dessas emissões visto que nos inventários, o método utilizado para a quantificação é o Método M1 (*Tier 1*) no qual tem como principal fator a produção das minas.

Em decorrência dos diferentes cálculos exigidos para a estimativa de CO₂ nas minas estudadas, os valores referentes a estes ainda estão sendo avaliados já que, não há metodologia estabelecida pelo IPCC para a estimativa deste gás, quando considerados apenas atividades ligadas à mineração subterrânea.

Tais fatos trazem grande incerteza nos valores calculados e uma reavaliação da metodologia empregada deve ser feita com uso de coeficientes de emissão específicos para cada mina.

Tabela 4 – Estimativas de GEE nas Minas A e B

Mina	Metodologia	Gás	Unidade	Emissão		
				min.	max.	
						%
A	Método 1 (<i>Tier 1</i>)	CH ₄	t CH ₄ /ano	3.984	3.984	
	Método 2 (<i>Tier 3</i>)	CH ₄	t CH ₄ /ano	774	816	
	Método 3	CH ₄	t CH ₄ /ano	173	461	
B	Método 1 (<i>Tier 1</i>)	CH ₄	t CH ₄ /ano	6.432	6.432	
	Método 2 (<i>Tier 3</i>)	CH ₄	t CH ₄ /ano	377	1.120	
	Método 3	CH ₄	t CH ₄ /ano	41	56	

Constata-se que os valores de emissão para CH₄, pelos três métodos, apresentaram uma diferença considerável entre si. Para a Mina A foram

4 CONCLUSÕES

A caracterização dos gases nas minas mostrou que a mina A é a com maior concentração de CH₄ e CO₂, principalmente nas áreas em que há a emanção desses gases. Estudos geológicos realizados próximos à mina indicaram o possível aumento de hidrocarbonetos e outros gases neste ambiente. Além do metano não foi verificada a presença de nenhum outro hidrocarboneto leve (C₂-C₅) em nenhuma amostra. Observou-se grande variação nas concentrações de metano (12 ppm até 18.006 ppm) não só entre as minas estudadas, mas também entre campanhas de coleta na mesma mina.

As maiores concentrações de CH₄ (1,8%) foram observadas em áreas de forte emanção desse gás na Mina A. Apesar desse valor estar abaixo do limite de explosividade (>5%), não representando risco imediato, a concentração é elevada sendo recomendado um monitoramento contínuo da área e verificação da origem da emanção. Por outro lado, os limites de exposição (3.900 ppm e 5.000 ppm) para o CO₂ foram ultrapassados (6.086 ppm) nas áreas de emanção indicando a necessidade de aumento do nível de ventilação naqueles locais.

As três metodologias estudadas para a estimativa de emissões de GEE resultaram em grandes variações nas emissões do CH₄. Para a mina que apresentou maiores emissões (Mina A) as estimativas variaram de 173 t CH₄ /ano (Método M3) a 3.984 t CH₄ /ano (Método M1, Tier 1 IPCC). Verificou-se significativa superestimação na emissão de metano (20 a 400 x) pelos métodos recomendados pelo IPCC quando comparados com os dados experimentais medidos para cada mina.

Os resultados obtidos colocaram em evidência as grandes incertezas envolvidas nessas estimativas de emissão. Recomenda-se uma reavaliação da metodologia empregada e o uso de coeficientes de emissão específicos para cada mina. Cabe salientar que os resultados obtidos nesse estudo são uma tentativa de aprimorar esses cálculos. Entretanto, para melhorar a precisão dos inventários, um maior número de amostragens deve ser feito abrangendo todas as minas em operação no país.

5 REFERÊNCIAS

BONETTI, B.; et al. Monitoring CH₄, CO₂ and CO concentrations on the air of the underground coal mines in southern Brazil. In: 24 World Congress Mine, Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

EPA. United States Environmental Protection Agency. Coalbed Methane Extra. Fall, 2003, 8p. Disponível em: <<https://www.epa.gov/cmop>>. Acesso em 17 de janeiro de 2017.

GWPRF – GROUND WATER PROTECTION RESEARCH FOUNDATION. **Handbook on Coal Bed Methane Produced Water: Management and Beneficial Use Alternatives**. Oklahoma: ALL Consulting Tulsa, 2003. 322p.

HARPALANI, S.; PRUSTY, B. K. **Quantification of Ventilation Air Methane Emission from Gassy Underground Coal Mines in India**. United States Environmental Protection Agency (USEPA), Washington, D.C, 2009, p..

IEA - International Energy Agency. Key World Energy Statistics. 2016. 80p. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>>. Acesso em 13 de janeiro de 2017.

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC – Intergovernmental Panel on 27 Climate Change. 2006. Disponível em <<https://www.ipcc.ch/meetings/session25/doc4a4b/vol1.pdf>>. Acesso: 05 de Março de 2016.

IRVING, W.; TAILAKOV, O. CH₄ Emissions: Coal Mining and Handling. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**, 1999. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em 05 de março de 2016.

KARACAN, C. O. et al. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction. **International Journal of Coal Geology**, v. 86, n. 2-3, p. 121-156, 2011.

MCPHERSON, M. J. Subsurface ventilation and environmental engineering. Springer-Science+Business Media, B. V. 1993. 912p.

MCT, PRIMEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR ENERGÉTICO: **Emissões Fugitivas na Mineração e Beneficiamento do Carvão Mineral**. Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM).

Ministério da Ciência e Tecnologia. 2006. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0008/8850.pdf>. Acesso em: 28 de janeiro de 2016.

MCT, SEGUNDO INVENTÁRIO BRASILEIRO. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR ENERGÉTICO: **Emissões Fugitivas na Mineração e Beneficiamento do Carvão Mineral**. Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM). Ministério da ciência e tecnologia. 2010. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0210/210144.pdf>. Acesso em: 28 de janeiro de 2016.

MSHA - Mine Safety and Health Administration (2001). *Federal Register* (n. 13, v. 66. 182 p) EUA.

NR15 - Norma Regulamentadora (2014). *Atividades e Operações Insalubres* (Portaria MTb nº 3.214) Brasil.

OLIVEIRA, E. B. **Geração não convencional de hidrocarbonetos na região carbonífera de Santa Catarina**. Rio de Janeiro, 103 p., 2009 Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

PAN, J. et al. Micro-pores and fractures of coals analysed by field emission scanning electron microscopy and fractal theory. **Fuel**, v. 164, p. 277-285, 2016.

PINTO, P. C. et al. Construção de um modelo computacional para o circuito de ventilação da Mina Esperança. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 4, p. 243-248, 2003.

SILVA, R. et al.. Monitoring light hydrocarbons in Brazilian coal mines and in confined coal samples, **International Journal of Coal Geology**, 84, p. 269–275, 2010.

TORRES, V. F. N.; DA GAMA, C. D. *Engenharia ambiental subterrânea e aplicações*. Rio de Janeiro, RJ: CETEM-CYTED, p., 2005.