



Anexo 3

Estudo de Dispersão de Poluentes Atmosféricos

ESTUDO DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Projeto Dois Irmãos - Fase 2



ENGEAR
consultoria

Outubro 2021

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Limites do Projeto Dois Irmãos - Fase 2.....	10
Figura 2: Célula de grade do WRF alinhamento 3 km	31
Figura 3: Célula de grade do WRF alinhamento 15 km	32
Figura 4: Célula de grade do WRF alinhamentos 75 km com receptores	33
Figura 5: Frequência de distribuição e rosa dos ventos	35
Figura 6: Hipsometria da região	36
Figura 7: Receptores Sensíveis próximos ao projeto Dois Irmãos - Fase 2.	37
Figura 8: Pluma de Dispersão de MP diária	39
Figura 9: Pluma de Dispersão de MP Anual	40
Figura 10: Pluma de dispersão de PM ₁₀ diária	42
Figura 11: Pluma de dispersão de PM ₁₀ Anual	43
Figura 12: Pluma de dispersão de PM _{2,5} diária	45
Figura 13: Pluma de dispersão de PM _{2,5} anual	46
Figura 14: Pluma de Dispersão de SOx diária.....	48
Figura 15: Pluma de Dispersão de SOx anual	49
Figura 16: Pluma de Dispersão de NOx horária.....	51
Figura 17: Pluma de Dispersão de NOx Anual	52
Figura 18: Pluma de Dispersão de CO para 8 horas.....	54
Figura A- I: Circulação geral da atmosfera	64
Figura A- II: Rosas-dos-ventos de Barão de Cocais/MG e regiões adjacentes	67
Figura A- III: Correlação entre a Temperatura observada pela estação do INMET A521 com a modelada pelo WRF	70
Figura A- IV: Rosa-dos-Ventos da estação do A521	71
Figura A- V: Rosa-dos-Ventos da modelagem WRF	71
Figura A- VI: Rosas-dos-ventos segundo a CEMIG	72
Figura A- VII: Rosa-dos-Ventos da modelagem WRF	72
Figura A- VIII: Correlação entre o Vetor Zonal observado pela estação A521 com o fornecido pelo WRF	72
Figura A- IX: Correlação entre o Vetor Meridional observado pela estação A521 com o fornecido pelo WRF	73
Figura A- X: Distribuição de frequência de Velocidade do Vento para a estação A521 ..	74

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura A- XI: Distribuição de frequência de Velocidade do Vento para a modelagem do WRF	74
Figura A- XII: Correlação entre a Velocidade do Vento observada pela estação A521 com a modelada pelo WRF	75
Figura A- XIII: Correlação entre a Umidade Relativa observada pela estação do INMET A521 com a modelada pelo WRF	77
Figura A- XIV: Correlação entre a Pressão Atmosférica observada pela estação do INMET A521 com a modelada pelo WRF	78
Figura A- XV: Correlação entre a Radiação Solar observada pela estação do INMET A521 com a modelada pelo WRF	82

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA
LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões de Qualidade do Ar	14
Tabela 2: Inventário de Emissão dos veículos automotores nas vias não pavimentadas ..	16
Tabela 3: Valores das constantes para cálculo da emissão de vias não pavimentadas.....	18
Tabela 4: Inventário de Emissão da via do empreendimento	20
Tabela 5: Dependência da constante k com o tamanho das partículas	22
Tabela 6: Emissão de material particulado pela movimentação de materiais	23
Tabela 7: Constante k para fator de emissão de arraste eólico conforme tamanho aerodinâmico das partículas.....	24
Tabela 8: Velocidade de fricção para materiais de referência conforme metodologia AP42	25
Tabela 9: Inventário de emissão por arraste eólico	26
Tabela 10: Inventário de emissão dos Equipamentos Móveis.....	27
Tabela 11: Inventário de Emissão do processo de Britagem/Moagem/Peneiramento	28
Tabela 12: Inventário de emissões do processo de detonação.....	29
Tabela 13: Inventário e Emissão das Perfuratrizes.....	30
Tabela 14: Receptores Sensíveis	37
Tabela 15: Concentrações de MP diário e anual	38
Tabela 16: Concentrações de PM ₁₀ Diário e Anual.....	41
Tabela 17: Concentrações de PM _{2,5} Diário e Anual	44
Tabela 18: Concentrações de SOx diário e anual	47
Tabela 19: Concentrações de NOx horário e anual	50
Tabela 20: Concentrações de Monóxido de Carbono para 8 horas	53
Tabela A- I: Valores definidos para validade dos dados dos parâmetros básicos do AERMOD	66
Tabela A- II: Valores definidos para validade dos dados dos demais parâmetros fornecidos pelo INMET e pelo WRF	66
Tabela A- III: Controle de qualidade dos dados meteorológicos da estação A521 do INMET	67
Tabela A- IV: Controle de qualidade dos dados meteorológicos da estação A521 do INMET	67

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela A- V: Comparação da Cobertura de Nuvens obtida pelo INMET com o simulado pelo WRF.....	69
Tabela A- VI: Comparação da Temperatura observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF	69
Tabela A- VII: Análise estatística da variável Temperatura	70
Tabela A- VIII: Comparação da Direção do Vento observada na estação meteorológica A521 com a modelada pelo WRF	71
Tabela A- IX: Análise estatística da variável Direção do Vento – Vetor Zonal	72
Tabela A- X: Análise estatística da variável Direção do Vento – Vetor Meridional	73
Tabela A- XI: Comparação da Velocidade do Vento observada na estação meteorológica A521 com a modelada pelo WRF	74
Tabela A- XII: Comparação da Umidade Relativa observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF	76
Tabela A- XIII: Análise estatística da variável Umidade Relativa	77
Tabela A- XIV: Comparação da Pressão Atmosférica observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF	78
Tabela A- XV: Análise estatística da variável Pressão Atmosférica	78
Tabela A- XVI: Comparação da Altura do Teto observada na estação A521 com a modelada pelo WRF	79
Tabela A- XVII: Comparação da Precipitação observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF	80
Tabela A- XVIII: Análise estatística da variável Precipitação.....	80
Tabela A- XIX: Comparação da Radiação Solar observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF	81
Tabela A- XX: Análise estatística da variável Radiação Solar	82

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA
SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	8
1.1 DADOS DO EMPREENDEDOR	8
1.2 DADOS DA EMPRESA RESPONSÁVEL PELO ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA ...	8
1.3 EQUIPE TÉCNICA RESPONSÁVEL PELO ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	9
2 CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO	10
3 MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA AERMOD	12
4 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL	14
5 INVENTÁRIO DAS FONTES DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	15
5.1 VEÍCULOS AUTOMOTORES	15
5.2 VIAS NÃO PAVIMENTADAS	18
5.3 MOVIMENTAÇÃO DE MATERIAL	22
5.4 ARRASTE EÓLICO	24
5.5 EQUIPAMENTOS MÓVEIS	26
5.6 BRITAGEM	27
5.7 DETONAÇÃO	28
5.8 PERFURATRIZ	29
6 DADOS METEOROLÓGICOS	31
7 MODELAGEM DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	35
7.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS METEOROLÓGICOS (AERMET)	35
7.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS TOPOGRÁFICOS (AERMAP)	35
7.3 PROCESSAMENTO DO MODELO DE DISPERSÃO AERMOD	35
7.3.1 Fontes de Emissão	36
7.3.2 Receptores Sensíveis	36
8 RESULTADOS DA MODELAGEM DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	38
8.1 MATERIAIS PARTICULADOS (MP)	38
8.2 CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS INALÁVEIS (PM ₁₀)	40
8.3 CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS RESPIRÁVEIS (PM _{2,5})	43
8.4 ÓXIDOS DE ENXOFRE (SOX)	46
8.5 DIÓXIDO DE NITROGÊNIO (NO ₂)	49

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

8.6 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	52
9 PLANO DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR.....	55
10 CONCLUSÕES.....	57
11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNDICE – VALIDAÇÃO METEOROLÓGICA	61
ANOTAÇÃO DE RESPONSABILIDADE TÉCNICA (ART).....	84

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

1 APRESENTAÇÃO

O presente estudo é parte integrante do Estudo de Impacto Ambiental do Projeto Dois Irmãos - Fase 2, e tem como objetivo a elaboração do Estudo de Dispersão Atmosférica do Empreendimento por meio da modelagem atmosférica - modelo AERMOD, bem como a elaboração do Plano de Monitoramento da Qualidade do Ar _ PMQAR. Ademais, fez-se uma discussão dos resultados fundamentados na avaliação da qualidade do ar da área de influência do empreendimento.

Este estudo foi elaborado pela empresa ENGEGAR Consultoria Ltda com base nas diretrizes da Nota Técnica da GESAR 02/2019, referente às “Orientações Técnicas para a elaboração de um Estudo de Dispersão Atmosférica”. Foi abordado a dispersão e o impacto atmosférico simulado pela emissão de poluentes A serem originados durante a operação do projeto Dois Irmãos - Fase 2, realizada uma análise crítica desse impacto comparando com os padrões de qualidade do ar previsto no CONAMA 491/2018 bem como avaliado a necessidade de implantação de uma rede de monitoramento da qualidade do ar na região.

1.1 Dados do empreendedor

Razão Social	Dois Irmãos - Fase 2
CNPJ	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
Endereço	Zona rural do município de Barão de Cocais/MG

1.2 Dados da empresa responsável pelo Estudo de Dispersão Atmosférica

Razão Social	ENGEGAR Consultoria Ltda
CNPJ	32.998.954/0001-21
Endereço	Rua Suzana Maria, 191, Bairro Paquetá, Belo Horizonte - MG.
Registro no CREA	81513

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

1.3 Equipe técnica responsável pelo Estudo de Dispersão Atmosférica

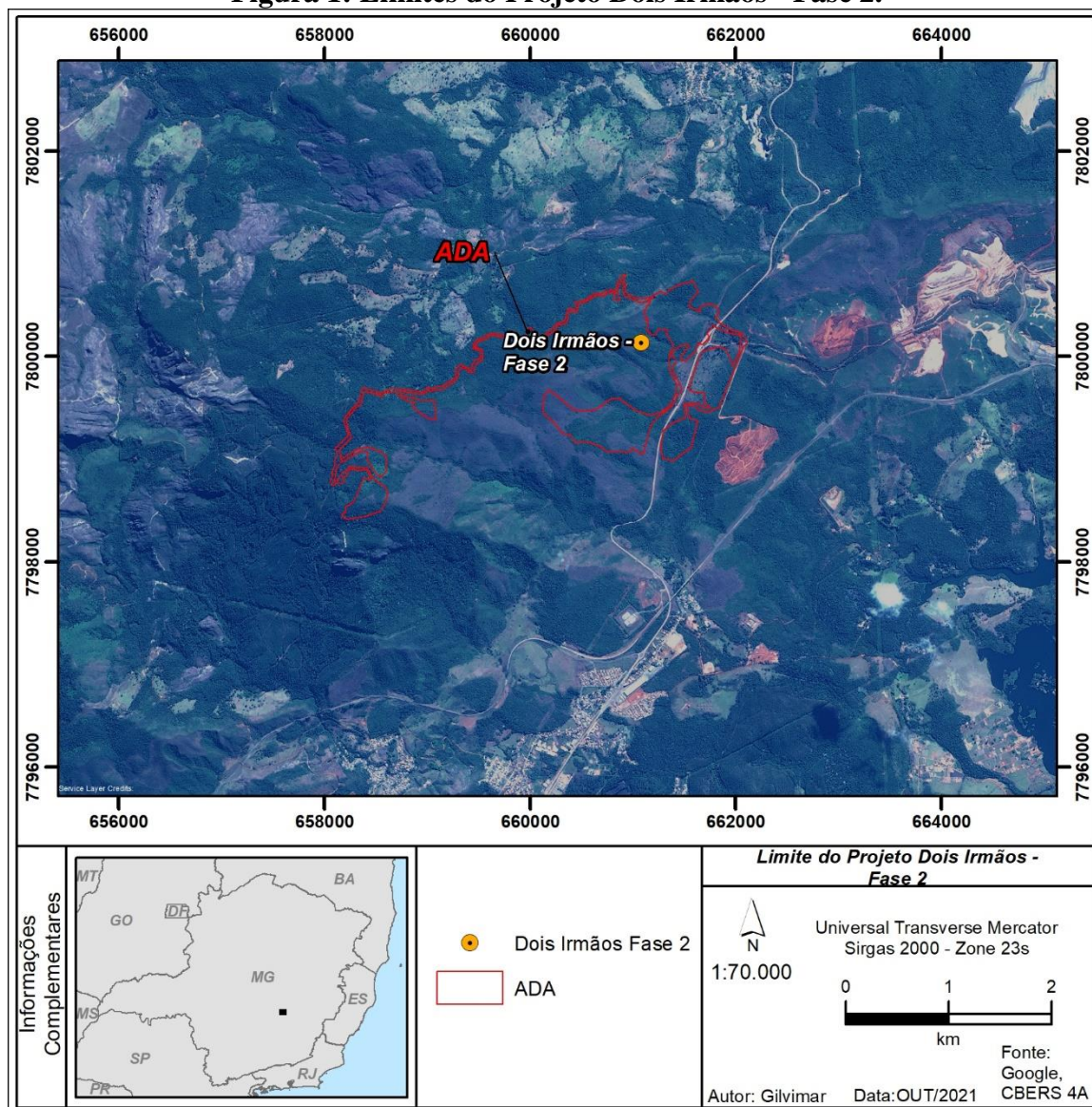
Nome	Formação	Conselho de Classe	Atribuição
Raisa H. S. Cesar	Engenharia Química	CREA MG- 242749/D	Responsabilidade Técnica
Tatiane V. Felipe	Engenharia Química	CREA MG – 169498	Análise Crítica do Relatório
Rafael M. Frenhe	Meteorologia	CREA SP 5069259772	Validação Meteorológica
Luan R. Pinheiro	Graduando de Engenharia Química	-	Elaboração do Relatório

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

2 CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

O projeto Dois Irmãos - Fase 2, irá atuar no setor minerário para produção de minério de ferro. Trata-se de um empreendimento minerário para produção de minério de ferro, o mesmo pode ser apresentado de acordo com suas etapas operacionais de lavra a céu aberto e beneficiamento mineral a seco, além das atividades de apoio. O empreendimento está situado na zona rural do município de Barão de Cocais/MG, estado de Minas Gerais, nas coordenadas longitude UTM 661081.00 m E e 7800133.00 m S, zona 23 K. A figura 1 apresenta a área diretamente afetada (ADA) da empresa pelo polígono branco.

Figura 1: Limites do Projeto Dois Irmãos - Fase 2.



Fonte: QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

O processo de extração do minério na unidade é composto por diversas fontes de emissão atmosférica, como: movimentação de material, arraste eólico, detonações, perfuratrizes, equipamentos móveis, processo de britagem e peneiramento, emissão através da exaustão de veículos automotores e das vias sem pavimentação no interior da planta industrial. Porém, a unidade irá adotar as medidas de mitigação como forma de controlar tais emissões, destacando-se a aspersão de água nas vias não pavimentadas.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

3 MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA AERMOD

Os modelos numéricos de dispersão atmosférica permitem estimar as concentrações de poluentes, identificação de áreas críticas e previsão de cenários futuros. Porém, os resultados obtidos por estes programas dependem do detalhamento e precisão dos dados de entrada, como inventário de emissões, dados meteorológicos e topográficos da área de estudo (FEAM, 2015).

Diversos modelos de simulação são utilizados para estimar a concentração de poluentes na atmosfera. A US-EPA (Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos) recomenda o AERMOD para simulação do comportamento dos poluentes na atmosfera para distâncias de até 50 km do local de estudo (EPA, 2017a). No Brasil, a FEAM também sugere que os municípios do estado de Minas Gerais utilizem o AERMOD para estimação da poluição veicular (FEAM, 2015), para processos de licenciamento ambiental do estado de empreendimentos gerais (FEAM, 2019a) e para empresas de produção de carvão vegetal (FEAM, 2019b). Por esses motivos, este modelo de dispersão será abordado neste trabalho.

O software AERMOD é desenvolvido pela Sociedade Americana de Meteorologia (MAS) e Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, o qual é composto por dois pré-processadores (AERMET e AERMAP) e o modelo de dispersão AERMOD. O AERMET utiliza os dados meteorológicos representativos para o domínio simulado e características de superfície (albedo, razão de Bowen e rugosidade de superfície) para determinação dos parâmetros da camada limite planetária (velocidade de fricção, altura de mistura, dentre outros) e caracterização adequada da capacidade dispersiva da atmosfera (EPA, 2016; EPA, 2018).

O AERMAP caracteriza o terreno e gera a malha receptora para o modelo de dispersão a fim de calcular a influência da altura do terreno associado a cada malha receptora e aos receptores discretos determinados (EPA, 2016). Entende-se por receptores discretos (ou sensíveis) locais que merecem atenção quanto à qualidade do ar, como: escolas, hospitais e sítios de grande contingente populacional.

O modelo de dispersão do AERMOD segue um estado estacionário (considerando um volume de controle arbitrário em um sistema de coordenadas fixo em relação ao solo, lidando com precisão e eficiência em problemas envolvendo dispersão) e a distribuição da concentração segue uma distribuição gaussiana (normal) tanto na horizontal quanto na

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

vertical (MOREIRA e TIRABASSI, 2004). O algoritmo do modelo é aplicado para alcance de até 50 km de distância da fonte emissora, com características do tipo pontual, de área ou volumétrica, além do lançamento ser do tipo constante ou variável. O AERMOD é aplicado para áreas urbanas e rurais, terrenos complexos e planos bem como lançamentos elevados ou de superfície. Na saída do programa é gerado um resumo de concentrações médias por receptor e por fonte para os períodos considerados na modelagem (EPA, 2016).

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

4 PADRÕES DE QUALIDADE DO AR

Para contribuir com a melhoria da qualidade do ar, os órgãos ambientais estabelecem padrões de emissões e imissões por fontes poluidoras, colocando o monitoramento da qualidade do ar como uma ferramenta para acompanhar os níveis de poluição e comparar com os padrões máximos estabelecidos de forma que não afete a saúde, segurança e o bem-estar da população, bem como danos à fauna e flora. Desta forma, a resolução CONAMA 491/2018 dispõe sobre padrões de qualidade do ar (Tabela 1) previstos no PRONAR (Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar) e os divide em duas categorias:

a) Padrões de qualidade do ar intermediários (PI): padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas;

b) Padrão de qualidade do ar final (PF): valores guia definidos pela Organização Mundial da Saúde - OMS em 2005.

Tabela 1: Padrões de Qualidade do Ar

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	ppm
		Ug/m ³	Ug/m ³	Ug/m ³	Ug/m ³	
Material Particulado - MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora ²	260	240	220	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	-
Ozônio - O ₃	8 hora ³	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Materiais Particulados - MP	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	0,5	-

Fonte: MMA (2018)

¹ Média aritmética anual

² Média horária

³ Máxima média móvel obtida no dia

⁴ Média geométrica anual

⁵ Medido nas partículas totais em suspensão

Para os poluentes monóxido de carbono (CO), materiais particulados (MP) e Chumbo (Pb) serão adotados o padrão de qualidade do ar final a partir da publicação da Resolução CONAMA nº 491/2018. Os demais poluentes -Dióxido de Enxofre (SO₂) e Dióxido de Nitrogênio (NO₂) - seguem o padrão PI-1.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

5 INVENTÁRIO DAS FONTES DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Para elaboração do inventário de emissões da Do Projeto Dois Irmãos - Fase 2, utilizou-se como base as informações relativas à produção fornecidas pela equipe técnica da empresa. A partir desses dados adotou-se a metodologia da AP42 USEPA para estimar a emissão das vias não pavimentadas, movimentação de material, arraste eólico, equipamentos móveis, processo de britagem, detonações e perfuratrizes. A metodologia apresentada pela CETESB (2020) foi utilizada para estimativa da emissão veicular.

5.1 Veículos Automotores

O empreendimento irá contar com 19 veículos automotores movidos a diesel, que trafegam em uma das vias não pavimentadas do empreendimento (detalhes sobre as estradas no item 5.2). A metodologia adotada para estimativa da emissão atmosférica de veículos automotores é a publicada pela CETESB (2020) e definida pela Equação 1:

$$EF = lu * Fe * Fr$$

Equação 1

Em que: EF=taxa de emissão, massa de poluente emitida por tempo (g.s^{-1}); lu= Intensidade de uso ou quilometragem média percorrida pelo veículo (km.dia^{-1}); Fe= Fator de Emissão (g.km^{-1}) e Fr= número de veículos circulantes.

O fator de emissão, definido em laboratório e publicado pela CETESB (2020) é dependente do tipo de veículo, ano da frota, poluente emitido e combustível utilizado. Salienta-se que este fator se refere à emissão decorrente do tráfego de veículos automotores em uma dada distância.

Salienta-se que em virtude da inexistência de fatores de emissão para os particulados PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ previstos pela CETESB (2020), utilizou-se a taxa de emissão referente ao MP durante a inserção de dados no software de simulação computacional.

A Tabela 2 apresenta as estimativas de emissão dos veículos automotores que trafegam nas vias do empreendimento.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 2: Inventário de Emissão dos veículos automotores nas vias não pavimentadas

Estrada 1 - Acesso base cavas 3 e 4 até cava 4									
Tipo de Veículo	Idade da frota	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (FE) g/km			Taxa de Emissão (E) g/s		
	anos	t	km/dia	MP	CO	NOx	MP	CO	NOx
Caminhões Scania 8x4	2009	25	81,67	0,08	0,94	5,02	8,00E-05	8,85E-04	4,74E-03
Caminhão pipa	2009	15	0,33	0,08	0,94	5,02	3,25E-07	3,60E-06	1,93E-05
Caminhão graneleiro	2009	32	7,30	0,08	0,94	5,02	7,16E-06	7,91E-05	4,24E-04
Caminhão Baú	2009	11	3,65	0,06	0,50	2,98	2,45E-06	2,11E-05	1,26E-04
Caminhão Comboio	2009	10	7,30	0,06	0,50	2,98	4,91E-06	4,21E-05	2,52E-04
Emissão total na via							9,49E-05	1,03E-03	5,56E-03
Estrada 2 - Cava 2 até a base cavas 3 e 4									
Tipo de Veículo	Idade da frota	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (FE) g/km			Taxa de Emissão (E) g/s		
	anos	t	km/dia	MP	CO	NOx	MP	CO	NOx
Caminhões Scania 8x4	2009	25	118,08	0,08	0,94	5,02	1,16E-04	1,28E-03	6,86E-03
Caminhão pipa	2009	15	0,48	0,08	0,94	5,02	4,70E-07	5,20E-06	2,79E-05
Caminhão graneleiro	2009	31,5	10,56	0,08	0,94	5,02	1,03E-05	1,14E-04	6,13E-04
Caminhão Baú	2009	10,5	5,28	0,06	0,50	2,98	3,55E-06	3,05E-05	1,82E-04
Caminhão Comboio	2009	10	10,56	0,06	0,50	2,98	7,09E-06	6,09E-05	3,64E-04
Emissão total na via							1,37E-04	1,49E-03	8,04E-03
Estrada 3 - Acesso base cavas 3 e 4 até cava 3									
Tipo de Veículo	Idade da frota	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (FE) g/km			Taxa de Emissão (E) g/s		
	anos	t	km/dia	MP	CO	NOx	MP	CO	NOx
Caminhões Scania 8x4	2009	25	36,408	0,08	0,94	5,02	3,57E-05	3,94E-04	2,11E-03
Caminhão pipa	2009	15	0,148	0,08	0,94	5,02	1,45E-07	1,60E-06	8,59E-06
Caminhão graneleiro	2009	31,5	3,256	0,08	0,94	5,02	3,19E-06	3,53E-05	1,89E-04
Caminhão Baú	2009	10,5	1,628	0,06	0,50	2,98	1,09E-06	9,39E-06	5,62E-05
Caminhão Comboio	2009	10	3,256	0,06	0,50	2,98	2,19E-06	1,88E-05	1,12E-04
Emissão total na via							4,23E-05	4,59E-04	2,48E-03

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 2 (Continuação): Inventário de Emissão dos veículos automotores nas vias não pavimentadas

Estrada 4 - Acesso base cava 2 até cava 2									
Tipo de Veículo	Idade da frota	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (FE) g/km			Taxa de Emissão (E) g/s		
	anos	t	km/dia	MP	CO	NOx	MP	CO	NOx
Caminhões Scania 8x4	2009	25	30,504	0,08	0,94	5,02	2,99E-05	3,30E-04	1,77E-03
Caminhão pipa	2009	15	0,124	0,08	0,94	5,02	1,21E-07	1,34E-06	7,20E-06
Caminhão graneleiro	2009	31,5	2,728	0,08	0,94	5,02	2,67E-06	2,96E-05	1,58E-04
Caminhão Baú	2009	10,5	1,364	0,06	0,50	2,98	9,16E-07	7,87E-06	4,70E-05
Caminhão Comboio	2009	10	2,728	0,06	0,50	2,98	1,83E-06	1,57E-05	9,41E-05
Emissão total na via							3,54E-05	3,85E-04	2,08E-03
Estrada 5 - Acesso para cava 2									
Tipo de Veículo	Idade da frota	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (FE) g/km			Taxa de Emissão (E) g/s		
	anos	t	km/dia	MP	CO	NOx	MP	CO	NOx
Caminhões Scania 8x4	2009	25	395,568	0,08	0,94	5,02	3,88E-04	4,29E-03	2,30E-02
Caminhão pipa	2009	15	1,608	0,08	0,94	5,02	1,58E-06	1,74E-05	9,34E-05
Caminhão graneleiro	2009	31,5	35,376	0,08	0,94	5,02	3,47E-05	3,83E-04	2,05E-03
Caminhão Baú	2009	10,5	17,688	0,06	0,50	2,98	1,19E-05	1,02E-04	6,10E-04
Caminhão Comboio	2009	10	35,376	0,06	0,50	2,98	2,38E-05	2,04E-04	1,22E-03
Emissão total na via							4,59E-04	4,99E-03	2,70E-02
Estrada 6 - Acesso para cava STM									
Tipo de Veículo	Idade da frota	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (FE) g/km			Taxa de Emissão (E) g/s		
	anos	t	km/dia	MP	CO	NOx	MP	CO	NOx
Caminhões Scania 8x4	2009	25	15,744	0,08	0,94	5,02	1,54E-05	1,71E-04	9,14E-04
Caminhão pipa	2009	15	0,064	0,08	0,94	5,02	6,27E-08	6,93E-07	3,72E-06
Caminhão graneleiro	2009	31,5	1,408	0,08	0,94	5,02	1,38E-06	1,53E-05	8,18E-05
Caminhão Baú	2009	10,5	0,704	0,06	0,50	2,98	4,73E-07	4,06E-06	2,43E-05
Caminhão Comboio	2009	10	1,408	0,06	0,50	2,98	9,46E-07	8,12E-06	4,86E-05
Emissão total na via							1,83E-05	1,99E-04	1,07E-03

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 2 (Continuação): Inventário de Emissão dos veículos automotores nas vias não pavimentadas

Estrada 7 - Acesso para cava 5									
Tipo de Veículo	Idade da frota	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (FE) g/km			Taxa de Emissão (E) g/s		
	anos	t	km/dia	MP	CO	NOx	MP	CO	NOx
Caminhões Scania 8x4	2009	25	114,144	0,08	0,94	5,02	1,12E-04	1,24E-03	6,63E-03
Caminhão pipa	2009	15	0,464	0,08	0,94	5,02	4,55E-07	5,03E-06	2,69E-05
Caminhão graneleiro	2009	31,5	10,208	0,08	0,94	5,02	1,00E-05	1,11E-04	5,93E-04
Caminhão Baú	2009	10,5	5,104	0,06	0,50	2,98	3,43E-06	2,95E-05	1,76E-04
Caminhão Comboio	2009	10	10,208	0,06	0,50	2,98	6,86E-06	5,89E-05	3,52E-04
Emissão total na via							1,16E-04	1,28E-03	6,89E-03

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

5.2 Vias não pavimentadas

Está previsto durante a implantação e operação do Projeto Dois Irmãos - Fase 2, a existência de sete vias sem pavimentação no interior do seu sítio industrial. Sabe-se que as emissões de partículas ocorrem sempre que os veículos viajam sobre uma superfície pavimentada, seja na forma de emissão direta, em que há a exaustão ou desgaste dos freios e pneus, ou de forma indireta, pela ressuspensão de material solto na superfície da estrada. Sabendo que a emissão exaustiva é determinada no item 5.2.1, para ressuspensão do material oriundo das vias foi utilizada a referência a AP 42, volume 1, subitem 13.2.1 (EPA, 2011), de acordo com a Equação 2.

$$EF = k\left(\frac{S}{12}\right)^a\left(\frac{W}{3}\right)^b \quad \text{Equação 2}$$

Em que: EF = fator de emissão (lb.VMT⁻¹); S = porcentagem de silte contidos na superfície (%); W = peso médio dos veículos (t) e “k”, “a” e “b” são constantes empíricas e baseadas nos tamanhos aerodinâmicos das partículas, conforme apresentado na Tabela 3; 281,9 = conversão de lb.VMT⁻¹ para kg.km⁻¹.

Tabela 3: Valores das constantes para cálculo da emissão de vias não pavimentadas

CONSTANTE	PM _{2,5}	PM ₁₀	PMP ₃₀ ^(a)
k (lb/VMT) ^(b)	0,15	1,50	4,90
A	0,90	0,90	0,70
B	0,45	0,45	0,45

Fonte: EPA, 2006a

(a) Supondo equivalente ao total de partículas em suspensão (MP) conforme descrito na EPA (2006a)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

(b) Libra/milhas viajadas por veículo.

As estradas estão sujeitas a medidas de mitigações naturais provocadas pela chuva, fato que implica numa emissão inversamente proporcional ao número de dias com precipitação superior a 0,254 mm. Por isso, a equação de determinação da emissão de poluentes (EPA, 1995) deve ser acrescida do fator de precipitação pluviométrico conforme Equação 3.

$$E = A * EF * \left(1 - \frac{ER}{100}\right) * FPP \quad \text{Equação 3}$$

Em que: E=taxa de emissão (g.s^{-1}); A = atividade: distância percorrida pelos veículos por tempo (km.h^{-1}); EF=fator de emissão (kg.km^{-1}); ER= eficiência global de redução de emissões (%); FPP (fator de precipitação pluviométrica)=(365-P)/365 e P=número de dias no ano com precipitação superior a 0,254 mm;

Para a determinação das taxas de emissão das vias não pavimentadas foram consideradas as seguintes premissas:

- O peso dos veículos foi obtido considerando a média mássica da frota vazia e carregada;
- Os caminhões são movidos a diesel;
- O número de dias no ano com precipitação superior a 0,254 mm foi obtido dos dados meteorológicos utilizados neste estudo (P=486 dias). Ressalta-se que foram utilizados dados referentes a três anos (janeiro de 2018 a dezembro de 2020), ou seja, total de 1096 dias. Logo, FPP=0,56;
- Em virtude da inexistência de dados reais de % de silte, foi considerado um valor médio (6,0%), previsto para estrada de acesso a indústrias processadoras de ferro conforme EPA (2011);
- A medida de mitigação adotada pelo empreendimento para minimizar a emissão de particulado na via sem pavimentação é a aspersão contínua de água contínua. De acordo com WRAP (2006), a aspersão de água em vias não pavimentadas reduz a emissão entre 10 a 74%, portanto, utilizou-se para o presente estudo utilizou-se ER=74% devido a constante aspersão das vias.

A Tabela 4 apresenta os dados considerados nas estimativas das taxas de emissão da via não pavimentada do empreendimento. Salienta-se que apesar de ter sido feito uma estimativa por tipo de veículo, a emissão global da via refere-se ao somatório de emissão de todos os veículos que por ela percorrem.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 4: Inventário de Emissão da via do empreendimento

Estrada 1 - Acesso base cavas 3 e 4 até cava 4											
Qtd veículos que trafegam	Tipo de Veículo	Idade média da frota	Qtd viagens /dia	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (EF) g/km			Taxa de Emissão (EF) g/s		
		ano	ida/volta	t	km/dia	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
12	Caminhões Scania 8x4	2009	41	25	81,672	58,83	588,34	2207,69	8,05E-03	8,05E-02	3,02E-01
2	Caminhão pipa	2009	1	15	0,332	46,75	467,52	1754,31	2,60E-05	2,60E-04	9,75E-04
2	Caminhão graneleiro	2009	22	32	7,304	65,28	652,82	2449,66	7,99E-04	7,99E-03	3,00E-02
1	Caminhão Baú	2009	22	11	3,652	39,82	398,19	1494,17	2,44E-04	2,44E-03	9,14E-03
2	Caminhão Comboio	2009	22	10	7,304	38,95	389,54	1461,72	4,77E-04	4,77E-03	1,79E-02
EMIÇÃO TOTAL ESTRADA									9,6E-03	9,6E-02	3,6E-01
Estrada 2 - Cava 2 até a base cavas 3 e 4											
Qtd veículos que trafegam	Tipo de Veículo	Idade média da frota	Qtd viagens /dia	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (EF) g/km			Taxa de Emissão (EF) g/s		
		ano	ida/volta	t	km/dia	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
12	Caminhões Scania 8x4	2009	41	25	118,08	58,83	588,34	2207,69	1,16E-02	1,16E-01	4,37E-01
2	Caminhão pipa	2009	1	15	0,48	46,75	467,52	1754,31	3,76E-05	3,76E-04	1,41E-03
2	Caminhão graneleiro	2009	22	32	10,56	65,28	652,82	2449,66	1,15E-03	1,15E-02	4,33E-02
1	Caminhão Baú	2009	22	11	5,28	39,82	398,19	1494,17	3,52E-04	3,52E-03	1,32E-02
2	Caminhão Comboio	2009	22	10	10,56	38,95	389,54	1461,72	6,89E-04	6,89E-03	2,59E-02
EMIÇÃO TOTAL ESTRADA									1,4E-02	1,4E-01	5,2E-01
Estrada 3 - Acesso base cavas 3 e 4 até cava 3											
Qtd veículos que trafegam	Tipo de Veículo	Idade média da frota	Qtd viagens /dia	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (EF) g/km			Taxa de Emissão (EF) g/s		
		ano	ida/volta	t	km/dia	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
12	Caminhões Scania 8x4	2009	41	25	36,408	58,83	588,34	2207,69	3,59E-03	3,59E-02	1,35E-01
2	Caminhão pipa	2009	1	15	0,148	46,75	467,52	1754,31	1,16E-05	1,16E-04	4,35E-04
2	Caminhão graneleiro	2009	22	32	3,256	65,28	652,82	2449,66	3,56E-04	3,56E-03	1,34E-02
1	Caminhão Baú	2009	22	11	1,628	39,82	398,19	1494,17	1,09E-04	1,09E-03	4,07E-03
2	Caminhão Comboio	2009	22	10	3,256	38,95	389,54	1461,72	2,12E-04	2,12E-03	7,97E-03
EMIÇÃO TOTAL ESTRADA									4,3E-03	4,3E-02	1,6E-01

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 4 (Continuação): Inventário de Emissão da via do empreendimento

Estrada 4 - Acesso base cava 2 até cava 2											
Qtd veículos que trafegam	Tipo de Veículo	Idade média da frota	Qtd viagens /dia	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (EF) g/km			Taxa de Emissão (EF) g/s		
		ano	ida/volta	t	km/dia	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
12	Caminhões Scania 8x4	2009	41	25	30,504	58,83	588,34	2207,69	3,01E-03	3,01E-02	1,13E-01
2	Caminhão pipa	2009	1	15	0,124	46,75	467,52	1754,31	9,71E-06	9,71E-05	3,64E-04
2	Caminhão graneleiro	2009	22	32	2,728	65,28	652,82	2449,66	2,98E-04	2,98E-03	1,12E-02
1	Caminhão Baú	2009	22	11	1,364	39,82	398,19	1494,17	9,10E-05	9,10E-04	3,41E-03
2	Caminhão Comboio	2009	22	10	2,728	38,95	389,54	1461,72	1,78E-04	1,78E-03	6,68E-03
EMIÇÃO TOTAL ESTRADA									3,6E-03	3,6E-02	1,3E-01
Estrada 5 - Acesso para cava 2											
Qtd veículos que trafegam	Tipo de Veículo	Idade média da frota	Qtd viagens /dia	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (EF) g/km			Taxa de Emissão (EF) g/s		
		ano	ida/volta	t	km/dia	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
12	Caminhões Scania 8x4	2009	41	25	395,568	58,83	588,34	2207,69	3,90E-02	3,90E-01	1,46E+0
2	Caminhão pipa	2009	1	15	1,608	46,75	467,52	1754,31	1,26E-04	1,26E-03	4,72E-03
2	Caminhão graneleiro	2009	22	32	35,376	65,28	652,82	2449,66	3,87E-03	3,87E-02	1,45E-01
1	Caminhão Baú	2009	22	11	17,688	39,82	398,19	1494,17	1,18E-03	1,18E-02	4,43E-02
2	Caminhão Comboio	2009	22	10	35,376	38,95	389,54	1461,72	2,31E-03	2,31E-02	8,66E-02
EMIÇÃO TOTAL ESTRADA									4,6E-02	4,6E-01	1,7E+00
Estrada 6 - Acesso para cava STM											
Qtd veículos que trafegam	Tipo de Veículo	Idade média da frota	Qtd viagens /dia	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (EF) g/km			Taxa de Emissão (EF) g/s		
		ano	ida/volta	t	km/dia	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
12	Caminhões Scania 8x4	2009	41	25	15,744	58,83	588,34	2207,69	1,55E-03	1,55E-02	5,82E-02
2	Caminhão pipa	2009	1	15	0,064	46,75	467,52	1754,31	5,01E-06	5,01E-05	1,88E-04
2	Caminhão graneleiro	2009	22	32	1,408	65,28	652,82	2449,66	1,54E-04	1,54E-03	5,78E-03
1	Caminhão Baú	2009	22	11	0,704	39,82	398,19	1494,17	4,70E-05	4,70E-04	1,76E-03
2	Caminhão Comboio	2009	22	10	1,408	38,95	389,54	1461,72	9,19E-05	9,19E-04	3,45E-03
EMIÇÃO TOTAL ESTRADA									1,8E-03	1,8E-02	6,9E-02

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 4 (Continuação): Inventário de Emissão da via do empreendimento

Estrada 7 (Acesso para cava 5)											
Qtd veículos que trafegam	Tipo de Veículo	Idade média da frota	Qtd viagens /dia	Peso médio veículos (W)	Quilometragem percorrida total por categoria	Fator de Emissão (EF) g/km			Taxa de Emissão (EF) g/s		
		ano	ida/volta	ton	km/dia	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
12	Caminhões Scania 8x4	2009	41	25	114,144	58,83	588,34	2207,69	1,12E-02	1,12E-01	4,22E-01
2	Caminhão pipa	2009	1	15	0,464	46,75	467,52	1754,31	3,63E-05	3,63E-04	1,36E-03
2	Caminhão graneleiro	2009	22	32	10,208	65,28	652,82	2449,66	1,12E-03	1,12E-02	4,19E-02
1	Caminhão Baú	2009	22	11	5,104	39,82	398,19	1494,17	3,40E-04	3,40E-03	1,28E-02
2	Caminhão Comboio	2009	22	10	10,208	38,95	389,54	1461,72	6,66E-04	6,66E-03	2,50E-02
EMIÇÃO TOTAL ESTRADA									1,3E-02	1,3E-01	5,0E-01

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

5.3 Movimentação de Material

A movimentação de material prevista para o empreendimento ocorre nos processos de carregamento e descarregamento das pilhas e na movimentação das cavas, provocando assim uma elevação de poeira na atmosfera. A metodologia adotada para estimativa da emissão atmosférica decorrente da carga e descarga de material é a AP 42, volume 1, subitem 13.2.4 (EPA, 2006b), de acordo com a Equação 4.

$$F = k(0,0016) \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}} \quad \text{Equação 4}$$

Em que: EF = fator de emissão (kg de partículas gerada/Mg de material movimentado⁻¹); U = velocidade média do vento (m.s⁻¹); M = teor de umidade do material (%) e k = constante dependente do tamanho da partícula (adimensional) conforme Tabela 5.

Tabela 5: Dependência da constante k com o tamanho das partículas

Aerodynamic Particle Size Multiplier (k) For Equation 1				
< 30 µm	< 15 µm	< 10 µm	< 5 µm	< 2.5 µm
0.74	0.48	0.35	0.20	0.053 ^a

Fonte: EPA (2006b)

Após a determinação do fator de emissão é definida a emissão conforme metodologia apresentada pela EPA (1995). Entretanto, sabendo que a precipitação pluviométrica se trata de um mecanismo natural de mitigação de poluição, deve-se considerá-la na função de estimativa da taxa de emissão conforme Equação 5.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

$$E = A * EF * \left(1 - \frac{ER}{100}\right) * FPP \quad \text{Equação 5}$$

Em que: E=taxa de emissão (g.s⁻¹); A = atividade: taxa de movimentação de materiais (ton.mês⁻¹); EF=fator de emissão (kg de particulado gerado/Mg de material movimentado⁻¹); ER= eficiência global de redução de emissões (%); FPP (fator de precipitação pluviométrica)= e P=número de dias no ano com precipitação superior a 0,254 mm;

A Tabela 6 apresenta as estimativas de emissão da movimentação de material por retirada de caminhão, sendo que para sua determinação foram consideradas as seguintes premissas:

- A velocidade média dos ventos utilizados neste estudo é igual a 2,21 m.s⁻¹;
- FPP=0,56, pois P=486;
- Sabendo que mina utiliza o mecanismo de aspersão de águas nas frentes de lavra e pilhas, foi considerada a Eficiência Global de redução igual a 80% que equivale ao valor médio referente à faixa de redução de poeira de 70-90% sugerida por TURNER *et.al* (1987) em casos de aspersão de água em pilhas/cavas.

Tabela 6: Emissão de material particulado pela movimentação de materiais

Fonte	Material	Alt. (m)	Taxa processada (t/ano)	Umidade (M) (%)	Fator de Emissão (FE) [kg particulado gerado/Mg movimentado]			Taxa de Emissão (E) [g/s]		
					PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
Cava 1 - STM	Minério de Ferro	11	265000	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	1,1E-05	7,6E-05	1,6E-04
Cava 2	Minério de Ferro	11	265000	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	1,1E-05	7,6E-05	1,6E-04
Cava 3	Minério de Ferro	11	265000	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	1,1E-05	7,6E-05	1,6E-04
Cava 4	Minério de Ferro	11	265000	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	1,1E-05	7,6E-05	1,6E-04
Cava 5	Minério de Ferro	11	265000	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	1,1E-05	7,6E-05	1,6E-04
Pilha Estéril - PDE Princial	Estéril franco	11	631250	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	2,7E-05	1,8E-04	3,8E-04
Pilha Estéril - PDE Cava 5	Formação Ferrífera	11	631250	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	2,7E-05	1,8E-04	3,8E-04
Pilha de granulado	Granulado	11	666667	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	2,9E-05	1,9E-04	4,0E-04
Pilha de Hematitinha	Hematitinha	11	666667	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	2,9E-05	1,9E-04	4,0E-04
Pilha de finos naturais	Finos Naturais	11	666667	8	1,2E-05	8,1E-05	1,7E-04	2,9E-05	1,9E-04	4,0E-04

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

5.4 Arraste Eólico

A ação do vento sobre pilhas e áreas abertas apresentadas no item 5.2.3 provoca a geração de poeira, dispersando material particulado no ambiente. A estimativa da emissão deste poluente pela ação eólica é realizada pela metodologia apresentada pela AP-42, capítulo 13, subitem 13.2.5, conforme Equação 6.

$$EF = k \sum_{i=1}^N P_i \quad \text{Equação 6}$$

Em que: EF = Fator de emissão de material particulado provenientes da ação eólica, dado em $\text{g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$; k = constante empírica adimensional relacionada ao tamanho das partículas (Tabela 7); N = Número de distúrbios por ano e P = Potencial de erosão correspondente à velocidade de vento mais elevada (Equações 7 e 8), no período “i” entre os distúrbios, dado em g.m^{-2} ;

Tabela 7: Constante k para fator de emissão de arraste eólico conforme tamanho aerodinâmico das partículas

Fator K conforme tamanho aerodinâmico das partículas			
30 μm	15 μm	10 μm	2.5 μm
1.0	0.6	0.5	0.075

Fonte: EPA, 2006c.

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \quad \text{Equação 7}$$

$$P = 0 \text{ para } u^* \leq u_t^* \quad \text{Equação 8}$$

Em que u^* = velocidade de fricção (atrito) do vento (m.s^{-1}) com a superfície determinada pela Equação 9 e u_t^* = velocidade de fricção mínima do vento (m.s^{-1}) necessária para a ocorrência de emissão e que depende das características do material e da pilha.

$$u^* = 0,053 u_{10}^+ \quad \text{Equação 9}$$

Em que u_{10}^+ = é definida como a maior velocidade (m.s^{-1}) do vento nos períodos entre os distúrbios obtidos por um anemômetro de 10 m de altura.

Definido os fatores de emissão, calculou-se a taxa de emissão de material particulado conforme Equação 10, baseado na metodologia apresentada pela EPA (1995). Ressalta-se a que esta equação foi corrigida com o fator de precipitação pluviométrica devido às quedas de água serem mecanismos naturais no controle de lançamento de poluentes.

$$E = A * EF * \left(1 - \frac{ER}{100}\right) * FPP \quad \text{Equação 10}$$

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Em que E = taxa de emissão (g.s^{-1}); A = taxa de atividade: área exposta à ação dos ventos (m^2); EF = fator de emissão ($\text{g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$); ER = eficiência global de redução de emissões (%); FPP (fator de precipitação pluviométrica) = $\frac{(365-P)}{365}$; P=número de dias no ano com precipitação superior a 0,254 mm.

As estimativas de emissão decorrentes da ação eólica sobre os pontos de exposição de materiais do empreendimento foram quantificadas considerando as seguintes premissas:

- A velocidade mínima de fricção do vento foi determinada pela metodologia EPA (2006c), conforme indicada na Tabela 8. Salienta-se que a AP-42, subitem 13.2.5, não prevê a tal velocidade para determinados tipos de materiais, portanto, não muitas vezes não abrangendo o material em questão estudado. Dessa forma, utilizou-se o composto que mais se assemelhava em granulometria.
- A velocidade de fricção do vento (u^*) foi obtida a partir da multiplicação da maior velocidade do vento, extraída do período de três anos dos dados do WRF gerado para região, pelo valor de 0,053, conforme sugerido pela metodologia EPA (2006c), Equação 9. Logo, $u^*=0,503 \text{ m.s}^{-1}$;

Tabela 8: Velocidade de fricção para materiais de referência conforme metodologia AP42

Materiais		Vel. de fricção mínima do vento (u^*)
Overburden	Sobrecarga (rocha, solo, etc)	1,02
Scoria (roadbed material)	Escória (material da estrada)	1,33
Ground coal (surrounding coal pile)	Carvão moído	0,55
Uncrusted coal pile	Pilha de carvão não incrustada	1,12
Scraper tracks on coal pile	Faixas de raspador na pilha de carvão	0,62
Fine coal dust concrete pad	Bloco de concreto em pó de carvão fino	0,54

Fonte: EPA (2006c).

Ressalta-se que em virtude da inexistência de dados reais de velocidade de fricção mínima do vento por tipo de material, utilizaram-se os valores de referência para materiais que mais se assimilam ao material estudado, conforme apresentado pela EPA (2006c) e apresentados na Tabela 8. Porém, como se pode notar, as velocidades de fricção mínimas do vento (u^*) são maiores que a velocidade de fricção ($u^*=0,360$) para todas as pilhas e cavas, por tanto, quando $u^* \leq u_t^*$ não há arraste eólico ($P=0$) (Tabela 9).

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 9: Inventário de emissão por arraste eólico

Denominação	Material	Gran. (mm)	Área de exposição	Número de Distúrbio	Vel. de fricção mín do vento (ut*)	Fator de Emissão (FE) (g/m².ano)			Taxa de Emissão (g/s)		
			m²/h	nº/ano	m/s	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
Cava 1 - STM	Minério de Ferro	Alta	25	14965,00	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cava 2	Minério de Ferro	Alta	25	14965,00	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cava 3	Minério de Ferro	Alta	25	14965,00	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cava 4	Minério de Ferro	Alta	25	14965,00	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cava 5	Minério de Ferro	Alta	25	14965,00	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pilha Estéril - PDE Princial	Estéril franco	Média	25	14965,00	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pilha Estéril - PDE Cava 5	Formação Ferrífera	Média	25	14965,00	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pilha de granulado	Granulado	Baixa	25	14965,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pilha de Hematitinha	Hematitinha	Baixa	25	14965,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pilha de finos naturais	Finos Naturais	Baixa	25	14965,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

5.5 Equipamentos Móveis

O empreendimento irá dispor de 8 equipamentos móveis, todos com combustão a diesel. A estimativa de emissão desse tipo de fonte é baseada na metodologia proposta pela norma AP42 seção 3.3 (EPA, 1996), para equipamentos com potência inferior a 600 cv (441 kW) e seção 3.4 para equipamentos com potência superior a 600 cv. Definido os fatores, a taxa de emissão foi determinada pela metodologia apresentada pela (EPA, 1995a), conforme Equação 11. Entretanto, como os equipamentos operam ao ar livre, inseriu-se o fator de precipitação pluviométrico (FPP) por tratar-se de um mecanismo natural de mitigação de emissão.

$$E = A * EF * \left(1 - \frac{ER}{100}\right) * FPP \quad \text{Equação 11}$$

Em que E=taxa de emissão (g.s⁻¹), A = Atividade: potência do motor operada em um determinado tempo (kWh.ano⁻¹); EF=fator de emissão (Kg de poluente.kWh⁻¹); ER= eficiência global de redução de emissões (%); FPP (fator de precipitação pluviométrica)= e P=número de dias no ano com precipitação superior a 0,254 mm;

A Tabela 10 apresenta os dados utilizados para obtenção da taxa de emissão referente a operação dos equipamentos. Ressalta-se que para cálculo da emissão, a taxa de atividade (A) necessária no equacionamento 11 foi obtida pelo produto da potência

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

pelas horas anuais de operação (kWh.ano⁻¹). Como a norma não prevê fator de emissão para os poluentes PM_{2,5} e MP, foi considerada a emissão destes, equivalente a MP.

Tabela 10: Inventário de emissão dos Equipamentos Móveis

Equipamento	Qtd	Potência Motor (kW)	Horas de funcionamento (h/ano)	Fator de Emissão (FE) (g/kWh)				Taxa de Emissão (E) (g/s)			
				NOx	CO	SOx	PM10	NOx	CO	Sox	PM10
Retroescavadeira a Liebherr 964	3	320,00	6.935	18,85	4,06	1,25	1,34	2,215	0,477	0,146	0,157
Motoniveladora CAT 16M	2	259,00	6.935	18,85	4,06	1,25	1,34	1,195	0,257	0,079	0,085
Trator CAT D9	1	306,00	6.935	18,85	4,06	1,25	1,34	0,706	0,152	0,047	0,050
Trator CAT D6	1	111,80	6.935	18,85	4,06	1,25	1,34	0,258	0,056	0,017	0,018
Trator Komatsu WD 600	1	296,42	6.935	18,85	4,06	1,25	1,34	0,684	0,147	0,045	0,049

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

5.6 Britagem

Durante a cominuição as partículas finas de poeira contidas no minério se desagregam, provocando a emissão de material particulado no ambiente. A estimativa da emissão deste poluente é realizada pela metodologia apresentada pela AP-42, capítulo 11, subitem 24 Metallic Minerals Processing (EPA, 1982). Pela tabela 11.24-1 desta norma, o fator de emissão para particulados depende da umidade do material processado e define-se como Low-moisture ore aquele que a umidade está abaixo de 4% e High-moisture ore aquele acima deste valor. Assim, baseando-se na umidade característica do minério que será processado no empreendimento, foram utilizados os fatores de emissão referentes aos minérios de alta umidade.

Definido os fatores de emissão, calculou-se a taxa de emissão de material particulado conforme Equação 12, baseado na metodologia apresentada pela EPA (1995). Esta fórmula foi corrigida com o fator de precipitação pluviométrico (FPP) em virtude de os britadores serem a céu aberto.

$$E = A * EF * (1 - ER / 100) * FPP \quad \text{Equação 12}$$

Em que E=taxa de emissão (g.s⁻¹), A = Atividade: massa média de material fragmentado por tempo (Mg.mês⁻¹); EF=fator de emissão (Kg de poluente.Mg de material processado⁻¹); ER= eficiência global de redução de emissões (%); FPP (fator de precipitação pluviométrica)=(365-P) / 365 e P=número de dias no ano com precipitação superior a 0,254 mm;

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

A Tabela 11 apresenta as estimativas de emissão do processo de Britagem e Peneiramento da unidade, sendo que para sua determinação foram consideradas as seguintes premissas:

- Foram considerados os fatores de emissão para materiais com umidades superiores a 4%;
- FPP=0,56, pois P=486;

Tabela 11: Inventário de Emissão do processo de Britagem/Moagem/Peneiramento

Tipo	Massa de material total (t/ano)	Qtd	Umidade (%)	Fator de emissão (FE) (g/s)			Taxa de emissão (E) (g/s)		
				PM _{2,5}	PM ₁₀	MP	PM _{2,5}	PM ₁₀	MP
Alimentador vibratório modelo 60128	265000,0	1	8	4,00E-03	4,00E-03	1,00E-02	1,87E-02	1,87E-02	4,68E-02
Peneira Scalper, modelo 40015 1D	265000,0	1	8	1,20E-02	1,20E-02	3,00E-02	5,61E-02	5,61E-02	1,40E-01

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

5.7 Detonação

O processo de desmonte de minério nas cavas da do projeto Dois Irmãos - Fase 2 ocorrerá por uso de explosivos, material químico que sofre combustão rápida, resultando em uma explosão ou detonação. Deste procedimento são gerados poluentes atmosféricos, dentre eles gases e material particulado, sendo a quantidade emitida dependendo do tipo de explosivo e quantidade utilizada.

Sabendo que o explosivo utilizado é uma emulsão, para estimativa de emissões atmosféricas oriundas de detonação foi utilizada a metodologia proposta pela AP-42, capítulo 13, subitem 13.3 (Explosives Detonation) (EPA, 1980). A estimativa da taxa de emissão seguiu conforme Equação 13. Ressalta-se que foi considerada na equação a ação da precipitação no controle de emissão uma vez que a chuva reduz o impacto da emissão atmosférica.

$$E = A * EF * \left(1 - \frac{ER}{100}\right) * FPP \quad \text{Equação 13}$$

Em que: E= emissão anual por poluente; A = taxa de atividade ao longo de um ano (horas de operação, número de operações, tonelagem usada, etc.); EF=fator de emissão (kg de poluente gerado.tonelada de explosivo utilizado-1); ER= eficiência global de redução de emissões (%); FPP (fator de precipitação pluviométrica) e P=número de dias no ano com precipitação superior a 0,254 mm.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Salienta-se que as metodologias de estimativa de emissão atmosférica de processos de detonação não estimam emissão de material particulado oriundo da degradação do solo em virtude da impossibilidade de determinar este valor. A Tabela 12 apresenta as taxas de emissão obtidas.

Tabela 12: Inventário de emissões do processo de detonação

Parâmetros					
FPP	Fator de precipitação pluviométrica			0,56	
ER	Eficiência de redução (%)			0,0	
EF	fator de emissão (kg/Mg)			34	8
Denominação	Cód.	Atividade		Taxa de emissão (E) (g/s)	
		Quantidade de explosões por semana	Massa de explosível por detonação (ton)	CO	NOx
Detonação	DET01	1	5	0,563	0,133

Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

5.8 Perfuratriz

A mina utilizará de perfuratrizes para gerar furos no minério antes da inserção da massa explosiva. No momento de perfuração há emissão de material particulado, sendo a mesma estimada pela norma AP-42, capítulo 11, subitem 11.19.2 (Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing) que propõe fatores de emissão para perfuração úmida (EPA, 1995b).

A taxa de emissão proposta pela norma AP 42 volume 1 foi alterada, inserindo-se o fator de precipitação pluviométrico (FPP) de acordo com a Equação 14 uma vez que o processo de perfuração está sujeito a ação natural da chuva.

$$E = A * EF * FPP \quad \text{Equação 14}$$

Em que: E=taxa de emissão (g.s⁻¹); A = Atividade: taxa de material perfurado (kg.furo⁻¹); EF=fator de emissão (kg de poluentes gerados.Mg de material perfurado⁻¹); FPP (fator de precipitação pluviométrica)=(365-P) / 365; P=número de dias no ano com precipitação superior a 0,254 mm.

Salienta-se que em virtude da inexistência de fatores de emissão para os particulados MP e PM_{2,5} previstos pela AP-42, capítulo 11, subitem 11.19.2, utilizou-se a taxa de emissão referente ao PM₁₀ durante a inserção de dados no software de simulação computacional.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

A Tabela 13 apresenta a estimativa de emissão decorrente das operações da perfuratriz, sendo que para sua determinação foram consideradas as seguintes premissas:

- FPP=0,56, pois P=486;

Tabela 13: Inventário e Emissão das Perfuratrizes

Atividade	Fator de emissão (kg/Mg)			Taxa de Emissão (g/s)		
Taxa de Material desprendido (ton/hrs)	MP	PM ₁₀	PM _{2,5}	MP	PM ₁₀	PM _{2,5}
228,938	ND	4,00E-05	ND	1,42E-03	1,42E-03	1,42E-03

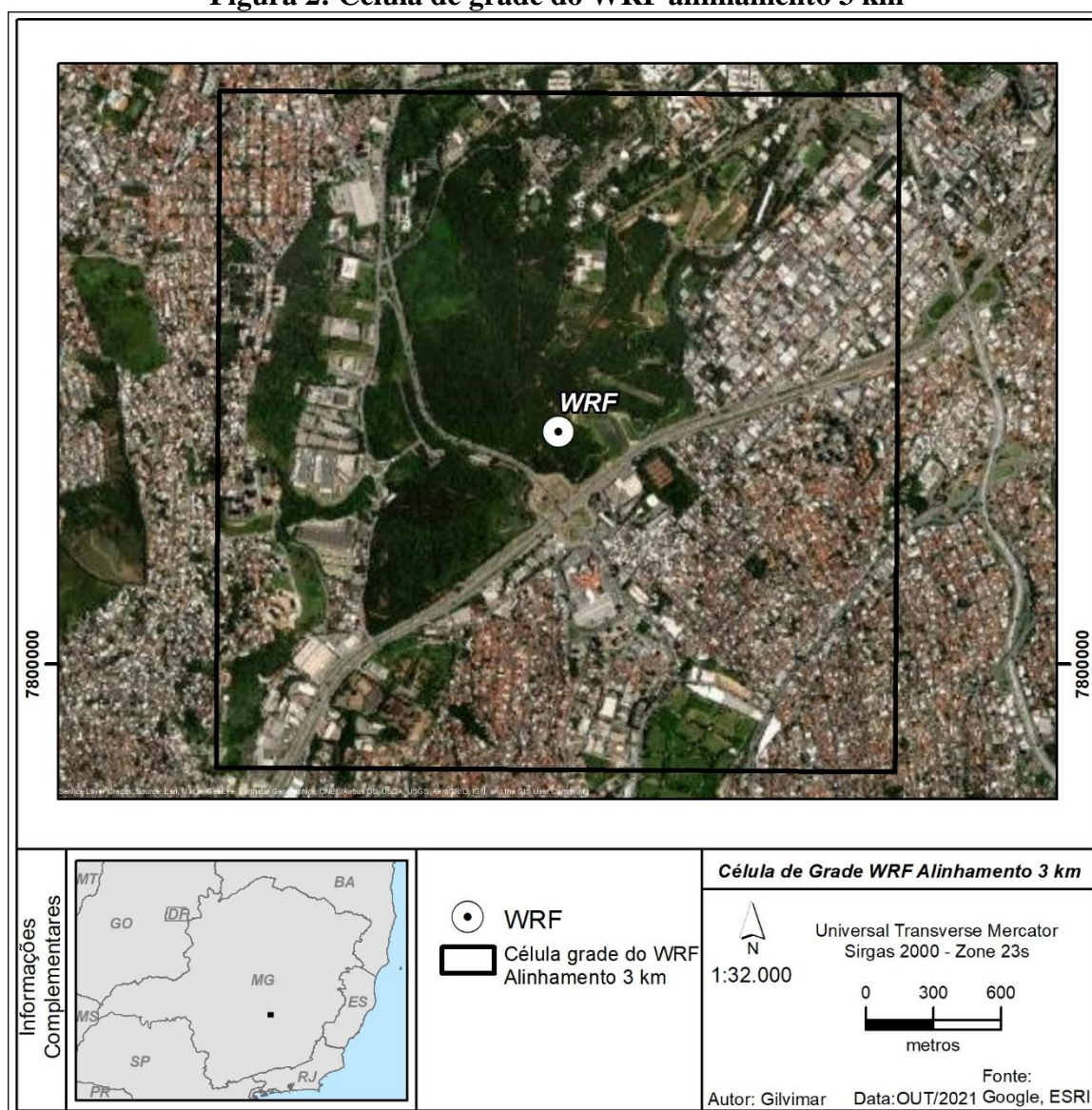
Fonte: Memorial de cálculo do Inventário de Emissões

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

6 DADOS METEOROLÓGICOS

Para este estudo foi necessária a utilização de dados meteorológicos horários simulados pelo modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o período compreendido entre janeiro de 2018 a dezembro de 2020. A utilização dessa modelagem fez-se necessária devido à inexistência de estação meteorológica dentro de um raio de 50 km como sugerido pela (FEAM, 2019b). Portanto, foram utilizados dados do WRF com célula de grade do WRF com 3 x 3 km, centralizada nas coordenadas longitude 607889.75 m E / latitude 7801031.21 m S / Zona 23 K, e alinhamento de 75, 15 e 3 km.

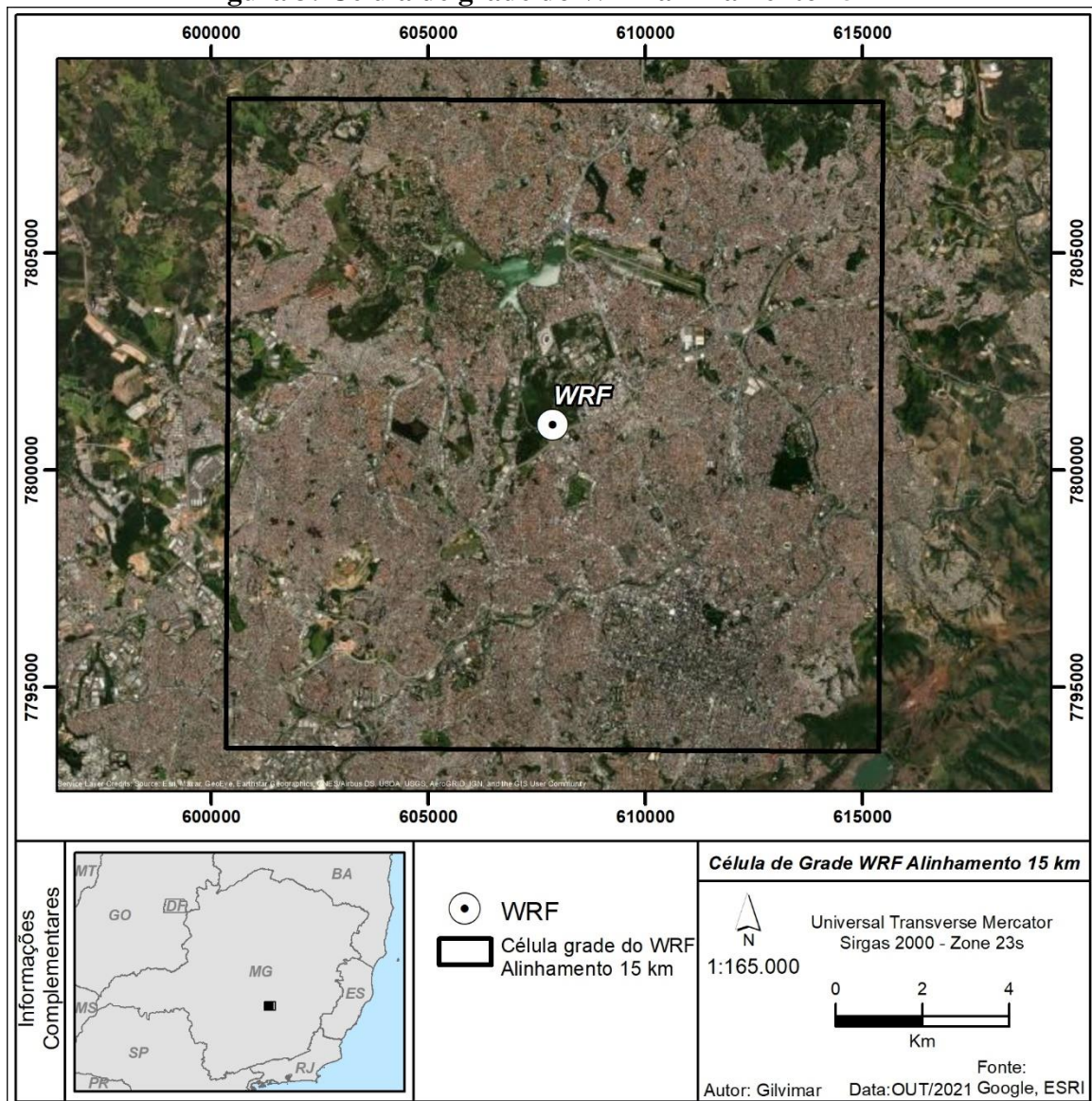
Figura 2: Célula de grade do WRF alinhamento 3 km



Fonte: QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 3: Célula de grade do WRF alinhamento 15 km

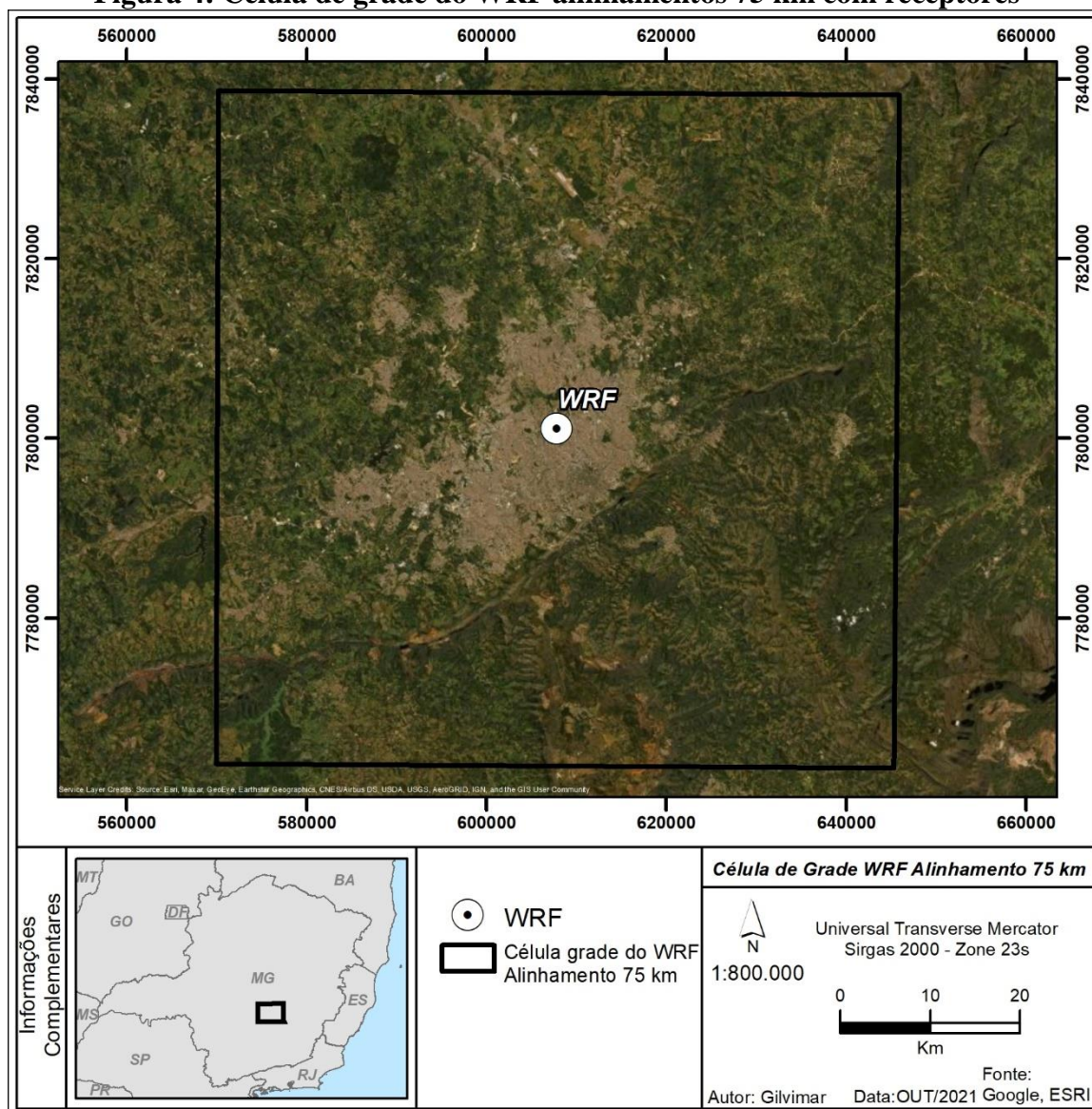


Fonte: QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 4: Célula de grade do WRF alinhamentos 75 km com receptores



Fonte: QGIS (Versão 3.16.3)

A modelagem com WRF gerou um arquivo horário em formato SAMSON (.SAM) com todos os dados meteorológicos mínimos exigidos para simulação da dispersão atmosférica (direção e intensidade instantânea do vento, temperatura do ar e cobertura de nuvens). Além desses, foram gerados os parâmetros de superfície (albedo, coeficiente de Bowen, e rugosidade) por meio do arquivo AERSURFACE Output File (.OUT) e os parâmetros verticais da atmosfera como pressão, temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho, além da direção e velocidade do vento, pelo arquivo (.FSL). Desta forma, tais arquivos foram inseridos no modelo AERMET, pré-processador do modelo AERMOD

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Os dados meteorológicos simulados foram avaliados estatisticamente por um meteorologista, onde foi comprovada a existência de mais de 90% das medições válidas, conforme Apêndice- Validação Meteorológica.

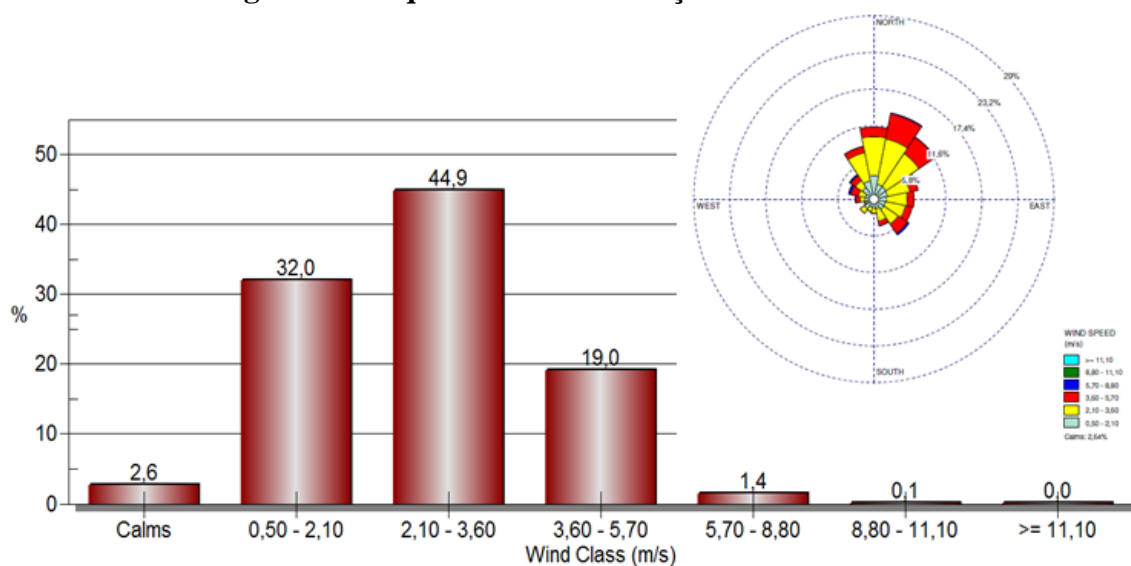
PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

7 MODELAGEM DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

7.1 Processamento dos dados meteorológicos (AERMET)

Os dados meteorológicos horários medidos pelo WRF são avaliados com maior detalhamento no Relatório Meteorológico no *Apêndice-Validação Meteorológica*. Como observado, os ventos se originam predominantemente com uma componente mais forte de direção norte e nordeste. Observa-se que 2,6% dos ventos são calmos, que 76,9% são classificados como ventos de bafagem/aragem, pois apresentam velocidade entre $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ a $3,6 \text{ m.s}^{-1}$ e 19,0% são classificados como ventos fracos, pois possuem velocidade entre $3,6 \text{ m.s}^{-1}$ a $5,7 \text{ m.s}^{-1}$ (MARINHA DO BRASIL, 2021). Ventos de bafagem/aragem movem-se constante, mas ligeiramente. Já os ventos fracos propiciam o movimento constante de folhas de árvores, ambos contribuindo com a mistura dos poluentes no ar limpo.

Figura 5: Frequência de distribuição e rosa dos ventos



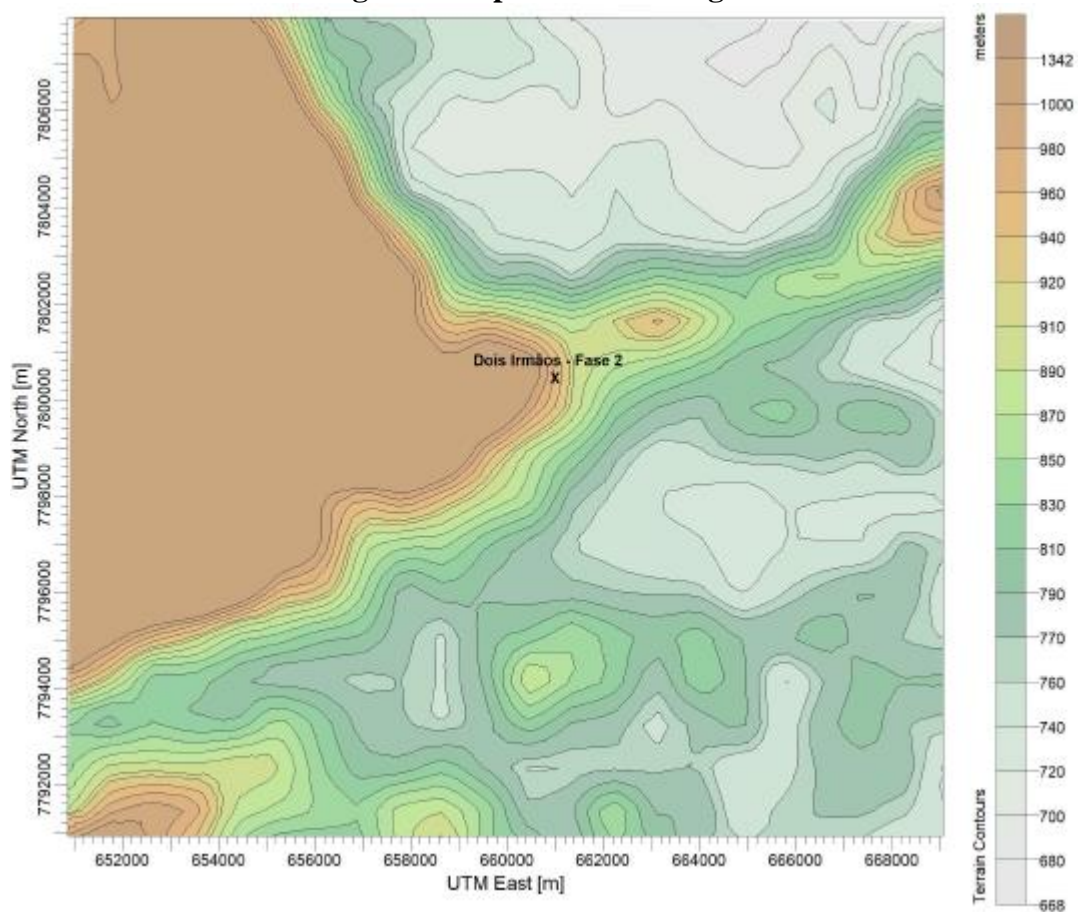
Fonte: AERMET (Alterado)

7.2 Processamento dos dados topográficos (AERMAP)

A atual versão do AERMAP permite o download automático de vários formatos de arquivos de relevo, sendo que o formato utilizado neste estudo é o SRTM Global (Shuttle Radar Topography Mission) de 30 metros, conforme Figura 6. Ressalta-se que as elevações registradas pelo SRTM representam a “altura refletida”, ou seja, as alturas de obstáculos como edifícios e árvores já são consideradas (EPA, 2018).

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 6: Hipsometria da região



Fonte: AERMAP

7.3 Processamento do modelo de dispersão AERMOD

Foi utilizado neste estudo o software AERMOD View, versão 9.8.3 da fabricante Lakes Environmental em suas condições “default”.

7.3.1 Fontes de Emissão

A emissão atmosférica oriunda do efeito eólico sobre as estradas foi considerada como fonte linha área no modelo AERMOD. A emissão decorrente da movimentação de veículos nas estradas e das correias transportadoras foram classificadas como fonte linha volume, e as demais fontes em estudo, fontes área.

7.3.2 Receptores Sensíveis

O projeto Dois Irmãos - Fase 2 está localizada próximo dos municípios Barão de Cocais e Cocais, em que foram selecionados alguns receptores sensíveis vizinhos ao empreendimento, conforme Tabela 14 e representação na Figura 7. Esses receptores referem-se a regiões sensíveis, com circulação populacional próxima ao empreendimento.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

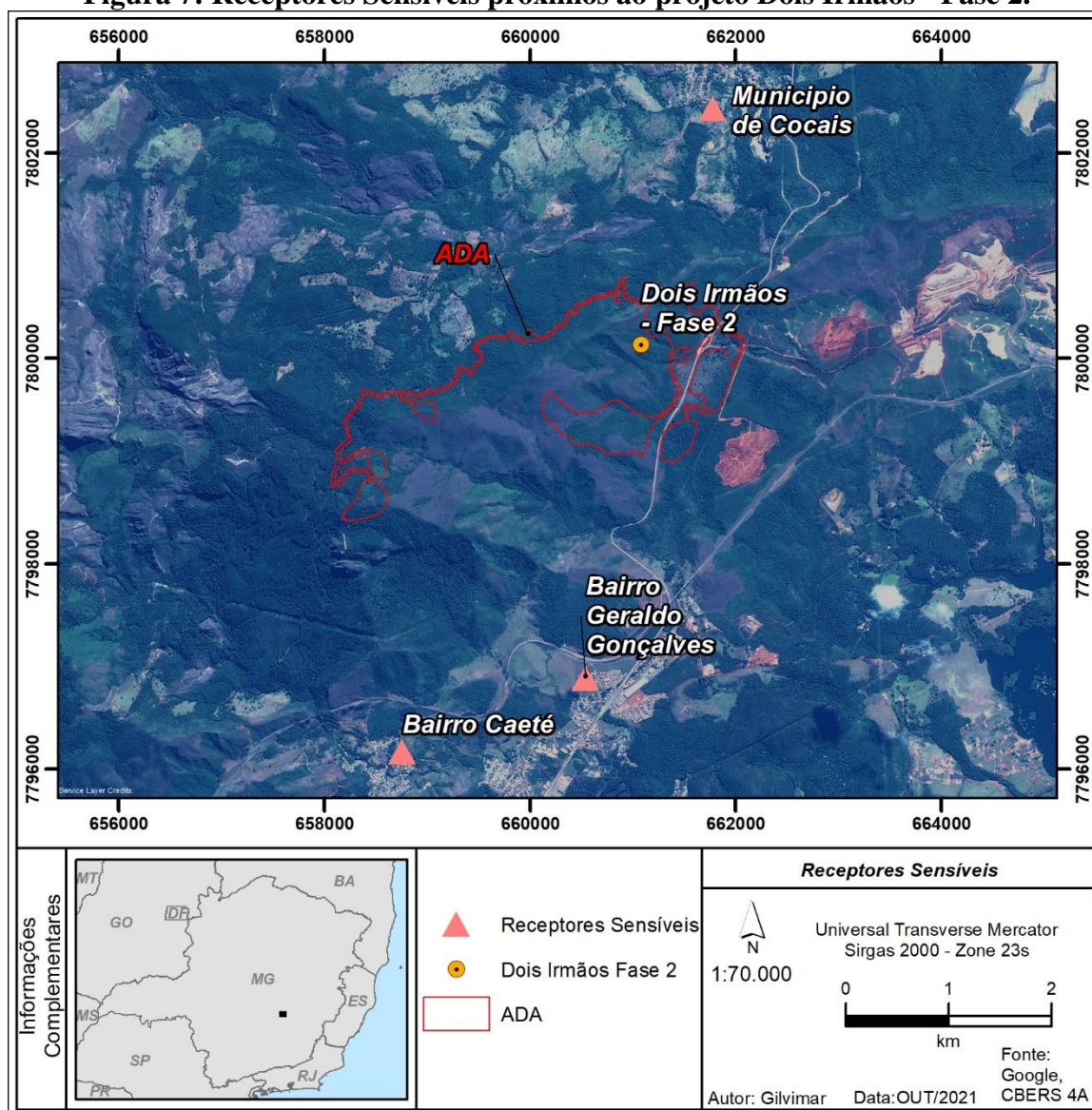
Para a simulação foi considerado uma grade de 750 metros, com 21 pontos totalizando um quadrante de 15,00 quilômetros de lado com 441 receptores.

Tabela 14: Receptores Sensíveis

Cod.	Denominação	Coordenadas (UTM)	
		Longitude	Latitude
R01	Município de Cocais	661781	7802435
R02	Bairro Geraldo Gonçalves	660544	7796886
R03	Bairro Caeté	658759	7796167

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 7: Receptores Sensíveis próximos ao projeto Dois Irmãos - Fase 2.



Fonte: QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

8 RESULTADOS DA MODELAGEM DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Baseado no inventário de emissões previstas para o projeto Dois Irmãos - Fase 2, foram obtidos os resultados da dispersão da pluma de poluentes decorrentes do processo, objeto do presente licenciamento ambiental. Ressalta-se que conforme solicitação da FEAM (2019a), são necessários um mínimo de três anos de dados meteorológicos para estudo de simulação atmosférica. Logo, sabendo que as questões meteorológicas são fatores cruciais no processo dispersivo, pode haver alguma influência nos resultados em virtude das condições atmosféricas anteriores.

8.1 Materiais Particulados (MP)

A maior concentração de material particulado estimada na simulação pelo software AERMOD e as concentrações obtidas nos receptores sensíveis apresentados no item 7.3.2 estão expressas na Tabela 15, bem como suas coordenadas geográficas. Foram considerados para fins comparativos os padrões de MP definidos pela CONAMA 491/2018 cujo valor máximo para o referencial diário é de $240 \mu\text{g.m}^{-3}$ e $80 \mu\text{g.m}^{-3}$ anual.

Tabela 15: Concentrações de MP diário e anual

Receptor	Diário			Anual		
	Concentração	Coordenadas (UTM)		Concentração	Coordenadas (UTM)	
	($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Longitude	Latitude	($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Longitude	Latitude
Máxima	231,269	658597	7799687	40,290	658597	7799687
Município de Cocais	33,586	661781	7802435	2,874	661781	7802435
Bairro Geraldo Gonçalves	25,712	660544	7796886	3,806	660544	7796886
Bairro Caeté	22,965	658759	7796167	3,254	658759	7796167

Fonte: AERMOD

As Figuras 8 e 9 apresentam as plumas de dispersão do poluente MP para o referencial diário e anual, respectivamente. Observa-se que a dispersão ocorre sem formação de zonas de estagnação, sendo que as concentrações diminuem gradativamente à medida que vão se distanciando da fonte. O polígono em branco nas figuras representa a área diretamente afetada (ADA), onde acontecem todas as atividades operacionais do empreendimento.

Os gráficos diários e anuais indicam o perfil de distribuição da pluma de poluentes do pior cenário de todo o período considerado na modelagem (três anos). Ademais, denota-se que as concentrações máximas, tanto para a simulação diária quanto anual, não

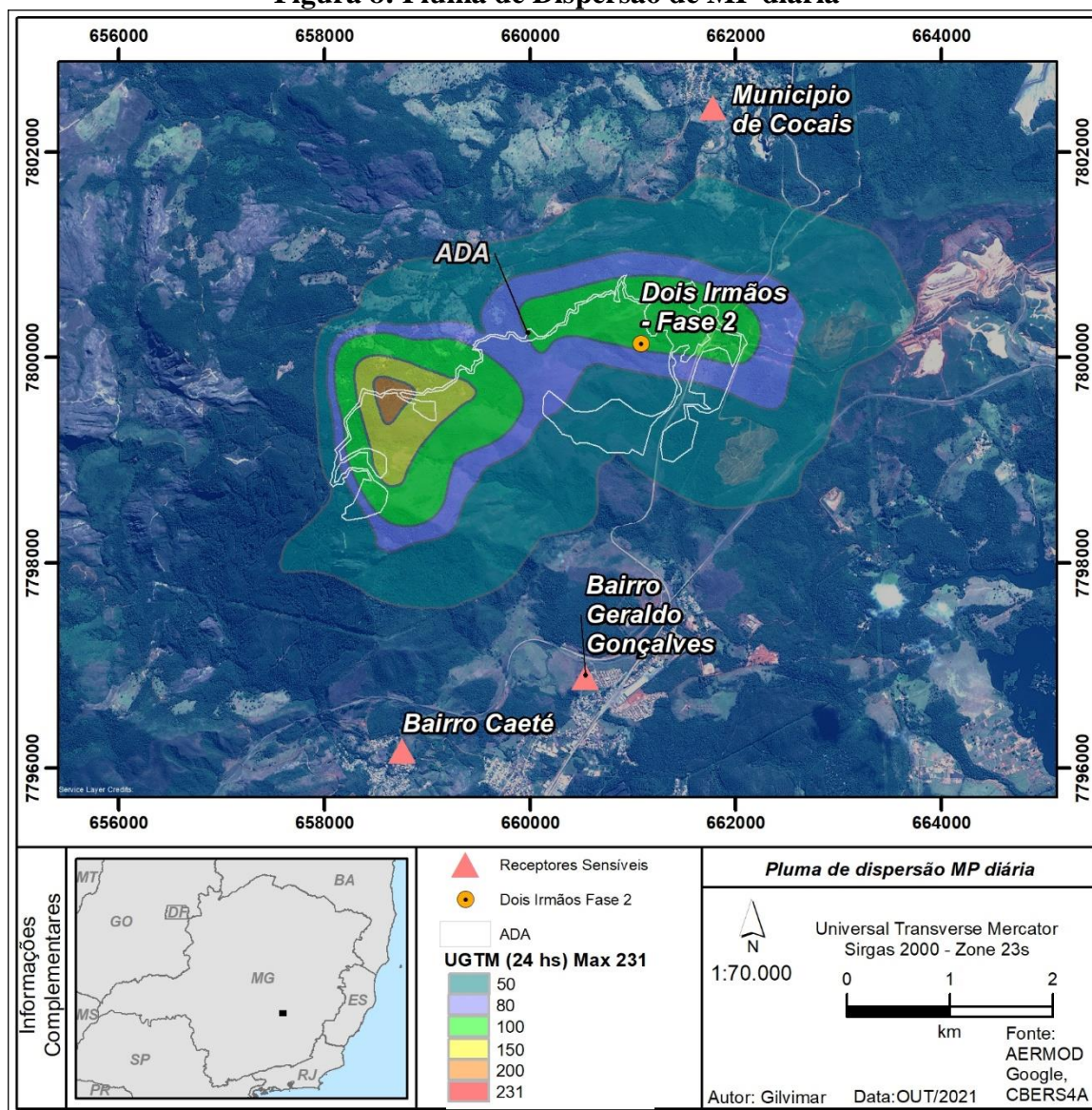
PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

apresentaram valores acima do padrão de qualidade do ar definido pela CONAMA 491/2018. Percebe-se que devido a maior incidência dos ventos serem na direção sudoeste, as plumas tiveram um pequeno deslocamento para essa direção.

Além disso, como a maioria das vias não pavimentadas se encontram no lado sudoeste do empreendimento e essas serem responsáveis pela maior parte das emissões fugitivas para os poluentes particulados, percebe-se uma maior concentração de emissões fugitivas nesses locais, como observado pela coloração alaranjada e amarelada das plumas. Vale-se ressaltar que todas as plumas são apenas ilustrativas, uma vez que as concentrações se encontram abaixo do limite.

Figura 8: Pluma de Dispersão de MP diária

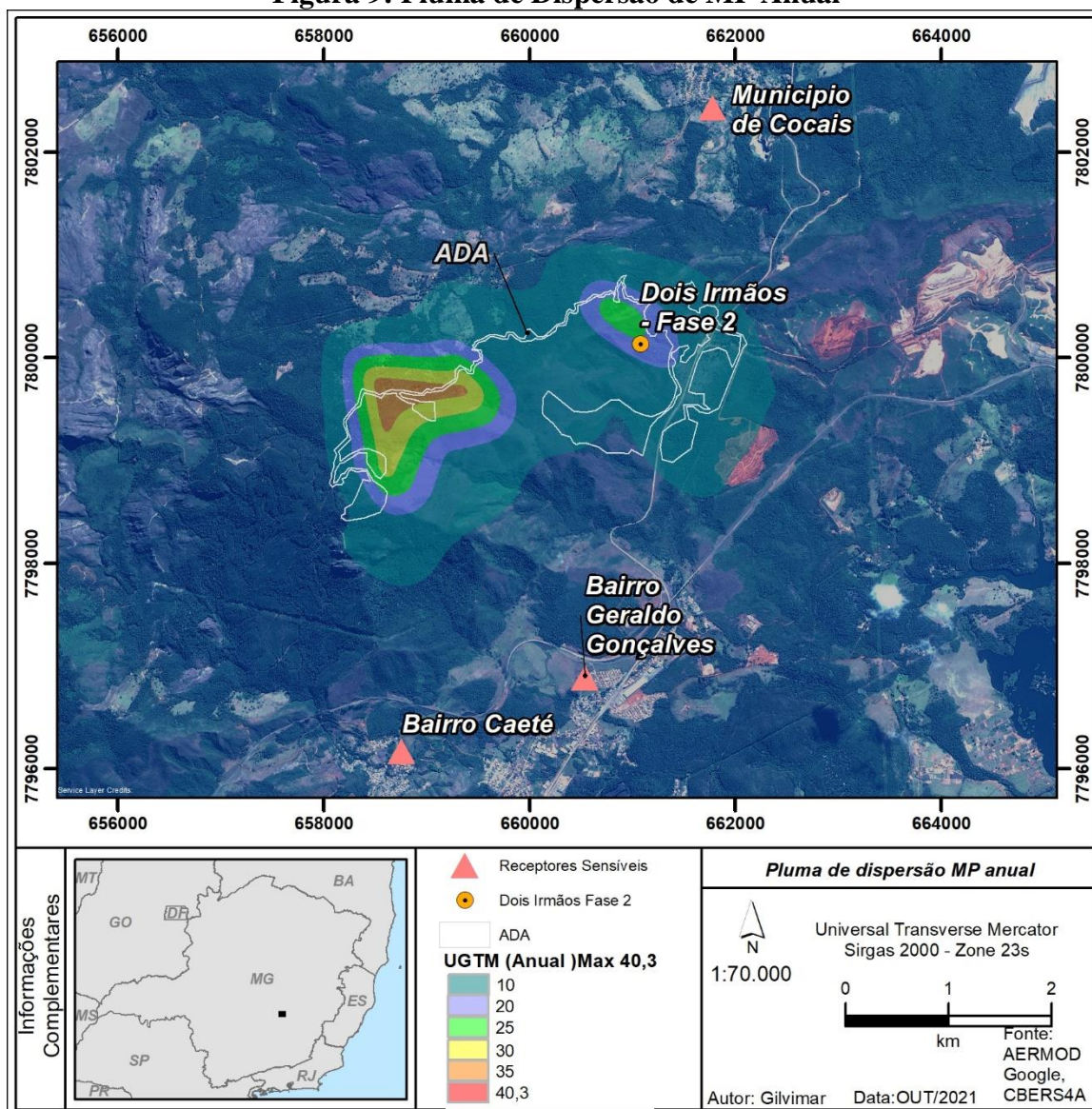


Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 9: Pluma de Dispersão de MP Anual



Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

8.2 Concentração de Partículas Inaláveis (PM₁₀)

A maior concentração de partículas inaláveis (PM₁₀) estimada na simulação pelo software AERMOD e as concentrações obtidas nos receptores sensíveis estão expressas na Tabela 16, bem como suas coordenadas geográficas. Foram considerados para fins comparativos os padrões definidos pela CONAMA 491/2018 cujo valor máximo para o referencial diário é de 120 $\mu\text{g.m}^{-3}$ e 40 $\mu\text{g.m}^{-3}$ anual.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 16: Concentrações de PM₁₀ Diário e Anual

Receptor	Diário			Anual		
	Concentração	Coordenadas (UTM)		Concentração	Coordenadas (UTM)	
	($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Longitude	Latitude	($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Longitude	Latitude
Máxima	150,911	659347	7799687	13,402	659347	7799687
município de Cocais	15,429	661781	7802435	0,925	661781	7802435
Bairro Geraldo Gonçalves	16,775	660544	7796886	1,353	660544	7796886
Bairro Caeté	10,097	658759	7796167	1,050	658759	7796167

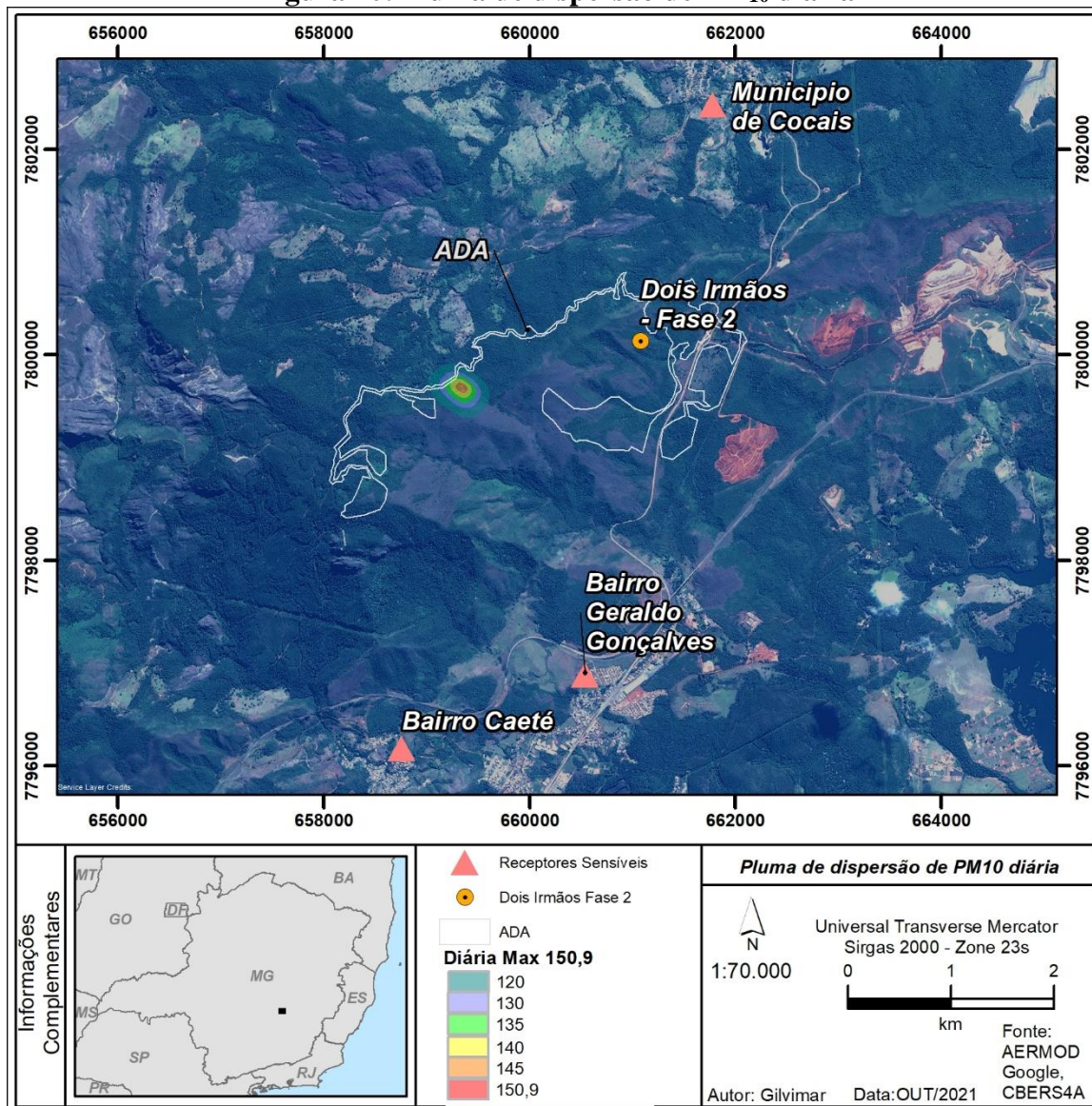
Fonte: AERMOD

De acordo com a modelagem realizada para o referencial diário, pode-se observar concentrações superiores ao previsto pela CONAMA 491/2018. Contudo, tais resultados se mantiveram dentro dos limites operacionais da unidade, onde regem as leis de saúde e segurança ocupacionais. Dessa forma, não atingindo nenhum dos receptores sensíveis listados, conforme ilustrado pela Figura 10. Com relação simulação realizada com relação ao referencial anual, pode-se notar que as concentrações encontradas estão significativamente inferiores aos padrões previstos pela legislação (Figura 11).

Apesar destes resultados, é válido destacar que a diferença existente entre concentrações diárias e anuais se deve à metodologia de determinação. O resultado anual de PM₁₀ é calculado pela média geométrica das concentrações diárias obtidas ao longo de um ano. O período de 24 horas, por sua vez, considera a massa de material particulado pelo volume acumulado ao longo de um dia completo. Sendo assim, os registros diários obtidos na simulação referem-se aos dias de piores condições meteorológicas, não significando, porém, que estas concentrações são rotineiras. Em dias de atmosfera instável, ou seja, com maiores intensidades de ventos, temperaturas maiores e maiores índices pluviométricos as concentrações no ar ambiente são menores uma vez que as condições climáticas favorecem a diluição da pluma de poluentes na atmosfera. Dessa forma, é factível afirmar que as concentrações diárias acima do limite não são rotineiras, acontecendo, portanto, somente em dias esporádicos.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 10: Pluma de dispersão de PM₁₀ diária

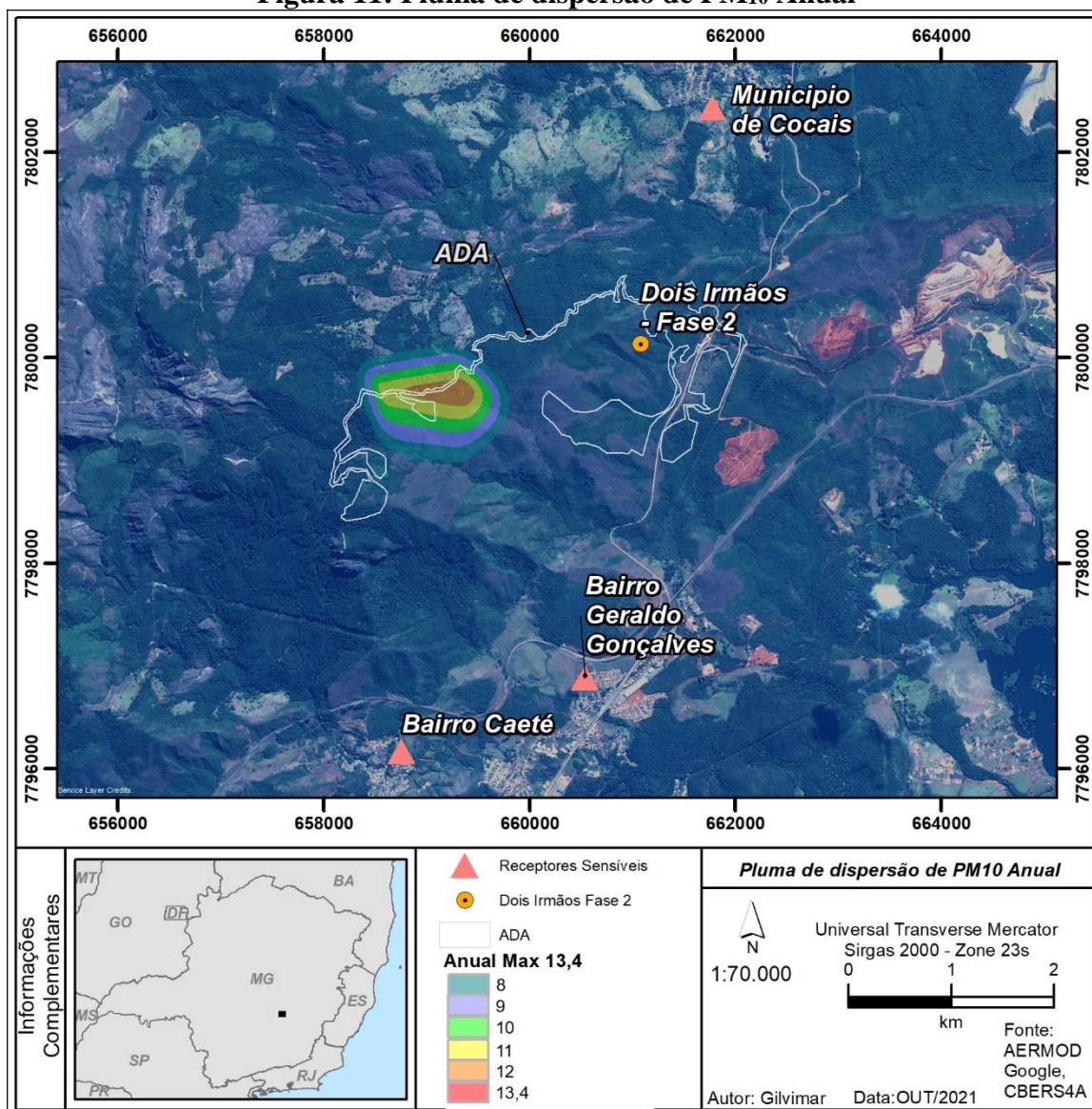


Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 11: Pluma de dispersão de PM₁₀ Anual



Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

8.3 Concentração de Partículas Respiráveis (PM_{2,5})

A maior concentração de partículas respiráveis (PM_{2,5}) estimada na simulação pelo software AERMOD está expressa na Tabela 17, bem como suas coordenadas geográficas. Também foram apresentadas as concentrações das aglomerações populacionais próximas ao empreendimento. Para fins comparativos tais resultados foram comparados aos padrões definidos pela CONAMA 491/2018 cujo valor máximo para o referencial diário é de 60 µg.m⁻³ e 20 µg.m⁻³ anual.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 17: Concentrações de PM_{2,5} Diário e Anual

Receptor	Diário			Anual		
	Concentração	Coordenadas (UTM)		Concentração	Coordenadas (UTM)	
	(µg.m ⁻³)	Longitude	Latitude	(µg.m ⁻³)	Longitude	Latitude
Máxima	138,286	659347	7799687	5,478	659347	7799687
Município de Cocais	9,581	661781	7802435	0,367	661781	7802435
Bairro Geraldo Gonçalves	13,074	660544	7796886	0,680	660544	7796886
Bairro Caeté	6,899	658759	7796167	0,543	658759	7796167

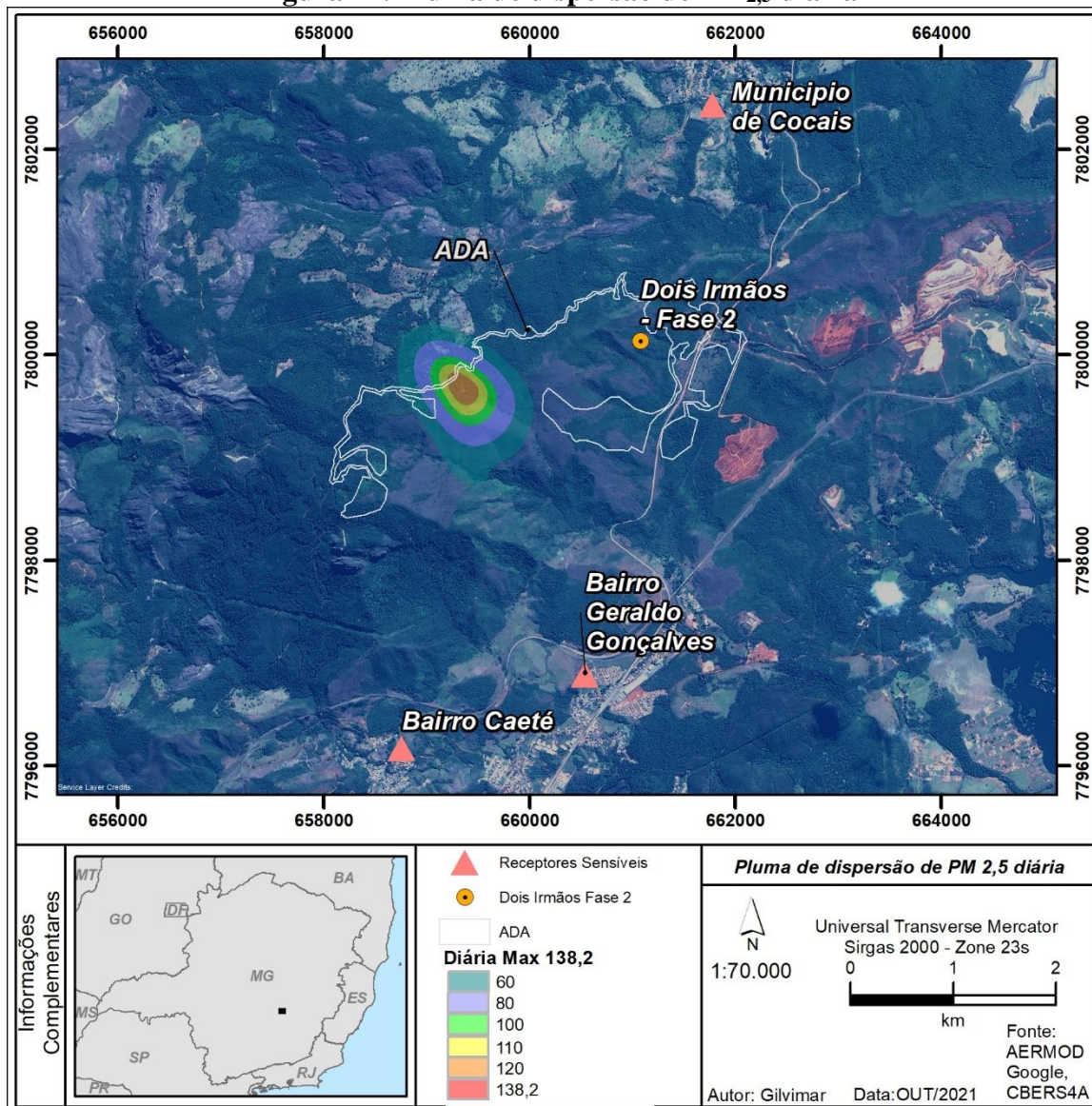
Fonte: AERMOD

De acordo com os registros de concentrações estimadas na modelagem, o mesmo observado para o poluente PM₁₀ foi identificado para o PM_{2,5}. Pela simulação há registros de concentrações diárias superiores ao limite do CONAMA 491/2018. Contudo, tais resultados se mantiveram dentro dos limites do Projeto Dois Irmãos - Fase 2, bem como em áreas vizinhas ao empreendimento em que não há a presença de unidades habitacionais. Portanto, nenhum dos receptores sensíveis listados apresentaram concentrações diárias superiores a legislação (Figura 12).

Com relação ao referencial anual, as concentrações simuladas se mantiveram dentro dos limites previstos pela CONAMA 491/2018 (Figura 13). Portanto, espera-se que resultados superiores aos padrões legais ocorram de forma esporádica.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

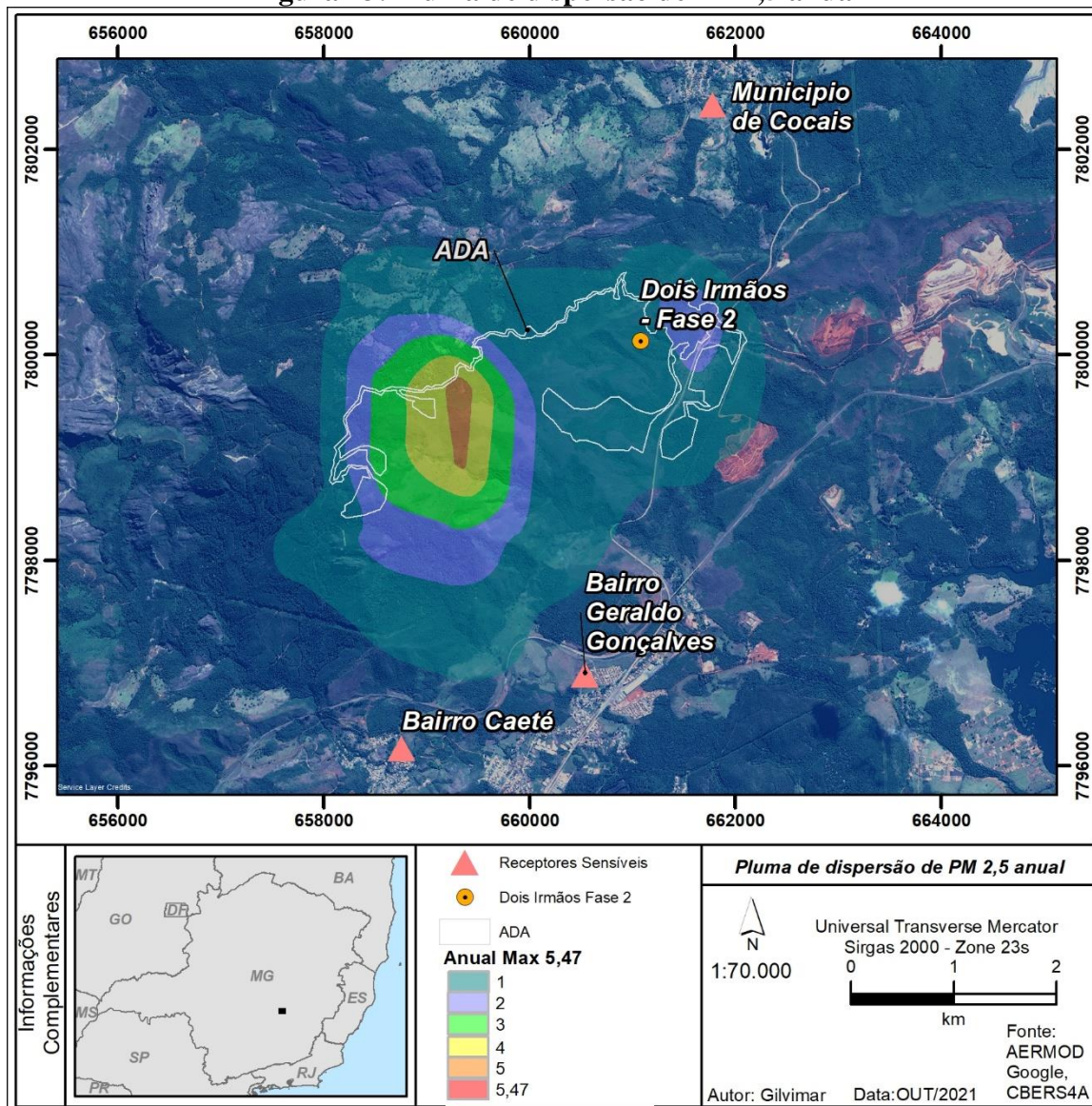
Figura 12: Pluma de dispersão de PM_{2,5} diária



Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 13: Pluma de dispersão de PM_{2,5} anual



Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

8.4 Óxidos de Enxofre (SO_x)

A maior concentração de óxido de enxofre estimada na simulação pelo software AERMOD e as concentrações obtidas nos receptores sensíveis apresentados no item 7.3.2 estão expressas na Tabela 18, bem como suas coordenadas geográficas. Foram considerados para fins comparativos os padrões de Dióxido de Enxofre (SO₂) definidos pela CONAMA 491/2018 cujo valor máximo para o referencial diário é de 125 µg.m⁻³ e 40 µg.m⁻³ anual.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 18: Concentrações de SOx diário e anual

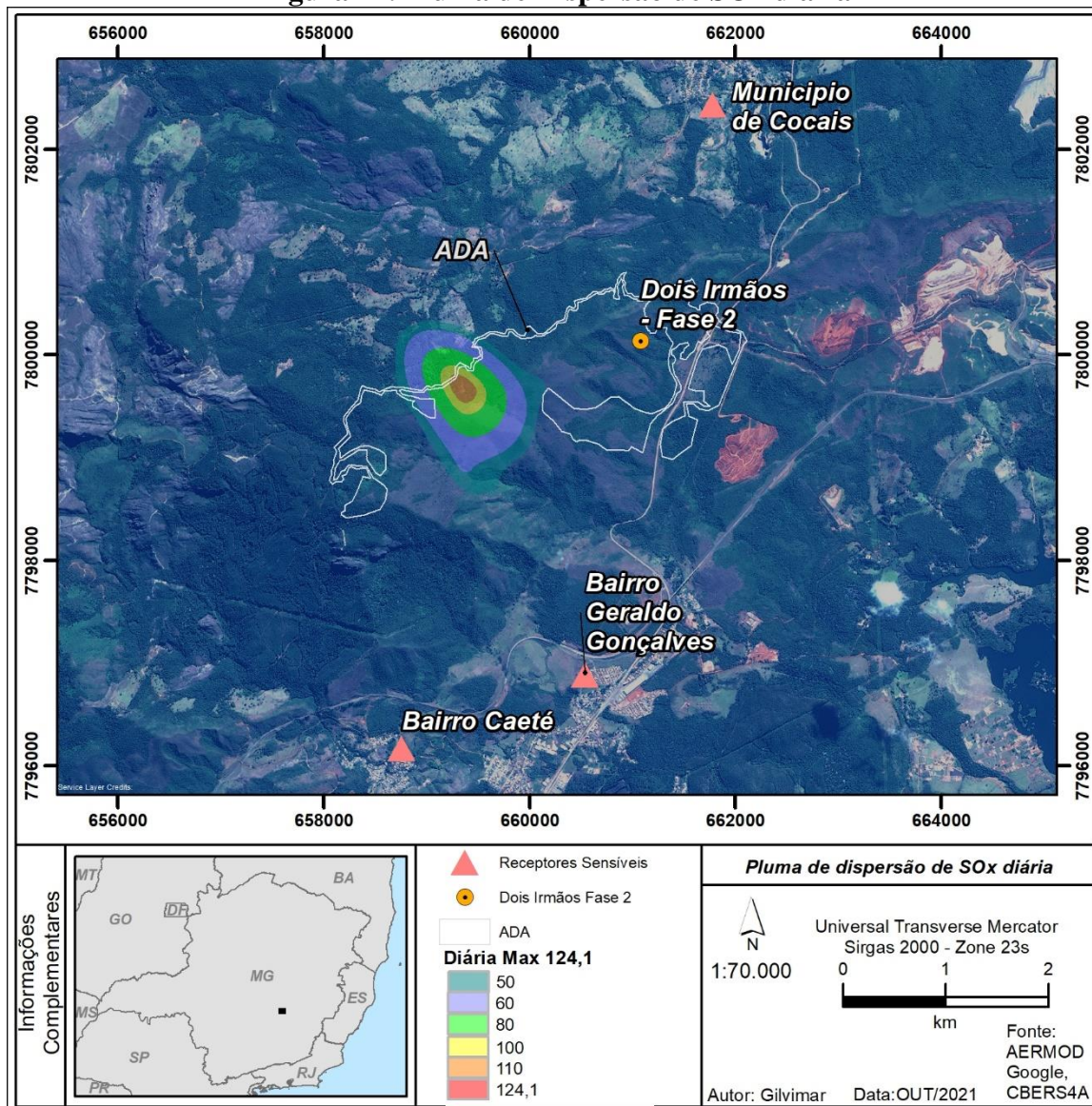
Receptor	Diário			Anual		
	Concentração	Coordenadas (UTM)		Concentração	Coordenadas (UTM)	
	($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Longitude	Latitude	($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Longitude	Latitude
Máxima	124,180	659347	7799687	4,200	659347	7798937
Município de Cocais	7,609	661781	7802435	0,175	661781	7802435
Bairro Geraldo Gonçalves	11,140	660544	7796886	0,420	660544	7796886
Bairro Caeté	5,438	658759	7796167	0,278	658759	7796167

Fonte: AERMOD

Nas Figuras 14 e 15 estão representadas as plumas de dispersão diária e anual, respectivamente. As concentrações observadas para esse poluente encontram-se em conformidade com a legislação referente a CONAMA 482/2018, tanto para o referencial diário quanto para o anual, em todos os pontos do quadrante modelado. Enfatiza-se que as plumas representadas para esse poluente são apenas ilustrativas, pois nenhum ponto foi atingido por concentrações acima do limite.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

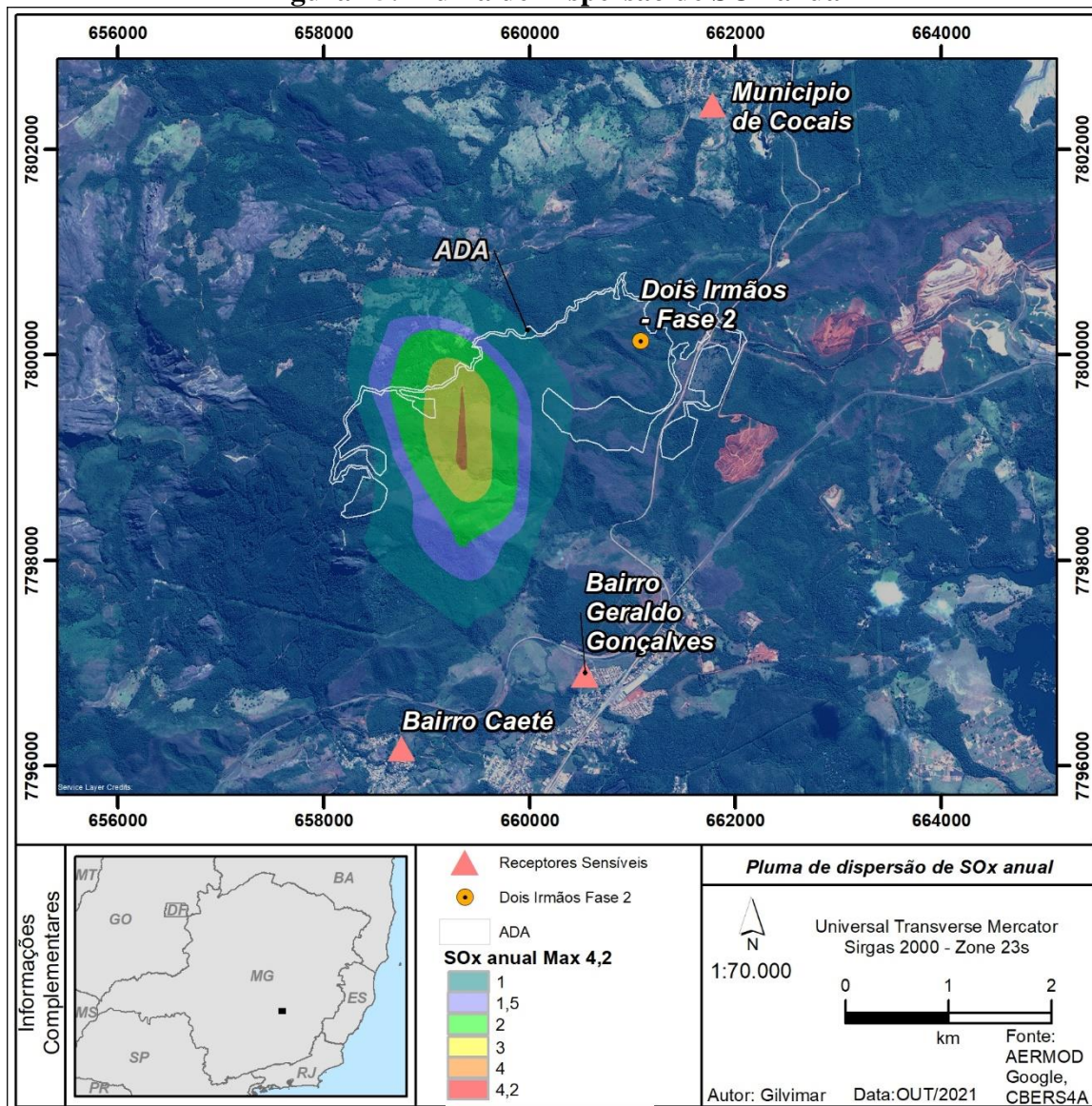
Figura 14: Pluma de Dispersão de SOx diária



Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 15: Pluma de Dispersão de SO_x anual



Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

8.5 Dióxido de Nitrogênio (NO₂)

A maior concentração de óxido de nitrogênio estimada na simulação pelo software AERMOD e as concentrações obtidas nos receptores sensíveis apresentados no item 7.3.2 estão expressas na Tabela 19, bem como suas coordenadas geográficas. Foram considerados para fins comparativos os padrões de Dióxido de Nitrogênio (NO₂) definidos pela CONAMA 491/2018 cujo valor máximo para o referencial horário é de 260 µg.m⁻³ e 60 µg.m⁻³ anual.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela 19: Concentrações de NO_x horário e anual

Receptor	Diário			Anual		
	Concentração	Coordenadas (UTM)		Concentração	Coordenadas (UTM)	
	(µg.m ⁻³)	Longitude	Latitude	(µg.m ⁻³)	Longitude	Latitude
Máxima	1352,418	659347	7799687	7,971	659347	7798937
Município de Cocais	165,428	661781	7802435	0,344	661781	7802435
Bairro Geraldo Gonçalves	233,038	660544	7796886	0,824	660544	7796886
Bairro Caeté	203,875	658759	7796167	0,538	658759	7796167

Fonte: AERMOD

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são compostos em maior quantidade por monóxido de nitrogênio (NO), quantidades menores de dióxido de nitrogênio (NO₂) e traços de outros óxidos (ODOROSKI, HENSCHKE, & YU, 2015). Ressalta-se que Filho (2016) propõe que em processos convencionais de combustão o NO₂ responde por menos de 5% do total do NO_x formado. Já Carruthers, Stocker, *et al.* (2017), por outro lado, apresenta que a razão NO₂/NO_x emitida por chaminés de fontes industriais geralmente varia de 5-20%. Por isso, de forma a obter resultados conservativos uma vez que não se pode afirmar a real parcela de NO₂ nas emissões da empresa, considerou-se como entrada para o modelo AERMOD o valor médio proposto por Carruthers, Stocker, *et al.* (2017), 12,5% das taxas de emissão.

Dessa forma, as plumas representadas nas Figuras 16 e 17, apresentam o pior cenário possível para esse poluente. Além do mais, o gráfico diário indica o perfil de distribuição da pluma de poluentes do pior cenário de todo o período considerado na modelagem (três anos). Note que a última coloração, azul clara, corresponde exatamente ao padrão de qualidade do ar definindo do CONAMA 491/2018 para o referencial temporal horário. Ou seja, toda região compreendida pela pluma apresenta valores de concentração superiores ao estabelecido na legislação.

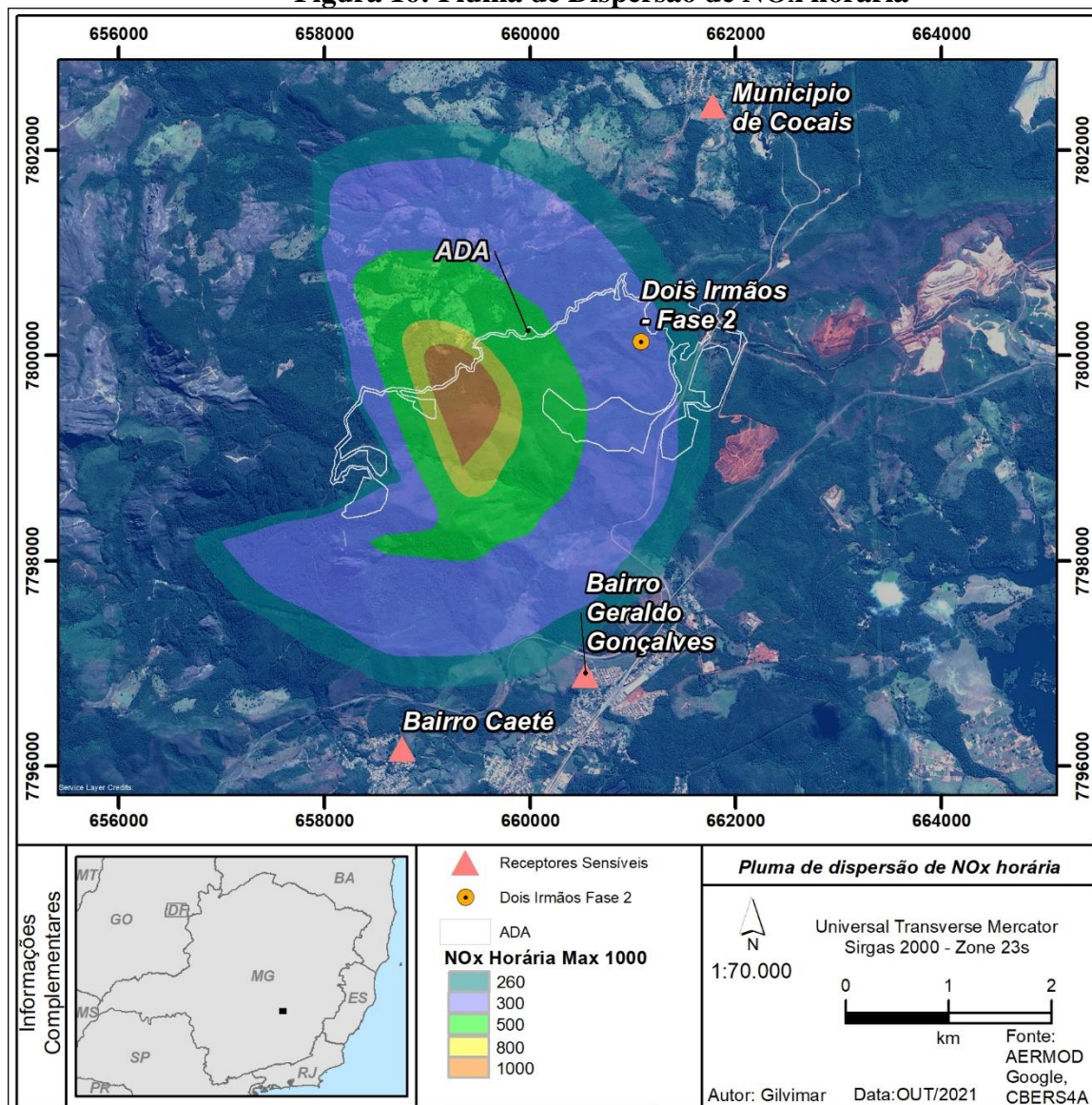
No entanto, a modelagem anual não apresentou nenhum ponto não conforme, sendo a pluma de dispersão da Figura 17 apenas ilustrativa, pois, o valor máximo identificado na escala está abaixo do limite anual estabelecido pela CONAMA 491/2018. Dessa maneira, é factível afirmar que os dias cujo impacto excederam a legislação são decorrentes de condições meteorológicas desfavoráveis ao processo dispersivo, uma vez que a taxa de emissão para simulação computacional é igual para todos os dias do ano.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Sendo assim, os registros horários obtidos na simulação referem-se aos dias de piores condições meteorológicas, não significando, porém, que estas concentrações serão rotineiras. Em dias de atmosfera instável, ou seja, com maiores intensidades de ventos, temperaturas maiores e maiores índices pluviométricos as concentrações no ar ambiente são menores uma vez que as condições climáticas favorecem a diluição da pluma de poluentes na atmosfera.

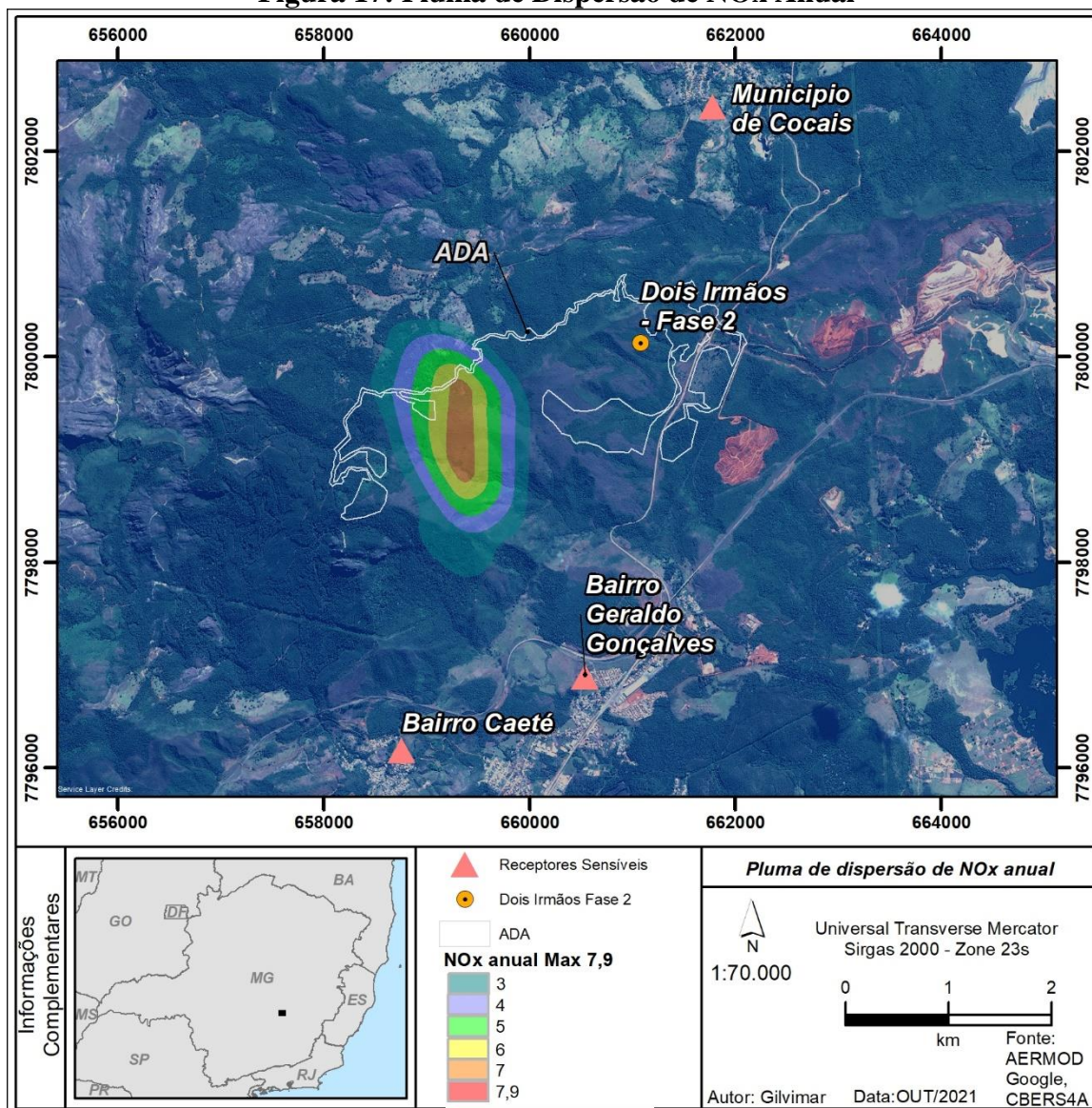
Figura 16: Pluma de Dispersão de NOx horária



Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 17: Pluma de Dispersão de NOx Anual



Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

8.6 Monóxido de Carbono (CO)

A maior concentração estimada na simulação pelo software AERMOD e as concentrações obtidas nos receptores sensíveis estão expressas na Tabela 20, bem como suas coordenadas geográficas. Foi considerado para fins comparativo o padrão de monóxido de carbono definido pela CONAMA 491/2018 cujo valor máximo para o referencial de 8 horas é de 9 ppm.

Sabendo que o resultado do AERMOD é dado em $\mu\text{g.m}^{-3}$, foi necessário a conversão para ppm, uma vez que o limite de qualidade do ar está expresso nessa unidade. Para isso considerou-se a conversão proposta pelo MMA (2019) onde a

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

concentração em ppm é o produto da concentração em $\mu\text{g.m}^{-3}$ por 0,02447 sobre a massa molar, que é de 28 g.

Na Figura 18 está representada a pluma de dispersão. Nota-se que o resultado de concentração máximo encontrado foi de 0,868 ppm, valor abaixo do máximo previsto pela CONAMA 491/2018. Além disso, observa-se um comportamento de deslocamento da pluma semelhante ao dióxido de nitrogênio, o qual está intimamente relacionado à predominância das componentes mais fortes da direção dos ventos, sul e sudeste. Dessa forma, não foram notados danos decorrentes da emissão de monóxido de carbono pelo empreendimento.

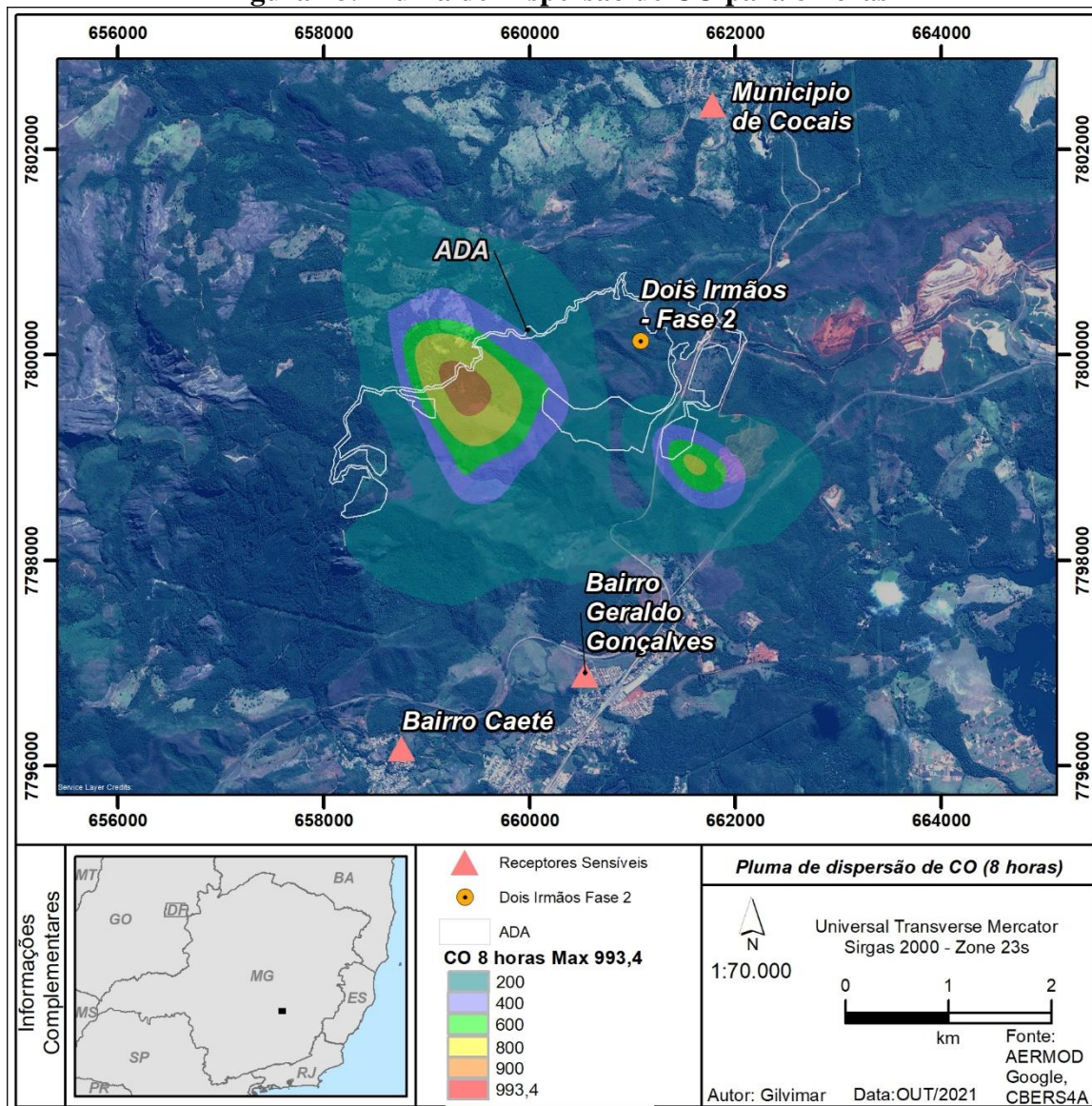
Tabela 20: Concentrações de Monóxido de Carbono para 8 horas

Receptor	8 HORAS			
	Concentração ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Concentração (ppm)	Coordenadas (UTM)	
			Longitude	Latitude
Máxima	993,424	0,8675	659347	7799687
Município de Cocais	90,739	0,0792	661781	7802435
Bairro Geraldo Gonçalves	98,067	0,0856	660544	7796886
Bairro Caeté	65,390	0,0571	658759	7796167

Fonte: AERMOD

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura 18: Pluma de Dispersão de CO para 8 horas



Fonte: AERMOD plotado no QGIS (Versão 3.16.3)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

9 PLANO DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

A qualidade do ar é influenciada por uma série de fatores como as condições meteorológicas, topografia local, presença de obstáculos e magnitude das emissões para a atmosfera. Todas essas variantes influenciam na dispersão dos poluentes, direcionando-os para pontos específicos, fatos primordiais na definição de pontos de instalação de redes de monitoramento da qualidade do ar. Assim, prioriza-se a instalação em locais com impacto direto de poluição atmosférica e que abrigue habitações, comunidades, assentamentos, dentre outros. Nesse sentido, a modelagem computacional da dispersão atmosférica atua como uma ferramenta importante na definição das zonas com maior influência da poluição.

Logo, caso exista algum receptor afetado diretamente pela emissão dos poluentes de um determinado empreendimento, recomenda-se que o provedor da fonte emissora monitore a qualidade do ar na região atingida. Assim, é possível acompanhar os possíveis danos oriundos do processo produtivo, como efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente. Além disso, sugere-se também o monitoramento à montante da fonte emissora de forma a avaliar o real impacto no ar ambiente decorrente das operações.

Salienta-se que a diferença existente entre os períodos de curta duração (diário, horário e 8 horas) e anuais deve-se à metodologia de determinação. O resultado anual é calculado pela média diárias (geométrica para MP e aritmética para os demais poluentes) obtidas ao longo de um ano. O período diário, horário e 8 horas, por sua vez, consideram a massa de material particulado pelo volume acumulado ao longo de 24 horas, 1 hora e 8 horas, respectivamente. Sendo assim, os registros de curta duração obtidos na simulação referem-se às piores condições meteorológicas, não significando, porém, que estas concentrações são rotineiras.

Baseado nos resultados da simulação da dispersão atmosférica do projeto dois Irmãos - Fase 2 foram estimadas as concentrações dos poluentes que chegam aos receptores sensíveis definidos, comunidades limítrofes aos locais de operação do empreendimento. Com base nestes resultados, pode-se observar que para os poluentes MP, PM₁₀, PM_{2,5}, SO₂, CO e NO₂ não houve registros superiores aos limites legais definidos pela CONAMA 491/2018 em nenhum receptor.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Sendo assim, conclui-se que os poluentes não afetam de forma significativa o ambiente limítrofe ao projeto em questão e, portanto, fica descaracterizada a necessidade do monitoramento da qualidade do ar na região

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

10 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou, a partir de um estudo da dispersão atmosférica por modelagem computacional, o impacto causado na atmosfera pela emissão de MP, PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂, SO_x e CO das operações do projeto Dois Irmãos Fase 2, a ser implantado no município de Barões de Cocais, no estado de Minas Gerais.

Foi utilizado o software AERMOD para simulação da dispersão atmosférica e seus processadores: AERMAP para análise topográfica e AERMET para análise meteorológica. Os arquivos topográficos foram gerados automaticamente pela versão atual do modelo de dispersão. Ademais, os dados meteorológicos foram simulados pelo modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o período compreendido entre janeiro de 2018 a dezembro de 2020. Assim, foram avaliados e validados por um meteorologista de forma a comprovar a validade de, no mínimo, 90% dos parâmetros. O processamento meteorológico foi necessário devido ao fato de não haver estações meteorológicas próximas ao empreendimento, como exigido na legislação.

As taxas de emissão dos particulados emitidos pelas fontes monitoradas, bem como das vias não pavimentadas, equipamentos móveis, movimentação de materiais, arraste eólico, detonações, perfuratrizes, processo de britagem e peneiramento foram estimadas com base na norma americana AP42 da USEPA, na qual é definido um fator de emissão para cada tipo de fonte. Por sua vez, a emissão decorrente do tráfego de veículos automotores foi estimada com referência ao determinado pela CETESB (2020).

Os resultados da simulação indicaram que as fontes existentes do projeto em questão não provocam concentrações diárias, horárias e anuais superiores ao limite de qualidade do ar estabelecido pela CONAMA 491/2018 nos receptores. Além disso, deve-se ressaltar que, os resultados diários e horários aqui apresentados referem-se ao pior cenário observado dentro do período simulado (três anos). Ou seja, esse cenário retrata os dias de atmosfera estável, com baixa velocidade de vento, baixas temperaturas e menores índices pluviométricos. Ademais, apesar de algumas regiões apresentarem concentrações excedentes para alguns poluentes, as mesmas se encontram majoritariamente no interior do empreendimento.

Em virtude disso, não há evidência de prejuízo na qualidade do ar nas áreas de influência do empreendimento e, portanto, não se faz necessária a elaboração de um programa de monitoramento da qualidade do ar nesses locais.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARRUTHERS, D. J. et al. Evaluation of an explicit NO_x chemistry method in AERMOD. **Journal of the Air & Waste Management Association**, 2017. 702-712.

CEMIG. **Atlas eólico : Minas Gerais**. Belo Horizonte. 2010.

CETESB. **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2019**. São Paulo. 2020.

EPA. **13.3 Explosives Detonation**. U.S. Environmental Protection Agency. [S.l.]. 1980.

EPA. **11.24 Metallic Minerals Processing**. [S.l.]. 1982.

EPA. **Introduction**. United States Environmental Protection Agency. [S.l.], p. 10. 1995a.

EPA. **Crushed Stone Processing**. [S.l.]. 1995b.

EPA. **Gasoline and Diesel Industrial Engines**. United States Environmental Protection Agency. [S.l.]. 1996.

EPA. **Unpaved Roads**. [S.l.]. 2006a.

EPA. **Aggregate Handling and Storage Piles**. United States Environmental Protection Agency. [S.l.], p. 6. 2006b.

EPA. **Industrial Wind Erosion**. Carolina do Norte. 2006c.

EPA. **User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)**. United States Environmental Protection Agency. Carolina do Norte, p. 333. 2011.

EPA. **User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)**. United States Environmental Protection Agency. Carolina do Norte, p. 333. 2016.

EPA. **Revisions to the Guideline on Air Quality Models: Enhancements to the AERMOD Dispersion Modeling System and Incorporation of Approaches To Address Ozone and Fine Particulate Matter**. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. [S.l.]. 2017a.

EPA. **Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems - Volume II -Ambient Air Quality Monitoring Program**. [S.l.]. 2017b.

EPA. **AERMOD Implementation Guide**. United States Environmental Protection Agency. Carolina do Norte, p. 39. 2018.

FEAM. **Metodologia para estimativa dos impactos ambientais associados ao tráfego veicular urbano**. Fundação Estadual do Meio Ambiente.. Belo Horizonte, p. 27. 2015.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

FEAM. ORIENTAÇÕES TÉCNICAS PARA A ELABORAÇÃO DE UM ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte, p. 10. 2019a.

FEAM. ORIENTAÇÕES TÉCNICAS PARA A ELABORAÇÃO DE UM ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA PARA EMPREENDIMENTOS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte, p. 10. 2019b.

FILHO, RENATO VERGNHANINI. Emissão de óxidos de nitrogênio (NOX) na combustão industrial, 2016. 6-19.

INMET. NOTA TÉCNICA No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET. [S.l.]. 2011.

INPE: Dia Meteorológico Mundial – “Mais quente, mais seco e mais úmido – enfrentando o futuro”. Centro de Ciência do Sistema Terrestre, 2016. Disponível em: <: Dia Meteorológico Mundial – “Mais quente, mais seco e mais úmido – enfrentando o futuro”>.

MARINHA DO BRASIL, 2021. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1907/beaufort_1.png>.

MMA. Resolução CONAMA Nº 491/2018 - Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. [S.l.], p. 155-156. 2018.

MOREIRA, D.; TIRABASSI, T. Modelo Matemático de Dispersão de Poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental. [S.l.]: Ambiente & Sociedade, v. VII, 2004.

MUKAKA, M. M. Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawai Medical Journal**, v. 24, n. 3, p. 69-71, Setembro 2012.

ODOROSKI; HENSCHKE; YU, M. ASSESSMENT METHODOLOGY FOR NITROGEN DIOXIDE AS AN AIR POLLUTANT. Todoroski Air Science, 2015.

PELLEGRINI, C. C. E. A. Analysis of the performance of the WRF model in an inert and persistent wind episode in a large tropical reservoir. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 34, n. 1, p. 121-138, 2019.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

TURNER, J. H. et al. **A method for estimating fugitive particulate emissions from hazardous waste**. EPA. U.S. Environmental Protection Agency. 1987.

WRAP. **Fugitive Dust Handbook**. Colorado: Countess Enviromental.. 2006.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA
APÊNDICE – VALIDAÇÃO METEOROLÓGICA

1. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo validar os dados meteorológicos simulados pelo modelo meteorológico de mesoescala WRF para utilização no estudo de dispersão atmosférica da empresa Mineração 2 Irmãos, localizada no município de Barão de Cocais/MG. Para isso foi feita análise de correlação entre os parâmetros modelados e os dados coletados pela estação automática do INMET A521 localizada no município de Belo Horizonte/MG distante cerca de 53 km do empreendimento.

2. APRESENTAÇÃO

Os dados meteorológicos regionais são alguns dos principais parâmetros considerados na modelagem da dispersão atmosférica, visto que são elementos de entrada, input, dos softwares utilizados para este estudo, os quais consistem na simulação do comportamento de poluentes que se dispersam na atmosfera após serem lançados por uma fonte emissora. Porém, o sucesso desses estudos depende, dentre outros fatores, da qualidade dos dados meteorológicos disponíveis. Esses dados precisam garantir que as condições meteorológicas do pior caso estejam representadas no modelo e retratem adequadamente o local de estudo.

Recomenda-se a apreciação de três anos de registros de uma estação meteorológica. Além disso, a quantidade mínima de informações aceitáveis compreende em pelo menos um ano de dados observados ou três anos de dados prognosticados por modelos atmosféricos, sendo aconselhável o uso dos observados, por serem dados medidos e não simulados (EPA, 2017b).

Com relação às estações automáticas algumas ponderações foram definidas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para considerá-las confiáveis, dentre elas: a estação deve ser instalada em uma base física, numa área livre de obstruções naturais e prediais, situada em área gramada mínima de 14m por 18m, cercada por tela metálica (para evitar entrada de animais). Os sensores e demais instrumentos são fixados em um mastro metálico de 10 metros de altura, aterrado eletricamente (malha de cobre) e protegido por pára-raios. Os aparelhos para as medições de chuva (pluviômetro) e de radiação solar, bem como a antena para a comunicação, ficam situados fora do mastro, mas dentro do cercado (INMET, 2011).

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

O AERMOD View, ferramenta utilizada para o estudo de dispersão dos poluentes atmosféricos, exige uma quantidade mínima de informações meteorológicas para a modelagem, tais como: cobertura de nuvens, temperatura do ar, direção e intensidade instantânea do vento. Porém, quanto mais dados meteorológicos disponíveis, maior a acurácia dos resultados. Por isso, foram também avaliados os seguintes parâmetros disponíveis pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): umidade relativa, pressão atmosférica, altura do teto (ceiling height), precipitação, radiação solar e temperatura do ponto de orvalho

O período de simulação compreendido neste estudo para a unidade do MINERAÇÃO 2 IRMÃOS é de 01/01/2018 a 31/12/2020, célula de grade do WRF com 3 x 3 km, centralizada nas coordenadas longitude 554223.00 m E / latitude 8204659.00 m S / Zona 23 K, e aninhamento de 75, 15 e 3 km. Para validação, optou-se pela estação localizada no município de Belo Horizonte/MG (A521) com coordenadas geográficas longitude 607889.75 m E / latitude 7801031.21 m S / Zona 23 K, situando-se, aproximadamente, a 53 quilômetros do local de estudo. A estação A521 encontra-se a 854 metros de altitude e a simulação a 920 metros, sendo que o local da simulação se situa no mesmo ponto do sítio da Mineração 2 Irmãos.

3. ANÁLISE DE DADOS

Após a simulação dos parâmetros meteorológicos pelo modelo WRF e de posse dos dados meteorológicos registrados pela estação do INMET A521, os arquivos foram dispostos, organizadamente, para a análise e determinação da porcentagem de dados válidos correspondente a cada parâmetro. É necessário um mínimo de 90% de dados válidos e uma boa correlação entre os resultados obtidos pelo WRF e a estação meteorológica para que os dados simulados possam ser utilizados. Para esta correlação foram executadas as seguintes etapas:

1º) Determinar os valores máximo, médio e mínimo de cada parâmetro meteorológico, tanto dos dados simulados quanto da estação;

2º) Extrair o valor do coeficiente de determinação, também chamado de R^2 , o qual é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados, definido por $R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}) m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}$, onde m_i é o valor modelado na posição i , \bar{m} é a média aritmética

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

dos valores modelados, o_i é o valor observado na posição i , \underline{o} é a média aritmética dos valores observados e n é o número de registros. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra.

3º) Calcular a correlação entre os dados simulados e da estação utilizando o método de Pearson, definido por $r = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \underline{o})(m_i - \underline{m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \underline{o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \underline{m})^2}}$, sendo este o mais indicado para avaliar duas variáveis semelhantes, as quais possuem relação linear. O coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação produto-momento ou o r de Pearson mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. É um índice adimensional com valores situados entre -1,0 e +1,0 que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. Quando $r = 1$ há uma correlação perfeita entre as duas variáveis. Quando $r = -1$ indica que as variáveis são inversamente proporcionais, isto é, se uma aumenta a outra sempre diminui. Já quando $r = 0$ significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. Na classificação deste coeficiente, de acordo com MUKAKA (2012), temos que para valores iguais a:

- 0,9 positivo ou negativo indica uma correlação muito forte
- 0,7 a 0,9 positivo ou negativo indica uma correlação forte
- 0,5 a 0,7 positivo ou negativo indica uma correlação moderada
- 0,3 a 0,5 positivo ou negativo indica uma correlação fraca
- 0 a 0,3 positivo ou negativo indica uma correlação desprezível

Neste caso, como iremos comparar a mesma variável de fontes diferentes, o esperado é se obter um valor de correlação mais próximo de 1 positivo. Quanto mais negativo for, pior é a correlação.

4º) Avaliar a eficiência do modelo através do critério do cálculo do *skill*, conforme a metodologia citada por PELLEGRINI *et al.* (2019), onde o desvio padrão da série modelada e da série observada devem ser aproximadamente iguais, isto é, $s_m \cong s_o$, sendo definido por $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \underline{V})^2}{n-1}}$, em que s é o desvio padrão, n é o número de amostras, V_i é o valor obtido na posição i , e \underline{V} é a média aritmética dos valores obtidos; e onde a raiz do erro médio quadrático (*RMSE*) deve ser menor do que o desvio padrão da observação, ou

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

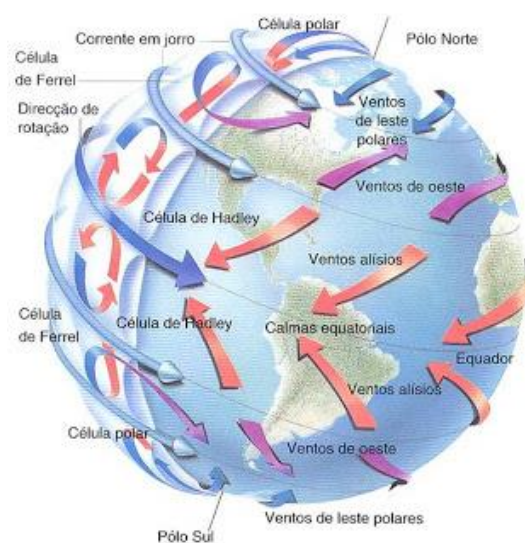
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

seja, $RMSE < s_o$. Então, a raiz do erro médio quadrático após a remoção de um desvio médio, $RMSE_{ub}$, deve também ser menor do que o desvio padrão da observação, isto é, $RMSE_{ub} < s_o$, sendo o $RMSE_{ub}$ definido por $RMSE_{ub} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(m_i - \underline{m}) - (o_i - \underline{o})]^2}$. Neste trabalho serão avaliados o valor de $\frac{s_m}{s_o}$ e o valor de $\frac{RMSE_{ub}}{s_o}$, sendo uma maior eficiência do modelo quando a primeira razão for igual a 1, e para a segunda razão, quando valores abaixo de 1. Para $\frac{RMSE_{ub}}{s_o}$ igual a zero, o *skill* indica 100% de eficiência.

Os cenários de curto e médio prazo são gerados a partir de uma combinação da qualidade da assimilação dos dados coletados, do processamento computacional e do conhecimento da evolução dos parâmetros físicos que descrevem a região de interesse. Particularmente, a qualidade dos dados que definem as condições iniciais da atmosfera influencia criticamente na evolução do modelo utilizado (INPE, 2016).

Em relação à climatologia de direção e intensidade do vento, observa-se que existe um sistema atuante sobre o estado de Goiás, a ASAS, durante todo o ano e principalmente no inverno. Este sistema é semipermanente, o que significa atuação predominante na região em questão. A Figura A- I ilustra o sistema de alta pressão e a circulação a qual induz na América do Sul. Através desta imagem é possível visualizar a circulação de ventos de quadrante leste.

Figura A- I: Circulação geral da atmosfera



Fonte: GEO CONCEIÇÃO (2020)

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

No verão, ventos de noroeste trazem umidade da Amazônia, sendo responsáveis pelas chuvas no local, principalmente através da ZCOU (Zona de Convergência do Atlântico Sul) e ZCAS (Zona de convergência do Atlântico Sul). Com base nesse conhecimento sinótico, do relevo e dos dados climatológicos, pode-se determinar se os dados estão condizentes com o esperado.

Para prosseguir com o processo de validação, foram definidos intervalos de valores para as variáveis básicas de entrada no AERMOD: cobertura de nuvens, temperatura, velocidade e direção do vento, conforme Tabela A-I. Por sua vez, as tabelas A-II e A-III apresentam os intervalos para outras variáveis adicionais: umidade relativa, pressão atmosférica, altura da base das nuvens (ceiling height), precipitação e radiação solar. Salienta-se que as estações automáticas do INMET não disponibilizam as variáveis cobertura de nuvens e altura da base das nuvens.

Foram consideradas as variáveis conforme descritas acima, para que seja completa a entrada de dados no modelo AERMOD, visto que todas estas variáveis se encontram disponíveis para representar o local de estudo.

A definição dos intervalos foi definida de acordo com as seguintes premissas:

- Cobertura de nuvens (CN): expressa em décimos de céu encoberto, ou seja, variando de 0 (nenhuma nuvem) e 10 (céu totalmente encoberto);
- Temperatura (T): intervalo definido baseado nas normais climatológicas registradas pelo INMET (1981-2010), onde o valor máximo é o maior valor absoluto já registrado na região arredondado para cima, e o valor mínimo é o menor valor absoluto registrado, arredondado para baixo;
- Direção do vento (DV): entre 0° e 360° medidas no sentido horário, a partir do norte geográfico, referindo-se a todas as possibilidades de direção do vento;
- Velocidade do vento (VV): entre 0 m/s (total calmaria) e 25 m/s (tempestade);
- Umidade relativa (UR): refere-se à quantidade de vapor contido numa parcela de ar, variando entre 1% (sem saturação) e 100% (saturado);
- Pressão atmosférica (P): a definição do intervalo foi baseada em duas etapas: 1ª) foi calculada a pressão atmosférica média local em função da temperatura e umidade relativa média computada através das normais climatológicas calculadas pelo INMET (1981-2010), e também em função da altitude local e da pressão média a nível do mar (1013,25 mb); 2ª) após o valor médio ter sido obtido, assume-se o valor máximo de

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

pressão somando 20 à média arredondada para cima, e o valor mínimo subtraindo 20 da média arredondado para baixo;

- **Altura do Teto ou Altura da Base das Nuvens (Ceil):** é definida pela altura da base da camada de nuvens mais baixa em relação ao solo, em metros, que encobre o céu em valores de cobertura de nuvens iguais ou superiores a 6 décimos. O valor mínimo foi definido como 0 e o valor máximo em 15.000, sendo este último a altura média da tropopausa, região que divide a troposfera com a estratosfera, em uma região tropical;
- **Precipitação (Pr):** varia entre 0 mm e o valor máximo absoluto em 24 horas obtido através das normais climatológicas (INMET 1981-2010);
- **Radiação solar (R):** varia entre 0 W/m² e o valor máximo de 1.367 W/m² que é a densidade média do fluxo energético proveniente da radiação solar.

Tabela A- I: Valores definidos para validade dos dados dos parâmetros básicos do AERMOD

Intervalos	CN	T (°C)	DV (°)	VV (m/s)
Mínimo	0	5	0	0
Máximo	10	40	360	25

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- II: Valores definidos para validade dos dados dos demais parâmetros fornecidos pelo INMET e pelo WRF

Intervalos	UR (%)	P (mb)	Ceil (m)	Pr (mm)	R (W/m ²)
Mínimo	1	885	0	0	0
Máximo	100	945	15.000	160	1.367

Fonte: Elaborado pelo autor

4. ANÁLISE DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS REAIS

Inicialmente fez-se um controle de qualidade das seguintes variáveis meteorológicas da estação em estudo, são elas a temperatura do ar (°C), a umidade relativa (%), a pressão atmosférica (mbar), a direção do vento (graus), a velocidade do vento (m/s), a precipitação (mm), a radiação solar (W.m⁻²) e a temperatura de ponto de orvalho (°C).

Dessa forma, a Tabela A-III e a Tabela A-IV apresentam os resultados para os dados tratados referentes à estação meteorológica em questão.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela A- III: Controle de qualidade dos dados meteorológicos da estação A521 do INMET

	T (°C)	DV (°)	VV (m/s)
Dados Esperados	26304	26304	26304
Dados Registrados	26215	26215	26215
Válidos	99,66%	99,66%	99,66%
Inválidos	0,00%	0,00%	0,00%
Ausentes	0,34%	0,34%	0,34%
Valor Máximo	37,8	360	8,2
Valor Médio	22,1	86 (E)	1,8
Valor Mínimo	7,7	1	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- IV: Controle de qualidade dos dados meteorológicos da estação A521 do INMET

	UR (%)	P (mb)	Pr (mm)	R (W/m²)
Dados Esperados	26304	26304	26304	26304
Dados Registrados	26215	26215	26215	26304
Válidos	99,66%	99,66%	99,66%	100,00%
Inválidos	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Ausentes	0,34%	0,34%	0,34%	0,00%
Valor Máximo	93	930,3	46,2	1185,64
Valor Médio	65	919,5	0,2 / 3,7	207,63
Valor Mínimo	12	908,5	0,0 / 0,2	0,00

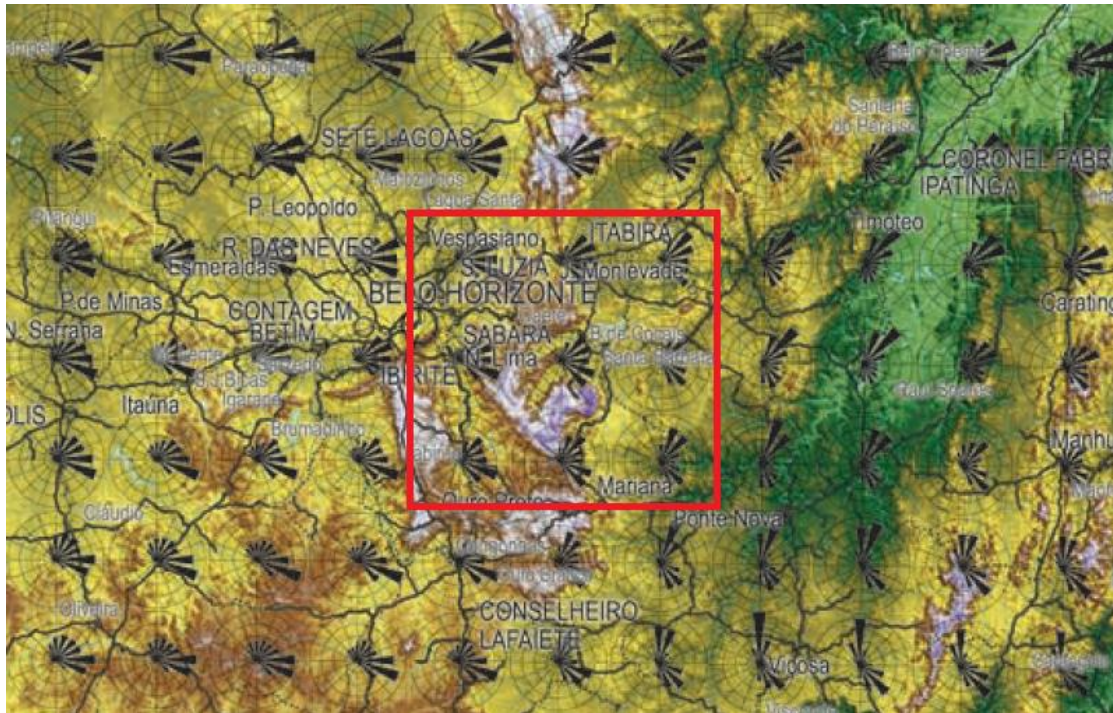
Fonte: Elaborado pelo autor

Todas as variáveis estudadas se enquadram dentro dos intervalos de validade determinados na Tabela A-I e na Tabela A-II e possuem, no máximo, 0,34% dos dados ausentes. Nota-se, portanto, que pelo menos 99,66% de dados são válidos para o período compreendido entre janeiro de 2018 e dezembro de 2020. Salienta-se que para a variável precipitação (média e mínima) foram reportados dois valores, sendo eles, respectivamente, levando em consideração todos os valores disponíveis e apenas os valores os quais registraram evento de chuva.

O quadrado em vermelho na Figura A- II sinaliza as rosas dos ventos dos municípios de Barão de Cocais/MG e das regiões próximas, de acordo com o estudo da CEMIG (2010).

Figura A- II: Rosas-dos-ventos de Barão de Cocais/MG e regiões adjacentes

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA



Fonte: CEMIG (2010) modificado

De acordo com o Atlas Eólico mencionado, a região do município de Barão de Cocais/MG possui ventos predominantes que variam de nordeste a sudeste. Esta referência foi importante para conhecer o vento mais atuante na região de uma forma climatológica.

5. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DADOS SIMULADOS E REAIS

As tabelas e figuras a seguir mostram a comparação dos dados da estação meteorológica com os dados simulados pelo modelo WRF referentes às variáveis cobertura de nuvens, temperatura do ar, direção do vento, velocidade do vento, umidade relativa, pressão atmosférica, altura da base das nuvens, precipitação, radiação solar e temperatura de ponto de orvalho. A cobertura de nuvens foi comparada com a Normal Climatológica obtida pelo INMET (1981-2010) para a cidade de Belo Horizonte/MG.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

5.1 Cobertura de Nuvens

Tabela A- V: Comparação da Cobertura de Nuvens obtida pelo INMET com o simulado pelo WRF

	CN (0-10) - INMET	CN (0-10) - WRF
Dados Esperados	-	26304
Dados Registrados	-	26304
Válidos	-	100,00%
Inválidos	-	0,00%
Ausentes	-	0,00%
Valor Máximo	10	10
Valor Médio	5	4
Valor Mínimo	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela A-V indica que a modelagem feita pelo WRF está um décimo inferior à observada na variável cobertura de nuvens. Sendo assim, nos dados simulados há uma tendência de representar 10 a menos a nebulosidade no local de estudo em comparação com o obtido nas Normais Climatológicas observadas na Estação Convencional 83587 do INMET no período entre 1981 e 2010 localizada em Belo Horizonte/MG, coletadas nos horários das 09h, 15h e 21h local.

5.2 Temperatura

Tabela A- VI: Comparação da Temperatura observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF

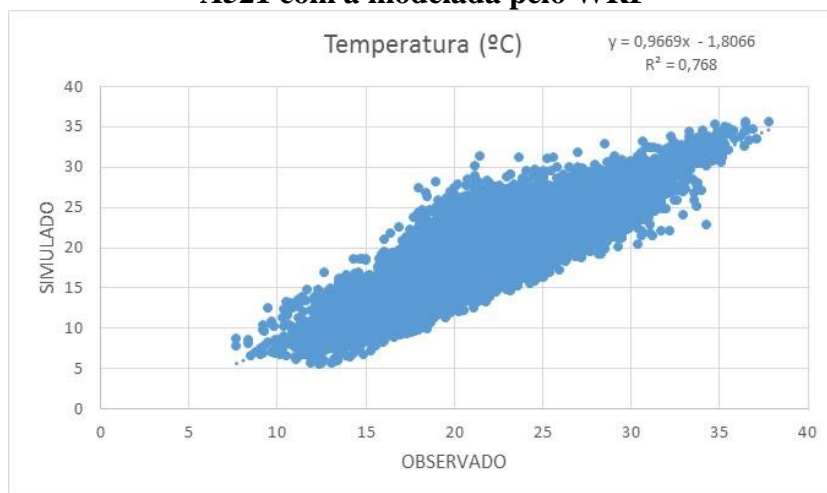
	T (°C) - INMET	T (°C) - WRF
Dados Esperados	26304	26304
Dados Registrados	26215	26304
Válidos	99,66%	100,00%
Inválidos	0,00%	0,00%
Ausentes	0,34%	0,00%
Valor Máximo	37,8	35,6
Valor Médio	22,1	19,5
Valor Mínimo	7,7	5,5

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela A-VI indica que a modelagem feita pelo WRF está próxima da observada na variável temperatura, sendo que o valor máximo fica abaixo em 2,2°C; a média fica abaixo em 2,6°C e a mínima também abaixo em 2,2°C. Sendo assim, os valores estão condizentes com o real, indicando boa qualidade dos dados modelados. Foi feita também uma análise estatística para comparar as duas variáveis conforme Figura A-III e Tabela A-VII.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura A- III: Correlação entre a Temperatura observada pela estação do INMET A521 com a modelada pelo WRF



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- VII: Análise estatística da variável Temperatura

<i>Método</i>	<i>Valor</i>	<i>Correlação</i>
R^2	0,7680	76,80%
PEARSON	0,88	Forte
$RMSE_{ub}$	2,18	0,53
s_o	4,09	-
s_m/s_o	1,10	89,67%

Fonte: Elaborado pelo autor

O coeficiente de determinação – R^2 - obtido foi igual a 0,7680. Na correlação de Pearson, o valor obtido foi de 0,88, indicando uma correlação linear muito forte. O *skill* $\left(\frac{RMSE_{ub}}{s_o}\right)$ está abaixo de 1, e a razão entre os desvios padrões modelado e observado $\left(\frac{s_m}{s_o}\right)$ tem valor de 1,10, indicando que há uma correlação forte entre os dados observados e os simulados.

5.3 Direção do Vento

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

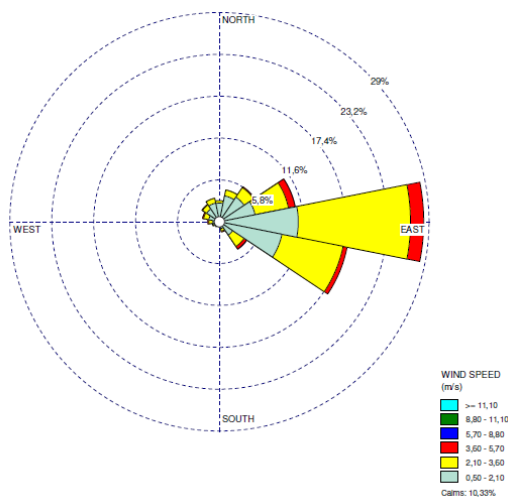
Tabela A- VIII: Comparação da Direção do Vento observada na estação meteorológica A521 com a modelada pelo WRF

	DV (°) - Aero	DV (°) - WRF
Dados Esperados	26304	26304
Dados Registrados	26215	26304
Válidos	99,66%	100,00%
Inválidos	0,00%	0,00%
Ausentes	0,34%	0,00%
Valor Máximo	360	360
Valor Médio	86 (E)	36 (NE)
Valor Mínimo	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor

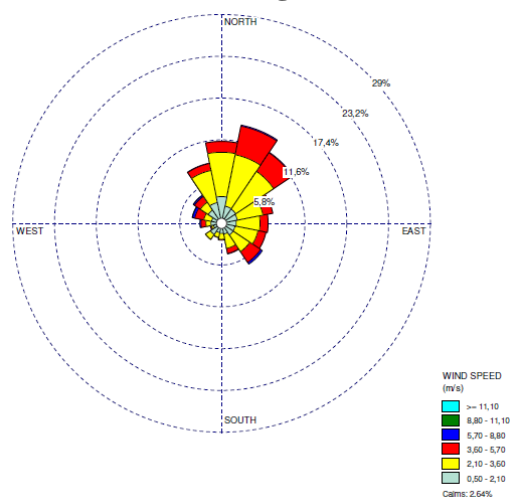
A Tabela A-VIII indica que a modelagem feita pelo WRF está um pouco distinta da observada na variável direção do vento, sendo que o valor médio difere em 50 graus, o que representa uma diferença de 27,8%. A direção média observada é de leste, e a simulada de nordeste. A direção média é calculada através da decomposição do vento em vetores na direção zonal (oeste-leste) e meridional (sul-norte). Após este procedimento, é calculado o vetor resultante e extraída a direção média desse vetor, resultando nos valores médios da tabela acima.

Figura A- IV: Rosa-dos-Ventos da estação do A521



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A- V: Rosa-dos-Ventos da modelagem WRF



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura A-IV podemos notar que existem componentes mais fortes que variam de leste-nordeste a leste-sudeste. Nos dados gerados pelo modelo WRF a maior frequência fica entre os setores norte e nordeste (Figura A-V). Além desta análise, segue abaixo a avaliação da rosa-dos-ventos obtida pelo estudo da CEMIG (2010) para a região de Barão de Cocais/MG com a rosa-dos-ventos gerada pelo WRF.

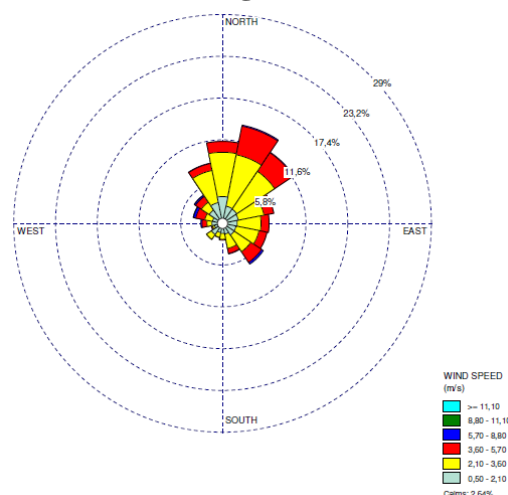
PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura A- VI: Rosas-dos-ventos segundo a CEMIG



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A- VII: Rosa-dos-Ventos da modelagem WRF

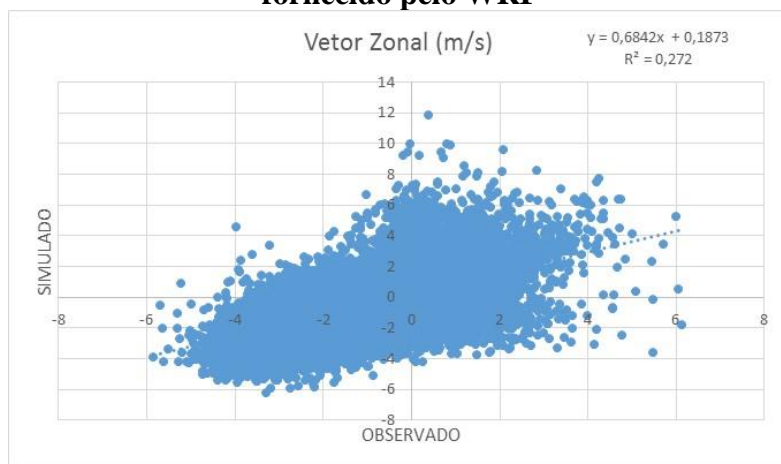


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura A-VI mostra componentes mais fortes que variam de nordeste a sudeste, sendo que também aparece na rosa-dos-ventos gerada pelos dados do WRF (Figura A-VII).

Para a análise estatística, a direção do vento foi decomposta em vetores zonal (oeste-leste) e meridional (sul-norte) para que os dados modelados possam ser comparados com os dados observados de uma forma linear, utilizando os mesmos métodos que as outras variáveis neste relatório. Segue abaixo a análise zonal, conforme figura A-VIII e tabela A-IX.

Figura A- VIII: Correlação entre o Vetor Zonal observado pela estação A521 com o fornecido pelo WRF



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- IX: Análise estatística da variável Direção do Vento – Vetor Zonal

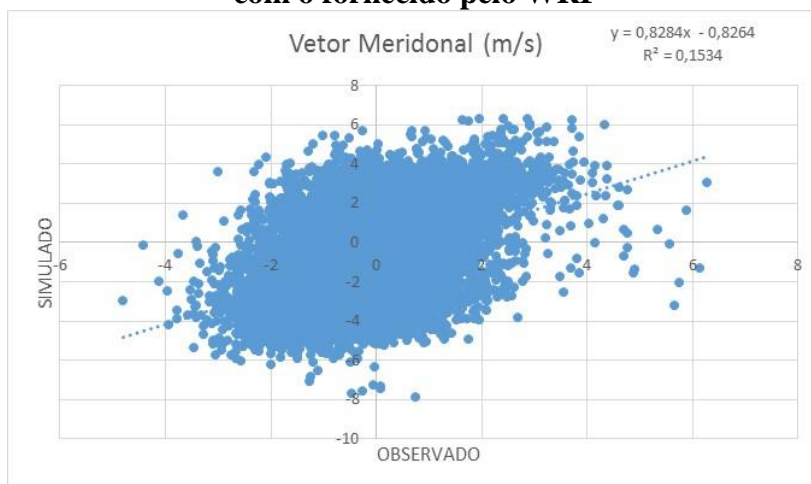
PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

<i>Método</i>	<i>Valor</i>	<i>Correlação</i>
R^2	0,2720	27,20%
PEARSON	0,52	Moderada
$RMSE_{ub}$	1,63	1,16
s_o	1,41	-
s_m/s_o	1,31	68,79%

Fonte: Elaborado pelo autor

O coeficiente de determinação – R^2 - obtido foi igual a 0,2720. Na correlação de Pearson, o valor obtido foi de 0,52, indicando uma correlação linear moderada. O *skill* $\left(\frac{RMSE_{ub}}{s_o}\right)$ está acima de 1 e a razão entre os desvios padrões modelado e observado $\left(\frac{s_m}{s_o}\right)$ tem valor de 1,31, indicando que há uma correlação entre as variáveis observada e simulada. Segue abaixo a análise meridional, conforme figura A-IX e tabela A-X.

Figura A- IX: Correlação entre o Vetor Meridional observado pela estação A521 com o fornecido pelo WRF



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- X: Análise estatística da variável Direção do Vento – Vetor Meridional

<i>Método</i>	<i>Valor</i>	<i>Correlação</i>
R^2	0,1534	15,34%
PEARSON	0,39	Fraca
$RMSE_{ub}$	1,78	1,95
s_o	0,91	-
s_m/s_o	2,12	-11,50%

Fonte: Elaborado pelo autor

O coeficiente de determinação – R^2 - obtido foi equivalente a 0,1534. Na correlação de Pearson, o valor obtido foi de 0,39, indicando uma correlação linear fraca. O *skill* $\left(\frac{RMSE_{ub}}{s_o}\right)$ está acima de 1 e a razão entre os desvios padrões modelado e observado $\left(\frac{s_m}{s_o}\right)$ tem valor de 2,12, indicando que há uma correlação, embora fraca.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

5.4 Velocidade do Vento

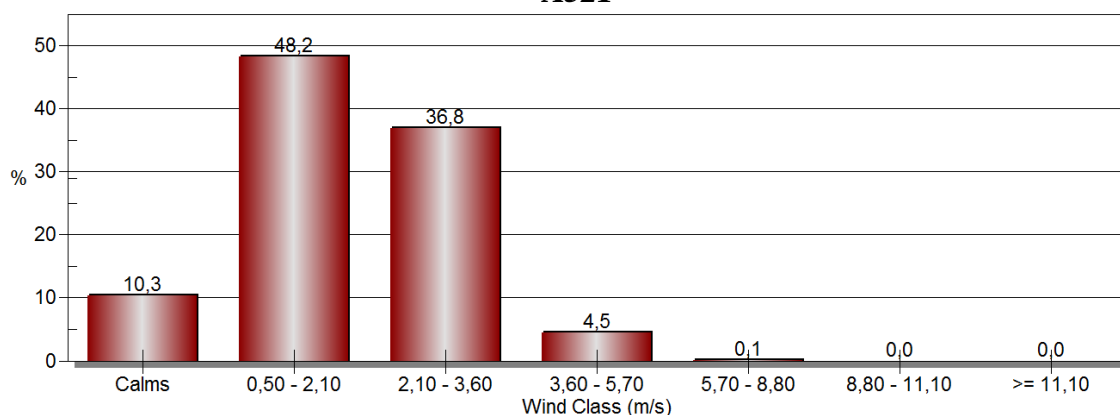
Tabela A- XI: Comparação da Velocidade do Vento observada na estação meteorológica A521 com a modelada pelo WRF

	VV (m/s) - INMET	VV (m/s) - WRF
Dados Esperados	26304	26304
Dados Registrados	26215	26304
Válidos	99,66%	100,00%
Inválidos	0,00%	0,00%
Ausentes	0,34%	0,00%
Valor Máximo	8,2	11,9
Valor Médio	1,8	2,6
Valor Mínimo	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor

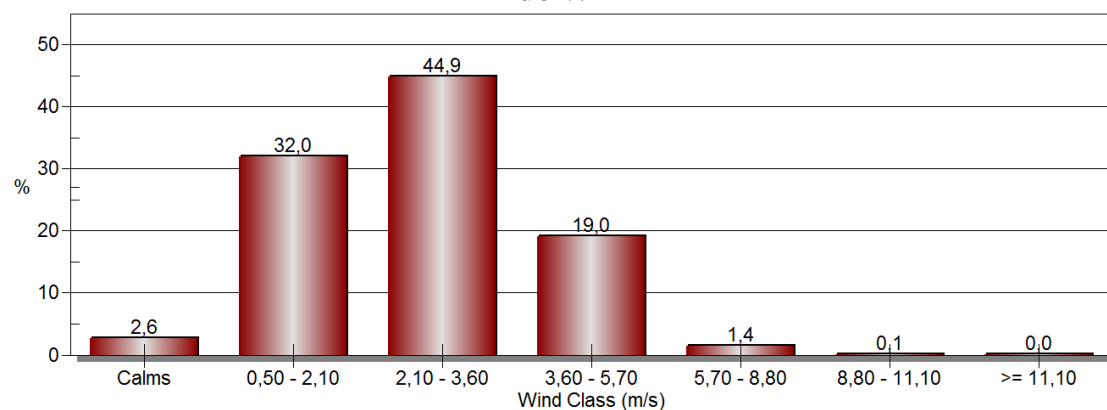
A Tabela A-XI indica que a modelagem feita pelo WRF está próxima da observada na variável velocidade do vento, sendo que o valor máximo está acima em 3,7 m/s, a média está acima em 0,8 m/s igual e a mínima igual.

Figura A- X: Distribuição de frequência de Velocidade do Vento para a estação A521



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A- XI: Distribuição de frequência de Velocidade do Vento para a modelagem do WRF



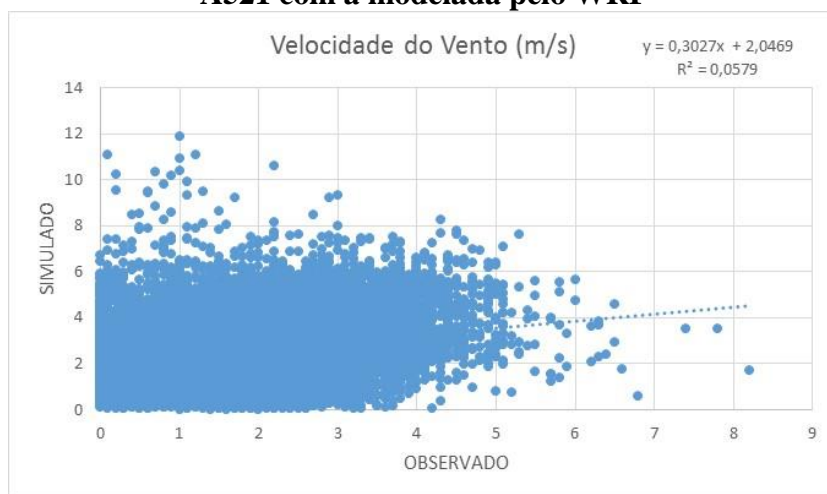
Fonte: Elaborado pelo autor

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

De acordo com as Figuras A-X e A-XI, na estação A521 a maior frequência de velocidade se dá entre 0,5 e 2,1 m/s com 48,2% do total e no simulado pelo WRF se encontra entre 2,1 e 3,6 m/s com 44,9% dos dados. Foi observada uma diferença no percentual de ventos calmos, onde a estação registra 10,3% contra 2,6% do WRF. Foi feita também uma análise estatística para comparar as duas variáveis, conforme Figura A-XII e Tabela A-XII.

Figura A- XII: Correlação entre a Velocidade do Vento observada pela estação A521 com a modelada pelo WRF



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- XIII: Análise estatística da variável Velocidade do Vento

Método	Valor	Correlação
R^2	0,0579	5,79%
PEARSON	0,24	Desprezível
$RMSE_{ub}$	1,42	1,41
s_o	1,01	-
s_m/s_o	1,26	74,19%

Fonte: Elaborado pelo autor

O coeficiente de determinação – R^2 - obtido foi igual a 0,0579. Na correlação de Pearson, o valor obtido foi de 0,24, indicando uma correlação linear desprezível. O $skill \left(\frac{RMSE_{ub}}{s_o} \right)$ possui valor acima de 1, e a razão entre os desvios padrões modelado e

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

observado $\left(\frac{s_m}{s_o}\right)$ tem valor de 1,26, indicando que existe pouca correlação entre os dados simulados e os observados.

5.5 Umidade Relativa

Tabela A- XII: Comparação da Umidade Relativa observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF

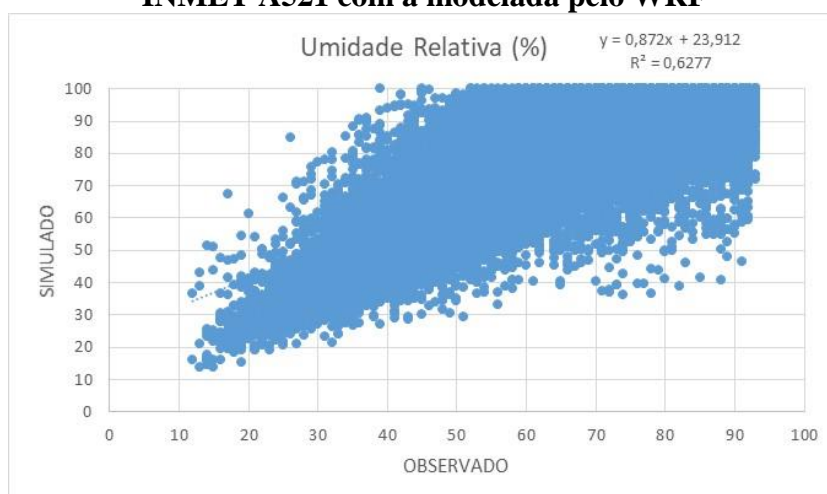
	UR (%) - INMET	UR (%) - WRF
Dados Esperados	26304	26304
Dados Registrados	26215	26304
Válidos	99,66%	100,00%
Inválidos	0,00%	0,00%
Ausentes	0,34%	0,00%
Valor Máximo	93	100
Valor Médio	65	81
Valor Mínimo	12	14

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela A-XII indica que a modelagem feita pelo WRF está bem próxima da observada na variável umidade relativa, sendo que o valor máximo está acima em 7%, a média está acima em 16% e o valor mínimo está acima em 2%. Foi feita também uma análise estatística para comparar as duas variáveis, conforme Figura A-XIII e Tabela A-XIII.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura A- XIII: Correlação entre a Umidade Relativa observada pela estação do INMET A521 com a modelada pelo WRF



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- XIII: Análise estatística da variável Umidade Relativa

<i>Método</i>	<i>Valor</i>	<i>Correlação</i>
R^2	0,6277	62,77%
PEARSON	0,79	Forte
$RMSE_{ub}$	11,77	0,68
s_o	17,22	-
s_m/s_o	1,10	89,94%

Fonte: Elaborado pelo autor

O coeficiente de determinação – R^2 - obtido foi equivalente 0,6277. Na correlação de Pearson, o valor obtido foi de 0,79, indicando uma correlação linear forte. O *skill* $\left(\frac{RMSE_{ub}}{s_o}\right)$ possui valor abaixo de 1, e a razão entre os desvios padrões modelado e observado $\left(\frac{s_m}{s_o}\right)$ tem valor de 1,10, indicando uma correlação entre os dados observados e os simulados.

5.6 Pressão Atmosférica

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela A- XIV: Comparação da Pressão Atmosférica observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF

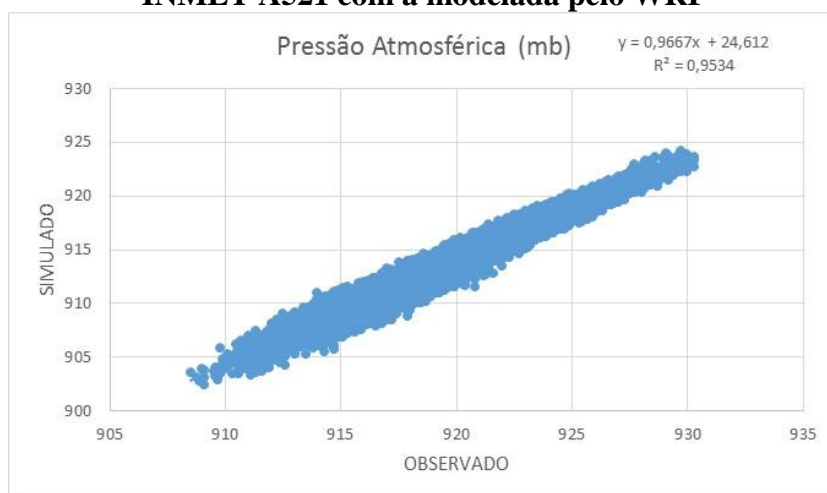
	P (mb) - INMET	P (mb) - WRF
Dados Esperados	26304	26304
Dados Registrados	26215	26304
Válidos	99,66%	100,00%
Inválidos	0,00%	0,00%
Ausentes	0,34%	0,00%
Valor Máximo	930,3	924,1
Valor Médio	919,5	913,5
Valor Mínimo	908,5	902,4

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela A-XIV indica que a modelagem feita pelo WRF está próxima da observada na variável pressão atmosférica, sendo que o valor máximo está abaixo em 6,2 mb, a média fica abaixo em 6,0 mb e a mínima também abaixo em 6,1 mb. A altitude onde a estação meteorológica de Belo Horizonte/MG (A521) está instalada é de 854 m e o local onde foi realizada a simulação é de 920 m, este último segundo os dados fornecidos pelo modelo.

A tendência é de os valores da pressão atmosférica que foram modelados serem inferiores aos valores medidos, uma vez que a altitude do local simulado é maior, portanto, o pequeno diferencial entre eles mencionado acima está dentro do esperado. Foi feita também uma análise estatística para comparar as duas variáveis, conforme Figura A-XIV e Tabela A-XV.

Figura A- XIV: Correlação entre a Pressão Atmosférica observada pela estação do INMET A521 com a modelada pelo WRF



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- XV: Análise estatística da variável Pressão Atmosférica

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

<i>Método</i>	<i>Valor</i>	<i>Correlação</i>
R^2	0,9534	95,34%
<i>PEARSON</i>	0,98	Muito Forte
$RMSE_{ub}$	0,70	0,22
s_o	3,22	-
s_m/s_o	0,99	99,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

O coeficiente de determinação – R^2 - obtido foi equivalente 0,9534. Na correlação de Pearson, o valor obtido foi de 0,98, indicando uma correlação linear muito forte. O $skill \left(\frac{RMSE_{ub}}{s_o} \right)$ possui valor abaixo de 1 e a razão entre os desvios padrões modelado e observado $\left(\frac{s_m}{s_o} \right)$ tem valor de 0,99, indicando uma forte correlação entre os dados observados e os modelados.

5.7 Altura do Teto ou Altura da Base das Nuvens (Ceiling Height)

Tabela A- XVI: Comparação da Altura do Teto observada na estação A521 com a modelada pelo WRF

	Ceil (m) - INMET	Ceil (m) - WRF
Dados Esperados	-	26304
Dados Registrados	-	25691
Válidos	-	97,67%
Inválidos	-	0,00%
Ausentes	-	2,33%
Valor Máximo	-	3298,1
Valor Médio	-	375,6
Valor Mínimo	-	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a variável altura da base das nuvens, não é possível realizar uma comparação devido à ausência deste parâmetro na estação do INMET. Entretanto, através da análise feita na Tabela A-XVI observa-se que a simulação possui valores dentro do esperado, ou seja, dentro do intervalo definido nas Tabelas A-II e A-III, indicando valores válidos para serem utilizados.

5.8 Precipitação

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

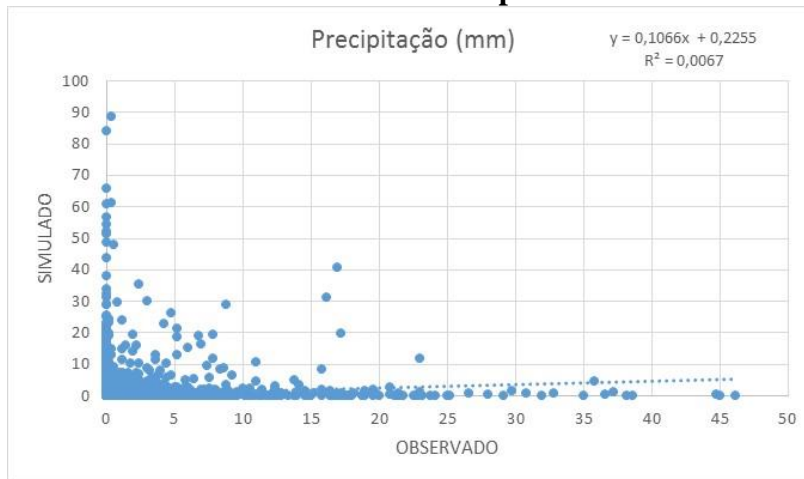
Tabela A- XVII: Comparação da Precipitação observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF

	Pr (mm) - INMET	Pr (mm) - WRF
Dados Esperados	26304	26304
Dados Registrados	26215	26304
Válidos	99,66%	100,00%
Inválidos	0,00%	0,00%
Ausentes	0,34%	0,00%
Valor Máximo	46,2	88,5
Valor Médio	0,2 / 3,7	0,2 / 2,5
Valor Mínimo	0,0 / 0,2	0,0 / 0,2

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela A-XVII indica que a modelagem feita pelo WRF está próxima da observada na variável precipitação, sendo que o valor máximo está acima em 42,3 mm, a média fica em 1,2 mm abaixo e a mínima igual considerando apenas dados com registro de precipitação, e considerando todos os dados, a média e a mínima são iguais. Foi feita também uma análise estatística para comparar as duas variáveis, conforme Figura A-XV e Tabela A-XVIII.

Figura A- XV: Correlação entre a Precipitação observada pela estação do INMET A521 com a modelada pelo WRF



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- XVIII: Análise estatística da variável Precipitação

Método	Valor	Correlação
R^2	0,0067	0,67%
PEARSON	0,08	Desprezível
$RMSE_{ub}$	2,35	1,58
s_o	1,49	-
s_m/s_o	1,30	69,52%

Fonte: Elaborado pelo autor

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

O coeficiente de determinação – R^2 - obtido foi equivalente a 0,0067. Na correlação de Pearson, o valor obtido foi de 0,08, indicando uma correlação linear desprezível. O $skill \left(\frac{RMSE_{ub}}{s_o} \right)$ possui valor acima de 1, e a razão entre os desvios padrões modelado e observado $\left(\frac{s_m}{s_o} \right)$ tem valor de 1,30, indicando que não há uma correlação entre a variável observada e a simulada.

Vale ressaltar que este é um comportamento esperado, visto que o local estudado se encontra sob clima tropical, regido por chuvas em maior parte locais, ou seja, os eventos de precipitação podem ocorrer na ordem de centenas de metros, sendo a distância entre a estação e o local simulado de 53 km. Isto indica uma diminuição na correlação deste parâmetro. Outro fator é a dificuldade em simular a precipitação. Diversos autores têm publicado várias parametrizações e disponibilizado aos usuários de modelos atmosféricos para adaptar aos locais de interesse, porém todas apresentam algum viés relacionado ao que é observado.

5.9 Radiação Solar

Tabela A- XIX: Comparação da Radiação Solar observada na estação meteorológica do INMET A521 com a modelada pelo WRF

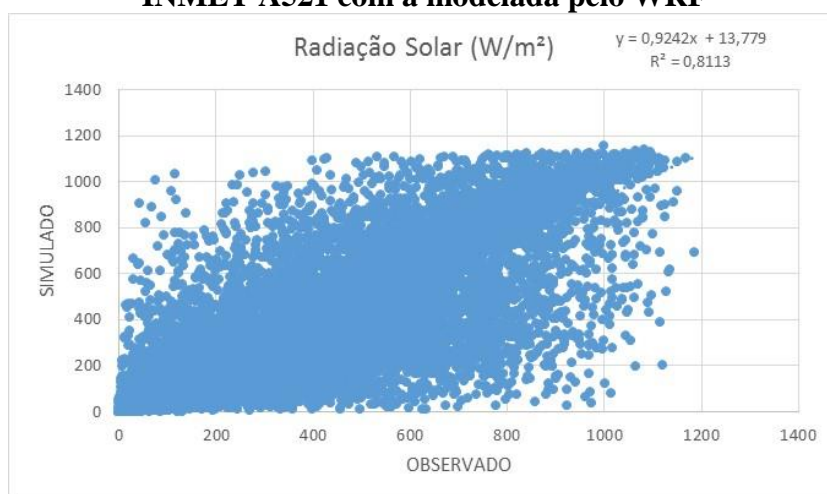
	R (W.m ²) - INMET	R (W.m ²) - WRF
Dados Esperados	26304	26304
Dados Registrados	26304	26304
Válidos	100,00%	100,00%
Inválidos	0,00%	0,00%
Ausentes	0,00%	0,00%
Valor Máximo	1185,64	1167,60
Valor Médio	207,63	205,67
Valor Mínimo	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela A-XIX indica que a modelagem feita pelo WRF está próxima da observada na variável radiação solar, sendo que o valor máximo está abaixo em 18,04 W/m², a média fica abaixo em 1,96 W/m² e a mínima igual. Foi feita também uma análise estatística para comparar as duas variáveis, conforme Figura A-XVI e Tabela A-XX.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Figura A- XV: Correlação entre a Radiação Solar observada pela estação do INMET A521 com a modelada pelo WRF



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela A- XX: Análise estatística da variável Radiação Solar

<i>Método</i>	<i>Valor</i>	<i>Correlação</i>
R^2	0,8113	81,13%
<i>PEARSON</i>	0,90	Muito Forte
$RMSE_{ub}$	131,67	0,45
s_o	291,25	-
s_m/s_o	1,03	97,40%

Fonte: Elaborado pelo autor

O coeficiente de determinação – R^2 - foi equivalente a 0,8113. Na correlação de Pearson, o valor obtido foi de 0,90, indicando uma correlação linear muito forte. O *skill* $\left(\frac{RMSE_{ub}}{s_o}\right)$ possui valor abaixo de 1, e a razão entre os desvios padrões modelado e observado $\left(\frac{s_m}{s_o}\right)$ tem valor de 1,03, indicando que há uma forte correlação entre os dados modelados e os observados.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou métodos estatísticos de validação dos dados meteorológicos simulados pelo modelo WRF para os municípios de Barão de Cocais/MG após a análise comparativa com os dados registrados pela estação do INMET A521 situada no município de Belo Horizonte/MG, incluindo a validação dos dados.

A estação A521 está instalada em um raio de 53 quilômetros da região de estudo e é a que possui maiores similaridades com os dados simulados devido à distância além da qualidade dos dados, portanto, esta estação foi a mais indicada para a comparação com os dados do modelo WRF feita neste estudo.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Os dados modelados pelo WRF apresentaram boa correlação com os dados registrados pela estação meteorológica, seja em quantidade como em qualidade dos dados coletados, excetuando a variável precipitação, o que é esperado levando em consideração as condições locais de relevo e clima. Quanto à variável direção do vento, através da análise feita, observou-se que teve uma correlação fraca a moderada com a coletada pela estação meteorológica do INMET A521.

Para a velocidade do vento, observou-se baixa correlação devido ao relevo existente a leste de Belo Horizonte, o qual influencia diretamente na velocidade e direção do vento na capital mineira. Conforme estudo feito pela CEMIG (2010), as direções do vento simuladas também são observadas na região em questão, fato que atesta a qualidade dos dados obtidos pelo WRF, tornando-os aptos de serem utilizados na modelagem de dispersão atmosférica. As variáveis simuladas de cobertura de nuvens e altura da base das nuvens também podem ser utilizadas na modelagem uma vez que possuem valores esperados.

Portanto, os dados simulados estão aptos para serem inseridos no AERMOD View por apresentarem boa correlação. Destaca-se que o objetivo da análise comparativa com dados reais de estações meteorológicas é avaliar se os dados simulados conseguem representar de maneira satisfatória a realidade meteorológica do local de estudo. Algumas divergências entre os parâmetros simulados e reais já são esperados uma vez que há diferenças topográficas entre estes sítios, além de particularidades do clima local. Ademais, a distância entre o local da simulação com a estação meteorológica é de cerca de 53 km.

PROJETO DOIS IRMÃOS FASE 2
ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA
ANOTAÇÃO DE RESPONSABILIDADE TÉCNICA (ART)