



VALE

Relatório:
RT PHY23-55

Dezembro de 2023
Revisão 01

Estudo de Dispersão Atmosférica para as etapas: de construção e operação do ramal ferroviário de Santa Leopoldina a Anchieta/ES

Physis Engenharia Ambiental

Av. São José, 199, Sala 02, Jardim Limoeiro
Serra, Espírito Santo
CNPJ: 36.397.573/0001-48



INFORMAÇÕES GERAIS

IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDEDOR	
Razão social:	Econservation Estudos e Projetos Ambientais Ltda
CNPJ:	14.328.147/0001-10
Nome Fantasia:	Econservation
Endereço:	Rua José Alexandre Buaiz, 300, Salas 1113 a 1116, Enseada do Suá, Vitória - ES
Telefone:	(27) 98122-8330
E-mail:	italo.pazolini@econservation.com.br

EMPRESA RESPONSÁVEL POR ESTE ESTUDO			
Empresa:	PHYSIS ENGENHARIA AMBIENTAL LTDA	Responsável Técnico:	Flávio Luiz Santos Soares
CNPJ:	27.987.360/0001-85		
Cadastro Técnico Federal:	7598022		
Registro CREA-ES:	18905		
Nº Contrato:	PHYPC23-55		
Av. São José, 199, Comercial Planalto, Sl. 02 - Jardim Limoeiro - 29164-037 – Serra - ES Tel. (27) 3051-1992 / E-mail: contato@physisambiental.com.br			

IDENTIFICAÇÃO DA EQUIPE DE ELABORAÇÃO DO ESTUDO

EQUIPE TÉCNICA			
ESTA EQUIPE PARTICIPOU DA ELABORAÇÃO DESTE ESTUDO E RESPONSABILIZA-SE TECNICAMENTE POR SUAS RESPECTIVAS ÁREAS			
TÉCNICO	FORMAÇÃO / REGISTRO PROF.	EMPRESA	RESPONSABILIDADE NO PROJETO
Geraldo André Rosseto Barreto	Eng. Sanitarista e Ambiental – CREA-ES 051401-D/ CTF IBAMA 7597904	Physis Engenharia Ambiental	Coordenação Técnica e revisão de relatório
Flávio Luiz Santos Soares	Eng. Ambiental – CREA-ES 053391/D –	Physis Engenharia Ambiental	Elaboração do projeto e responsável técnico pelo projeto
Gabriel Wilson Lorena Florêncio	Meteorologista – Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos – CREA-MG 312868	Physis Engenharia Ambiental	Elaboração do projeto e responsável técnico pelas análises meteorológicas

*A Anotação de responsabilidades técnica se encontra no **Anexo I**.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	5
2. OBJETIVOS	6
3. DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	6
4. DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	7
5. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO USO DO SOLO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA.....	15
6. ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS.....	19
6.1 DADOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS.....	19
6.1.1 Triagem dos dados meteorológicos observados	22
6.1.2 Caracterização e análise da representatividade dos dados meteorológicos observados	23
6.2 DADOS METEOROLÓGICOS MODELADOS.....	25
6.2.1 Aquisição dos dados meteorológicos modelados	25
6.2.2 Análise estatística dos dados meteorológicos modelados.....	27
6.2.3 Caracterização e análise da representatividade dos dados meteorológicos modelados	29
7. CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE ADOTADAS - WRF.....	35
7.1 DIREÇÃO E VELOCIDADE DO VENTO	35
7.2 PRECIPITAÇÃO	36
7.3 TEMPERATURA.....	37
7.4 UMIDADE RELATIVA.....	37
7.5 PRESSÃO ATMOSFÉRICA	38
8. PARÂMETROS PROCESSADOR PELO AERMET	39
8.1 COMPRIMENTO DE MONIN-OBUKHOV.....	39
8.2 FLUXO DE CALOR SENSÍVEL	39
8.3 VELOCIDADE DE FRICÇÃO.....	40
8.4 ESCALA DE VELOCIDADE CONVECTIVA	40
8.5 ALTURA DA CAMADA MECÂNICA	41
8.6 ALTURA DA CAMADA CONVECTIVA	42
9. POLUENTES E PADRÕES DE QUALIDADE DO AR	43
9.1 POLUENTES ESTUDADOS.....	43
9.2 PADRÕES DE QUALIDADE DO AR	43
10. METODOLOGIA.....	46
10.1 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	46
10.1.1 Grupos de emissões considerados.....	46



10.2 MODELAGEM DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA.....	54
11. RESULTADO.....	55
11.1 INVENTÁRIO DE FONTES.....	55
11.2 MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	57
11.2.1 Resultados para o cenário de construção.....	58
11.2.2 Resultados para o cenário de operação	75
12. CONCLUSÕES.....	92
13. REFERÊNCIAS	93

ANEXOS

ANEXO I – ANOTAÇÃO DE RESPONSABILIDADE TÉCNICA	97
--	----

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo contém os resultados obtidos para as emissões de poluentes atmosféricos de material particulado nas frações definidas por lei, advindos da construção e operação do ramal ferroviário que será construído a partir do município de Santa Leopoldina/ES até o município de Anchieta/ES, totalizando uma extensão de malha ferroviária de 99,3 km. A ferrovia será um importante projeto para escoamento de minério de ferro no estado.

Na fase de construção está prevista uma área de 880,88 ha para a faixa de servidão e ADMes, canteiros e pátios super (áreas de disposição de solo extraído dentro da faixa de servidão e realocados na mesma área da faixa), construção de vias de acesso laterais com uma área total de 54,11 ha e canteiro, ADME e pátio super com área de 5,82 ha que está fora da faixa de servidão.

Na fase de operação serão transportado minério de ferro que emite material particulado em vagões específicos. Tomando como média a operação prevista de 30 anos (2034 a 2063), serão transportados anualmente, em média, a quantidade de 14.416.013,33 t de minério de ferro.

Com base no exposto acima, o presente estudo tem por objetivo avaliar as emissões e as dispersões de Partículas Totais em Suspensão (**PTS**) e Partículas Inaláveis com diâmetro aerodinâmico $\leq 10 \mu\text{m}$ e $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (**MP₁₀** e **MP_{2,5}**), através da modelagem matemática computacional de dispersão atmosférica, por meio do software AERMOD View 12.0 (2023), desenvolvido pela Lakes Environmental, com o código aberto AERMOD V.23132 disponibilizado pela USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), para avaliar os impactos dos cenários das fases de construção e operação da linha férrea na qualidade do ar local e seus impactos na comunidade.

2. OBJETIVOS

- Inventariar os poluentes atmosféricos provenientes das atividades a serem desenvolvidas na construção e operação da linha férrea;
- Estimar as emissões atmosféricas das atividades a serem desenvolvidas pelo empreendimento para os cenários de construção e operação com base em fatores de emissões obtidos na literatura científica, na AP-42: *Compilation of Air Emissions Factors* (USEPA), *European Environmental Agency* - EMEP/EEA e *Environmental Protection Agency Australia*;
- Realizar a modelagem matemática dos poluentes: Partículas Totais em Suspensão (**PTS**) e Partículas Inaláveis com diâmetro aerodinâmico $\leq 10 \mu\text{m}$ e $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (**MP₁₀** e **MP_{2,5}**), utilizando o software AERMOD V.23132;
- Determinar as concentrações desses poluentes atmosféricos nos pontos receptores de interesse;
- Avaliar as concentrações desses poluentes em receptores próximos ao empreendimento, comparando com os padrões de qualidade do ar estabelecidos na Resolução CONAMA nº 491/2018 e Decreto Estadual Nº 3463-R de 16/12/2013, para materiais particulados.

3. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O ramal ferroviário passará por duas fases onde ocorrerão emissões de particulados, a primeira onde haverá as atividades de revolvimento, nivelamento, escavação e transporte do solo para as construções das áreas da faixa de servidão, de acesso e de disposição de solo extraído (canteiros, pátios super e ADMEs). Já na segunda fase, que ocorrerá na operação, as emissões serão basicamente em função da tensão de cisalhamento gerada pelo escoamento de ar sobre o minério de ferro, nessa fase o trem percorrerá aproximadamente 99,3 km de distância.

4. DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para realizar a modelagem matemática da dispersão de poluentes na atmosfera, foram considerados os fatores fundamentais para um estudo de modelagem numérica de emissões atmosféricas, sendo estes: a abrangência e a resolução da modelagem.

Quanto à abrangência, a área delimitada deve ser extensa o suficiente para possibilitar a identificação das características de dispersão dos poluentes estudados, garantindo que os parâmetros estatísticos da dispersão sejam representativos. Além disso, possui a finalidade de compreender os impactos das emissões nas comunidades circunvizinhas, e dessa forma a abrangência da área de estudo deve incluir a área das comunidades próximas ao empreendimento.

No presente estudo foi considerado o domínio computacional com área de abrangência de 1600 km² (40 km x 40 km), com objetivo de atender os critérios elencados no parágrafo anterior. A **Figura 4-1**, ilustra o domínio computacional e o traçado da linha férrea, cujo centro do domínio encontra-se na Latitude: 349.140 m E e Longitude: 7.735.684 m S, zona 24S, *datum* SIRGAS 2000. Na área em questão, será desenvolvida terraplanagem da faixa de servidão e ADMs, canteiros e pátio super, e o escoamento de minério de ferro.

O domínio computacional foi subdividido (discretizado) em células que variam seu espaçamento em função da distância em relação ao centro do domínio, dessa forma o quadrado de 40km x 40km, teve o espaçamento regular entre os receptores de 1.000 m. A malha regular utilizada para o modelo totalizou 26.281 horas, três anos de dados processados (2019, 2020 e 2021) e 6.561 pontos receptores analisados, conforme ilustrado na **Figura 4-2**. Além disso, foram incluídos 76 receptores discretos representando os pontos de interesse representados por bairros e comunidades limítrofes ao longo da faixa de servidão onde será construída a linha férrea.

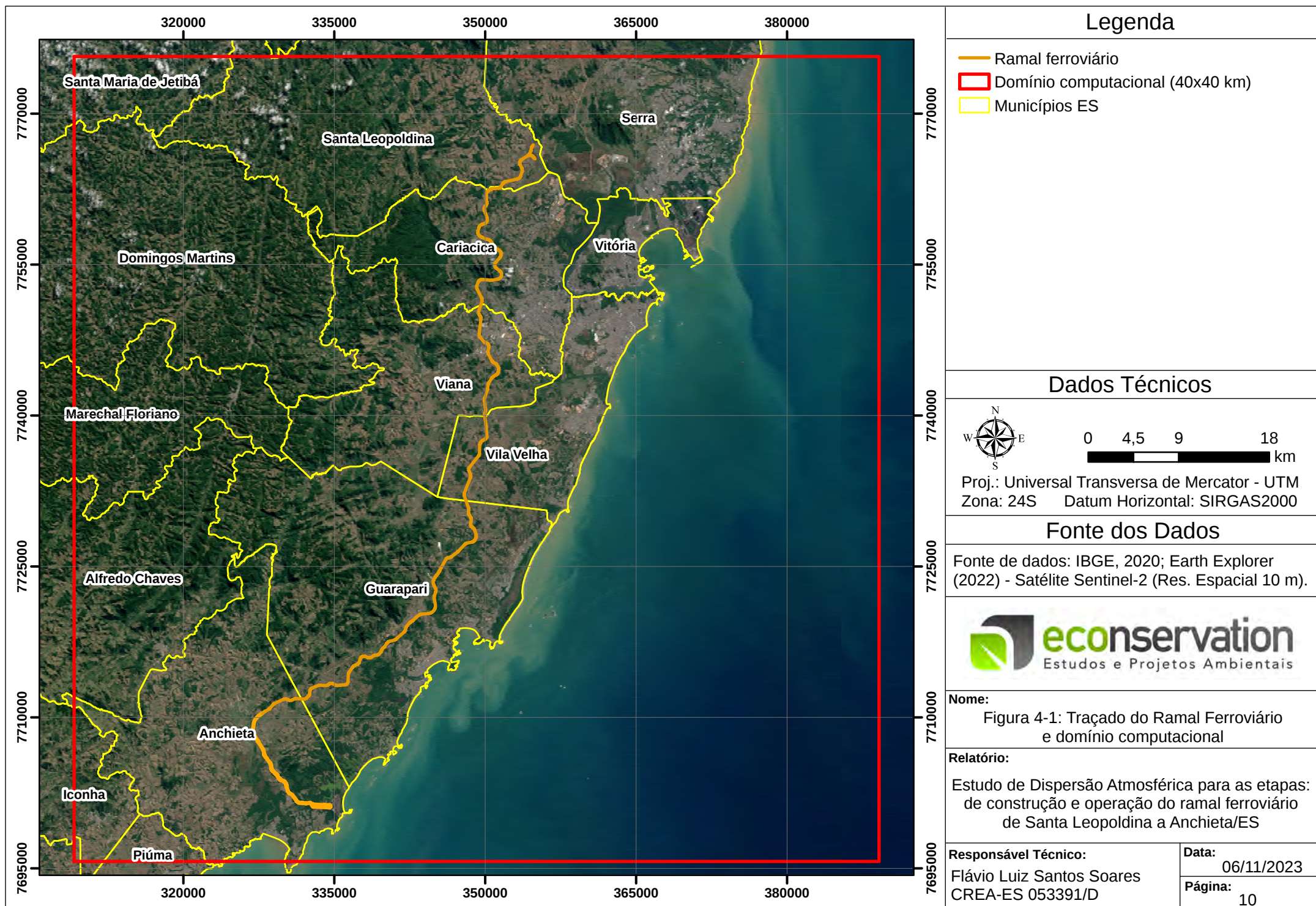
A **Tabela 4-1** sumariza os pontos receptores discretos, suas coordenadas, a cota do terreno (obtidas por meio do o Modelo Digital de Elevação (MDE), o qual utilizou-se o MDE da Missão SRTM1, com resolução espacial de 30 m/pixel, disponibilizado pela USGS, 2021) e a distância da fonte. A **Figura 4-3** ilustra a representação georreferenciada dos receptores discretos. Ressalta-se, ainda, que foram utilizadas imagens de satélite do ano 2023 (Google Earth v.7.3.6.9345) para a escolha dos receptores discretos, de modo a observar a expansão urbana na região do domínio computacional.

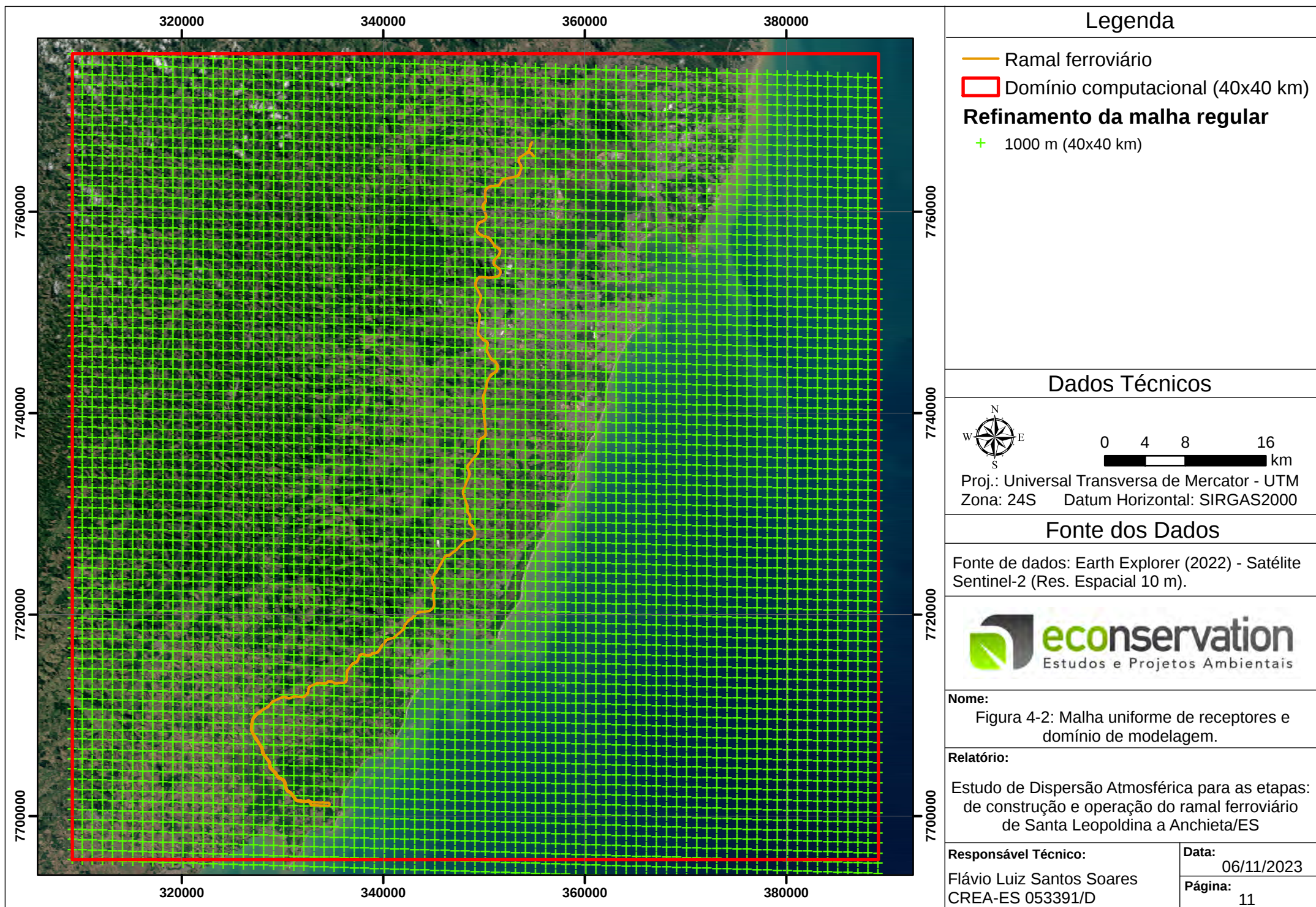
Tabela 4-1: Receptores discretos utilizados na modelagem. Datum SIRGAS2000, projeção UTM, zona 24S.

Código	Receptor Discreto	Município	Coord. E (m)	Coord. S (m)	Cota (m)	Distância da fonte (m)
1	Zona Rural 01	Santa Leopoldina	352.336	7.765.180	30,27	1.065,00
2	Zona Rural 02	Cariacica	351.725	7.762.030	5,22	563
3	Empresas - Padre Matias	Cariacica	356.461	7.762.280	5,94	3.185,00
4	Nova Rosa da Penha	Cariacica	354.996	7.759.680	64,4	4.730,00
5	Prolar II	Cariacica	350.473	7.759.320	61,73	254
6	Anto. Ferreira Borges - Área Rural	Cariacica	348.854	7.758.930	39	592
7	Antônio Ferreira Borges 01	Cariacica	349.929	7.758.780	67,3	231
8	Antônio Ferreira Borges 02	Cariacica	350.620	7.758.320	74,44	987
9	Antônio Ferreira Borges 03	Cariacica	349.575	7.758.140	69,83	205
10	Zona Rural 03	Cariacica	348.928	7.757.770	45,42	393
11	Nova República	Cariacica	351.995	7.757.810	52,5	1.523,00

Código	Receptor Discreto	Município	Coord. E (m)	Coord. S (m)	Cota (m)	Distância da fonte (m)
12	Fazenda Parque Vale do Moxuara	Cariacica	349.588	7.756.180	18,67	1.384,00
13	Bubú	Cariacica	351.820	7.755.580	17,11	263
14	Campo Verde	Cariacica	353.138	7.755.510	6,27	1.520,00
15	Cangaíba	Cariacica	352.481	7.753.950	52,47	796
16	Congo de Boa vista	Cariacica	348.630	7.753.300	50,33	362
17	Novo Brasil	Cariacica	349.561	7.753.160	51,92	200
18	Boa vista	Cariacica	348.702	7.752.420	51,6	470
19	Vale dos Reis	Cariacica	350.183	7.751.920	31,4	532
20	Nova Campo Grande	Cariacica	349.320	7.751.500	38	328
21	Vista Dourada	Cariacica	350.822	7.751.020	57,82	1.092,00
22	Marcílio de Noronha 01	Viana	350.594	7.750.060	66,58	1.039,00
23	Marcílio de Noronha 02	Viana	351.030	7.749.460	65	1.416,00
24	Canaã	Viana	349.807	7.748.240	57,53	341
25	Universal	Viana	349.234	7.747.980	23,87	137
26	Areinha	Viana	350.481	7.746.670	28,93	95
27	Área Grandes Empreendimentos Viana	Viana	349.363	7.746.370	17,43	875
28	Vale do Sol	Viana	351.335	7.746.030	60	796
29	Bom Pastor	Viana	346.225	7.744.560	29,5	3.988,00
30	Jucu - Viana	Viana	347.610	7.741.140	8	2.223,00
31	Penitenciária	Vila Velha	347.118	7.735.700	40,33	1.538,00
32	Ibes	Vila Velha	350.171	7.734.570	38	1.549,00
33	Jucu - Vila Velha	Vila Velha	346.541	7.733.480	55,72	1.754,00
34	Zona Rural 04 - Guarapari	Guarapari	348.919	7.731.150	41,53	630
35	Amarelos	Guarapari	345.482	7.730.230	20,6	2.811,00
36	Parque Aquático - Amarelos	Guarapari	348.500	7.728.440	37,22	467
37	Residencial Vale do Lunar	Guarapari	351.462	7.726.970	8,73	2.395,00
38	Zona Rural 05 - Guarapari	Guarapari	345.561	7.724.900	23,2	20
39	Iguapé	Guarapari	344.198	7.724.560	20,6	1.140,00
40	Andana	Guarapari	345.874	7.722.900	41,73	738
41	Banquetá	Guarapari	344.483	7.722.520	31,86	549
42	Samambaia	Guarapari	343.594	7.721.940	9	1.273,00
43	Zona rural 07 - Guarapari	Guarapari	344.486	7.721.710	19,4	447
44	Zona rural 08 - Guarapari	Guarapari	345.597	7.721.840	35,53	620
45	Jabaraí	Guarapari	344.835	7.718.820	16,5	1.530,00
46	Jardim Guarapari	Guarapari	341.185	7.718.320	37,33	314
47	Nossa Senhora de Fátima	Guarapari	342.147	7.717.450	24	880
48	São Gabriel	Guarapari	341.460	7.717.180	35	614
49	Várzea nova	Guarapari	339.790	7.717.760	23,89	529
50	Jabuti	Guarapari	337.958	7.716.600	17,73	466
51	Zona rural 09 - Guarapari	Guarapari	337.355	7.714.510	13,56	630
52	Santa Margarida	Guarapari	341.475	7.712.950	8,17	4.956,00

Código	Receptor Discreto	Município	Coord. E (m)	Coord. S (m)	Cota (m)	Distância da fonte (m)
53	Reta Grande	Guarapari	331.650	7.714.960	12,67	2.296,00
54	Zona Rural 10 - Guarapari	Guarapari	331.890	7.713.200	27	788
55	Taquara do Reino - Guarapari	Guarapari	335.885	7.710.800	30,39	2.309,00
56	Meaípe	Guarapari	339.060	7.706.360	18,33	7.345,00
57	Itajobaia	Anchieta	330.368	7.712.070	24,53	196
58	Zona Rural 11 - Anchieta	Anchieta	328.202	7.709.640	3,33	490
59	Zona rural 12 - Anchieta	Anchieta	330.890	7.709.070	5,33	2431
60	Zona Rural 13 - Anchieta	Anchieta	326.265	7.710.039	4,2	866
61	Zona Rural 14 - Anchieta	Anchieta	327.786	7.707.250	4,8	79
62	Escola Santa Luzia do Monteiro	Anchieta	329.127	7.705.994	0,32	681
63	Zona Rual 15 - Anchieta	Anchieta	328.417	7.705.561	4,16	59
64	Zona Rural 16 - Anchieta	Anchieta	328.415	7.704.891	5,58	303
65	Distrito de Cantinho Monte Belo	Anchieta	332.375	7.705.534	53,13	3000
66	Escola Municipal Infantil Rosalino Simões	Anchieta	330.250	7.702.695	37,5	81
67	Distrito Chapada do A	Anchieta	330.276	7.702.141	34,97	381
68	Loteamento Recanto do Sol	Anchieta	333.035	7.699.781	18,53	1295
69	Loteamento S.I.M.C.O	Anchieta	334.548	7.699.652	13,47	1345
70	Distrito de Maembá	Anchieta	335.853	7.702.609	2,2	1811
71	Nova Jerusalém	Anchieta	329.311	7.699.710	8,97	10457
72	Irirí	Anchieta	323.388	7.696.161	28,9	14720
73	Alvorada	Anchieta	330.144	7.698.201	0,8	2739
74	Centro Iconhã	Iconhã	311.479	7.699.790	40,93	19431
75	Centro Alfredo Chaves	Alfredo Chaves	317.895	7.716.930	12,5	12332
76	Loteamento Céu Azul	Piúma	320.957	7.696.400	37,59	15427



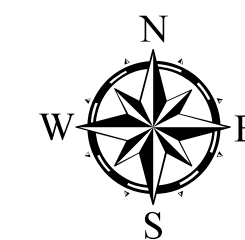




Legenda

- Receptores discretos
 - Faixa de servidão do ramal ferroviário
 - Municípios ES
- 1 - Zona Rural 01
2 - Zona Rural 02
3 - Empresas - Padre Matias
4 - Nova Rosa da Penha
5 - Prolar II
6 - Antônio Ferreira Borges - Área Rural
7 - Antônio Ferreira Borges 01
8 - Antônio Ferreira Borges 02
9 - Antônio Ferreira Borges 03
10 - Zona Rural 03
11 - Nova República
12 - Fazenda Parque Vale do Moxuara
13 - Bubú
14 - Campo Verde
15 - Cangaíba
16 - Congo de Boa vista
17 - Novo Brasil
18 - Boa vista
19 - Vale dos Reis
20 - Nova Campo Grande
21 - Vista Dourada
22 - Marçílio de Noronha 01
23 - Marçílio de Noronha 02
24 - Canaã
25 - Universal
26 - Areinha
27 - Área Grandes Empreendimentos Viana
28 - Vale do Sol
29 - Bom Pastor
30 - Jucu - Viana
31 - Penitenciária
32 - Ibés
33 - Jucu - Vila Velha
34 - Zona Rural 04 - Guarapari
35 - Amarelos
36 - Parque Aquático - Amarelos
- 37 - Residencial Vale do Lunar
38 - Zona Rural 05 - Guarapari
39 - Iguapé
40 - Andana
41 - Banquetá
42 - Samambaia
43 - Zona rural 07 - Guarapari
44 - Zona rural 08 - Guarapari
45 - Jabarái
46 - Jardim Guarapari
47 - Nossa Senhora de Fátima
48 - São Gabriel
49 - Várzea nova
50 - Jabuti
51 - Zona rural 09 - Guarapari
52 - Santa Margarida
53 - Reta Grande
54 - Zona Rural 10 - Guarapari
55 - Taquara do Reino - Guarapari
56 - Meaípe
57 - Itajobaia
58 - Zona Rural 11 - Anchieta
59 - Zona rural 12 - Anchieta
60 - Zona Rural 13 - Anchieta
61 - Zona Rural 14 - Anchieta
62 - Escola Santa Luzia do Monteiro
63 - Zona Rual 15 - Anchieta
64 - Zona Rural 16 - Anchieta
65 - Distrito de Cantinho Monte Belo
66 - Escola Municipal Infantil Rosalino Simões
67 - Distrito Chapada do A
68 - Loteamento Recanto do Sol
69 - Loteamento S.I.M.C.O
70 - Distrito de Maembá
71 - Nova Jerusalém
72 - Iriri
73 - Alvorada
74 - Centro Iconhã
75 - Centro Alfredo Chaves
76 - Loteamento Céu Azul

Dados Técnicos



0 4 8 16 km

Proj.: Universal Transversa de Mercator - UTM
Zona: 24S Datum Horizontal: SIRGAS2000

Fonte dos Dados

Fonte de dados: IBGE, 2020; Earth Explorer (2022) - Satélite Sentinel-2 (Res. Espacial 10 m).



Nome:

Figura 4-3: Localização dos receptores discretos ao longo da faixa de servidão.

Relatório:

Estudo de Dispersão Atmosférica para as etapas: de construção e operação do ramal ferroviário de Santa Leopoldina a Anchieta/ES

Responsável Técnico:

Flávio Luiz Santos Soares
CREA-ES 053391/D

Data:

07/11/2023

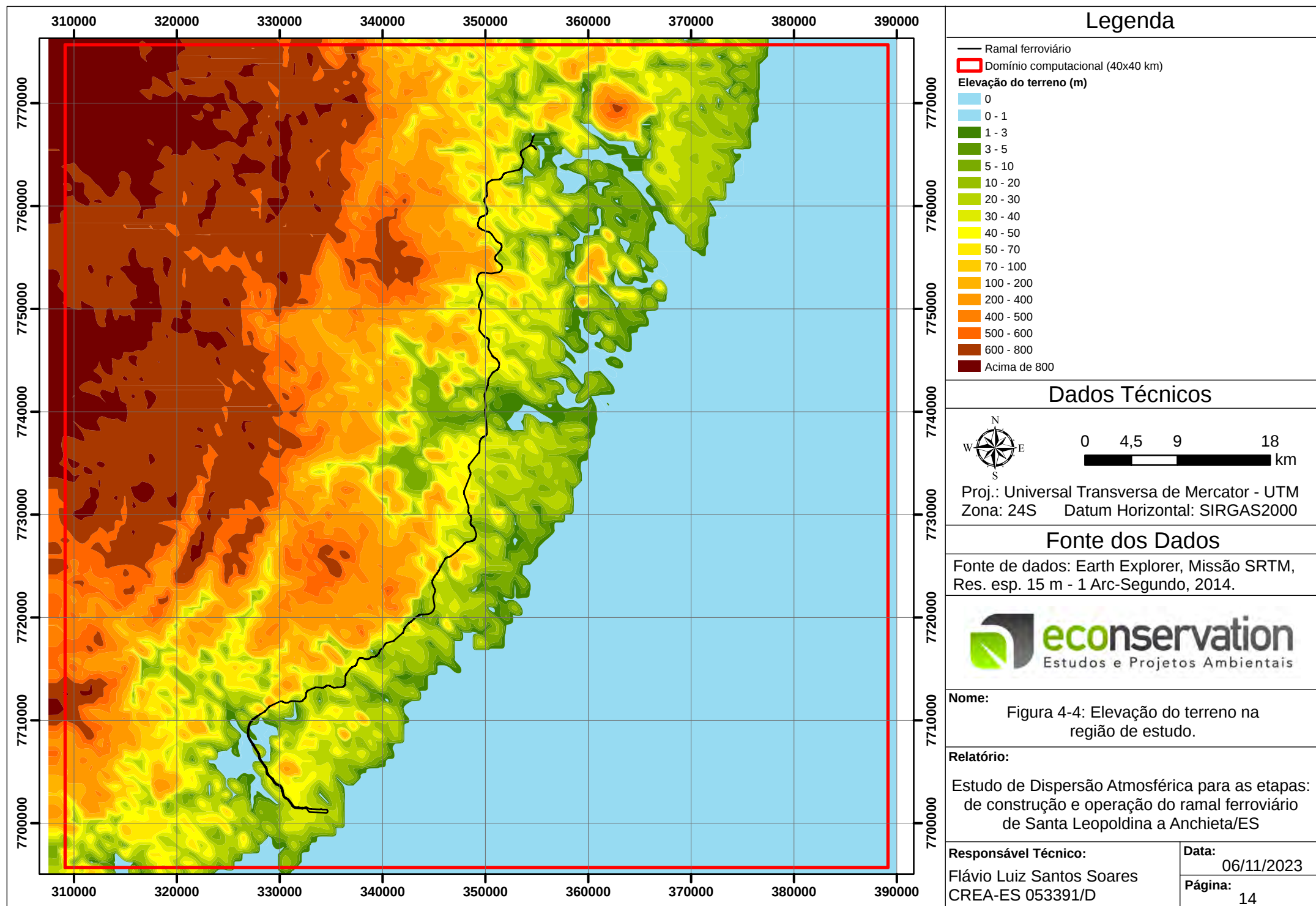
Página:

12

Na modelagem de dispersão, a compreensão dos aspectos topográficos é de fundamental importância, pois as características do relevo podem influenciar as condições meteorológicas de microescala eventualmente particulares em relação aos sistemas atmosféricos que incidem, como direção e velocidade do vento, bem como a dispersão dos poluentes. A **Figura 4-4** ilustra a topografia (relevo) da região, utilizando o MDE da missão SRTM1 (USGS, 2023).

Outro fator importante para o modelo de dispersão é definir o uso e ocupação do solo no entorno da estação meteorológica de superfície, considerada como fonte de extração de dados para execução do modelo. Ao observar as estações próximas as áreas do empreendimento dentro do limite de distância definido pela EPA de 50 km (AERMOD Implementation Guide, 2021a; User's Guide for AERSURFACE Tool, 2020; User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET), 2021d), foram considerados dois fatores importantes para que fossem utilizados os dados meteorológicos modelados de superfície e de ar superior da estação virtual, processados pelo modelo WRF – Weather Research and Forecasting Model, para os anos de 2019, 2020 e 2021 e não os dados observados. Tais fatores foram a baixa disponibilidade de dados das estações do INMET, com a porcentagem abaixo do limite mínimo de representatividade de dados válidos para estudo que utilizam o modelo AERMET/AERMOD, que é de 90%, conforme definido no documento User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET), (EPA, 2021d), discutido no **Capítulo 6**, bem como o uso do solo no entorno das estações que mais se assemelha o uso do solo médio de todo o trecho percorrido pela linha férrea.

Ao observar esses dois fatores, a estação de Vila Velha (INMET – A634) foi a que apresentou o uso e ocupação do solo mais próximo de todo o traçado do ramal ferroviário, onde estará basicamente inserido em meio rural, com áreas urbanas de baixa densidade, contudo, a estação não apresentou a porcentagem de dados válidos permitido para processar o modelo AERMET/AERMOD de 90%, isso foi observado também em outras estações do INMET, próximas ao ponto central de análise, que possuem todas as variáveis com dados horários que são inseridos no modelo AERMET/AERMOD. Dessa forma, no **Capítulo 5** será discutido o uso e ocupação do solo no entorno da estação virtual, ponto definido em uma área onde possui vários elementos por onde a linha férrea percorrerá e no **Capítulo 6** a discussão dos dados obtidos e utilizados do modelo meteorológico WRF, bem como suas parametrizações e comparação com os dados observados para análise da representatividade.



5. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO USO DO SOLO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

A classificação do uso do solo é importante no cálculo de parâmetros relacionados à superfície (albedo, razão de Bowen e Rugosidade do solo), pois atuam fortemente na dispersão de poluentes, uma vez que estabelecem uma série de fatores indispensáveis para o entendimento da dinâmica atmosférica na região, conforme definidos pela USEPA (2020) no documento intitulado *User's Guide for AERSURFACE Tool*.

Segundo a EPA o comprimento da rugosidade está relacionado as alturas dos obstáculos ao fluxo do vento incidente na região, sendo fator importante na determinação da magnitude da turbulência mecânica e da estabilidade da camada limite da atmosfera. Já o albedo é a refletância da radiação solar incidente na superfície que volta ao espaço sem ser absorvida e a razão de Bowen é um indicador de umidade da superfície, utilizado para determinar parâmetros da camada limite planetária. Dessa forma de acordo com as características do uso do solo da região de estudo estes parâmetros se modificam e são importantes na dinâmica da dispersão de poluentes atmosférico na bacia local.

Visto o exposto acima e seguindo as recomendações da EPA as análises relacionadas aos parâmetros avaliados de acordo com as características da superfície (albedo, comprimento da rugosidade e razão de Bowen) no entorno da estação virtual, localizada nas coordenadas: longitude: 349.984 m E e latitude 7.739.347 m S, seguiram as metodologias descritas nos arquivos disponibilizados pela EPA (*AERMOD Implementation Guide*, 2021a; *User's Guide for AERSURFACE Tool*, 2020; *User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET)*, 2021d). Para determinar o albedo o documento *AERMOD Implementation Guide*, 2021a, ora citado, leva em consideração a média aritmética (**Equação 5-1**) da área de cada classe identificadas da superfície terrestre (grade 10 x 10 km), a razão de Bowen a média geométrica (**Equação 5-2**) desta grade, e a rugosidade, a média geométrica ponderada da direção inversa dos elementos identificados na circunferência de raio de 1km no entorno da estação meteorológica (**Equação 5-3**) e em cada setor considerado, as equações foram obtidas no documento *User's Guide for AERSURFACE Tool* (EPA, 2020). O software utilizado para processar os parâmetros citados no domínio recomendado foi o AESURFACE v.20060 disponibilizado pela USEPA (2021).

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}{n}$$

Equação 5-1

Onde:

$\bar{\alpha}$ - Média aritmética do albedo;

α_n - Soma dos valores de albedos para cada classe identificada;

n - número de dados do conjunto.

$$\bar{B} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln(B_i)}{n} \right)$$

Equação 5-2

Onde:

$\bar{B}$ - Média geométrica da razão de Bowen;

B_i - Soma dos valores de log da razão de Bowen para cada classe identificada;

n - número de dados do conjunto.

$$\overline{Z_0} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} * \ln (Z_{0_i}) \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \right)$$

Equação 5-3

Onde:

$\overline{Z_0}$ - Média geométrica ponderada pela distância inversa do comprimento da rugosidade;

Z_{0_i} - Comprimento da rugosidade para cada classe identificada;

d_i - Distância entre o centro da grade e a torre meteorológica para cada classe identificada (ponderação da fração (fração do total representativo da área) sobre a distância);

p - igual a 1;

n - número de dados do conjunto.

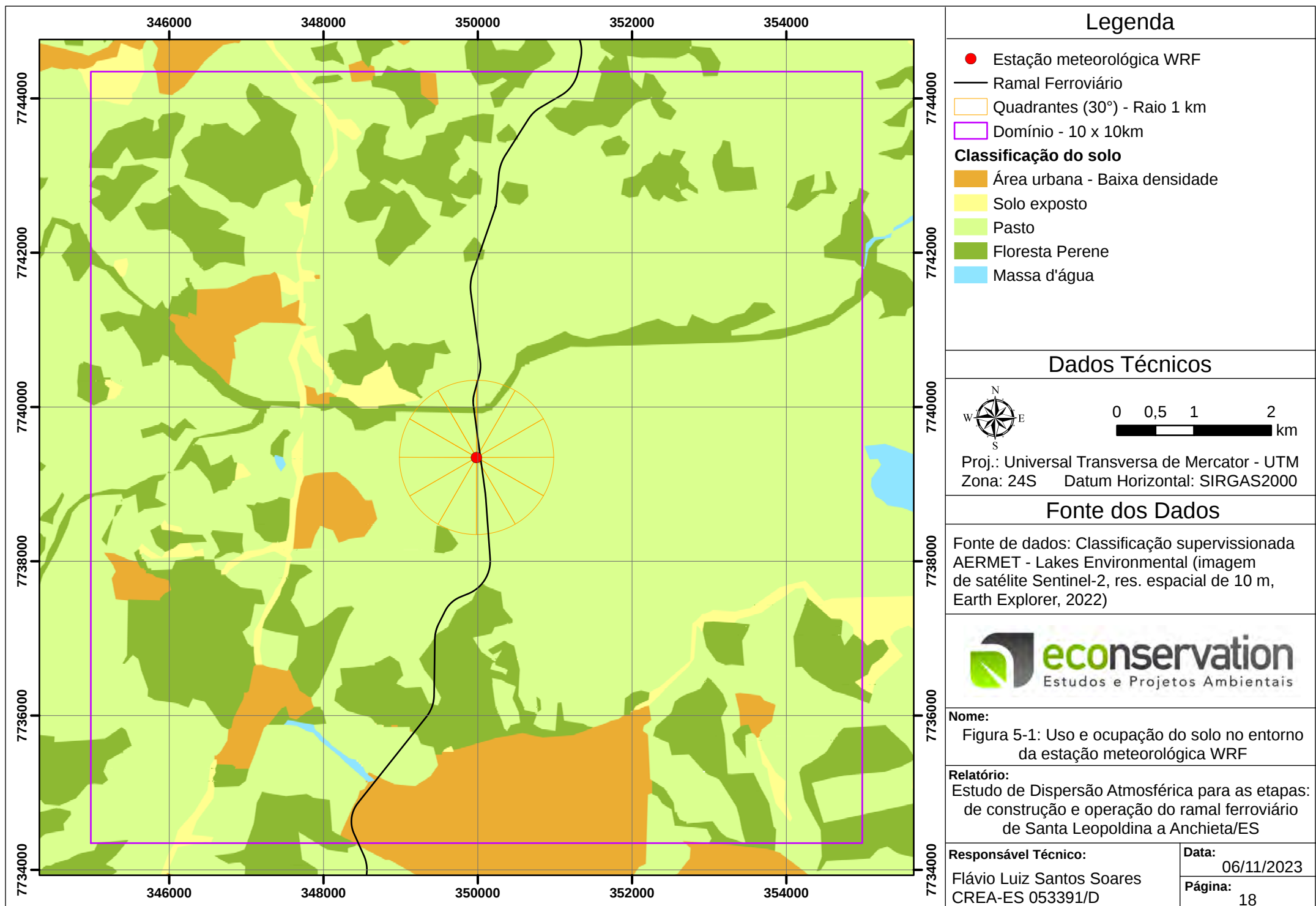
A **Tabela 5-1** traz a porcentagem do uso e ocupação do solo na grade de 10 por 10 km, no entorno da estação virtual, e a **Tabela 5-2**, traz o Albedo, Razão de Bowen e rugosidade, após processamento do AERSURFACE tool, de acordo com os usos do solo no entorno da estação virtual, localiza na região limdeira ao empreendimento (porção oeste) em uma altitude que não se configura como vale e represente as características contida no domínio computacional. Cabe destacar que o comprimento da rugosidade na circunferência no entorno da estação de raio de 1 km, foi dividido em quadrantes de 30° para uma melhor caraterização do uso do solo. A **Figura 5-1**, traz a representação dos elementos identificados no entorno da estação meteorológica virtual. Os parâmetros apresentados neste tópico serão utilizados no pré-processador AERMET.

Tabela 5-2: Classificação do uso do solo.

Classes do solo	Estação Meteorológica A603 - Duque de Caxias	
	Área Total (km²)	Porcentagem do uso do solo
Área Urbana de baixa densidade	9,87	9,87%
Solo Exposto	2,65	2,65%
Massa d'água	0,59	0,59%
Floresta perene	21,24	21,24%
Pastagem / Feno	65,65	65,65%
Total	100	100%

Tabela 5-2: Caracterização do albedo, razão de Bowen e rugosidade, pela estação do ano.

Setores	Verão			Outono			Inverno			Primavera		
	Albedo	Razão de Bowen	Rugosidade do solo	Albedo	Razão de Bowen	Rugosidade do solo	Albedo	Razão de Bowen	Rugosidade do solo	Albedo	Razão de Bowen	Rugosidade do solo
0° - 30°	0,18	0,46	0,178	0,18	0,73	0,178	0,17	0,73	0,028	0,14	0,38	0,041
30° - 60°	0,18	0,46	0,188	0,18	0,73	0,188	0,17	0,73	0,031	0,14	0,38	0,045
60° - 90°	0,18	0,46	0,15	0,18	0,73	0,15	0,17	0,73	0,02	0,14	0,38	0,03
90° - 120°	0,18	0,46	0,15	0,18	0,73	0,15	0,17	0,73	0,02	0,14	0,38	0,03
120° - 150°	0,18	0,46	0,15	0,18	0,73	0,15	0,17	0,73	0,02	0,14	0,38	0,03
150° - 180°	0,18	0,46	0,19	0,18	0,73	0,19	0,17	0,73	0,032	0,14	0,38	0,045
180° - 210°	0,18	0,46	0,234	0,18	0,73	0,234	0,17	0,73	0,047	0,14	0,38	0,065
210° - 240°	0,18	0,46	0,158	0,18	0,73	0,157	0,17	0,73	0,024	0,14	0,38	0,035
240° - 270°	0,18	0,46	0,12	0,18	0,73	0,113	0,17	0,73	0,025	0,14	0,38	0,037
270° - 300°	0,18	0,46	0,176	0,18	0,73	0,176	0,17	0,73	0,036	0,14	0,38	0,05
300° - 330°	0,18	0,46	0,237	0,18	0,73	0,237	0,17	0,73	0,07	0,14	0,38	0,09
330° - 360°	0,18	0,46	0,19	0,18	0,73	0,19	0,17	0,73	0,031	0,14	0,38	0,045



6. ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS

6.1 DADOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS

Para a análise dos dados de superfície, foram obtidos dados horários de temperatura média do ar (T , °C), umidade relativa do ar (UR, %), pressão atmosférica (P_r , mBar), precipitação (p , mm), velocidade do vento (u , m/s), direção do vento (°) e radiação solar (R_s , MJ/m²) de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a aproximadamente 4,60 Km do ponto central da região de análise dos dados modelados (detalhes no **Capítulo 5**), denominada de A634 – Estação Vila Velha. A distância entre a estação meteorológica e o ponto central do estudo atende as orientações de órgãos estaduais do Brasil, que seguem as recomendações gerais da U.S. Environmental Protection Agency (EPA), que estabelece uma distância máxima de 50 km entre os pontos. Ainda, foram obtidos dados sobre a cobertura de nuvens da estação meteorológica localizada no aeroporto de Vitória a uma distância de aproximadamente 23,10 Km do domínio de análise.

Para o ar superior, foram utilizados dados apresentados diretamente do código METAR (referentes à estação do Aeroporto de Vitória), disponibilizados pela REDEMET. Foram analisadas as variáveis temperatura (°C), temperatura do ponto de orvalho (T_o , °C) velocidade do vento (u , m/s) e direção do vento (°).

Tanto os dados meteorológicos observados de superfície, quanto os de ar superior, foram obtidos para o período de 2019-2021, seguindo as recomendações da EPA, que sugere a utilização de uma série histórica mais recente para um período mínimo de 3 anos.

De acordo com as recomendações da EPA, para que um ano de dados meteorológicos medidos possa ser considerado para estudos de dispersão atmosférica, é necessário que se tenha 4 trimestres consecutivos com uma porcentagem de dados medidos válidos superior a 90%. Tal análise deve ser aplicada para cada variável específica.

Diante do exposto, a análise da disponibilidade dos dados observados para as variáveis de interesse e período analisado (2019-2021) para a estação de Vila Velha e do aeroporto de Vitória, incluindo os dados de sondagem superior, está apresentada na **Tabela 6.1-1** e **6.1-2**, respectivamente.

Tabela 6.1-1: Análise da disponibilidade de dados meteorológicos observados de superfície (Estação A634) – Vila Velha (ES) (2019-2021).

Ano	Trimestre	% de dados válidos - Superfície							
		Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)	Pressão (mBar)	Precipitação (mm)	Direção do vento (°)	Velocidade do vento (ms ⁻¹)	Radiação solar (Whm ⁻²)	Opacidade (Décimos)
2019	1º Trimestre	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,68%	99,68%	100,00%	88,89%
	2º Trimestre	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,40%	99,40%	100,00%	92,67%
	3º Trimestre	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	74,55%	74,55%	100,00%	100,00%
	4º Trimestre	68,89%	68,89%	68,84%	68,61%	68,48%	68,48%	68,70%	100,00%
Total anual		92,16%	92,16%	92,15%	92,09%	85,41%	85,41%	92,11%	95,43%
2020	1º Trimestre	76,97%	76,97%	76,97%	76,97%	76,65%	76,65%	76,97%	100,00%
	2º Trimestre	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	3º Trimestre	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	89,13%
	4º Trimestre	99,64%	99,64%	99,64%	99,64%	99,59%	99,59%	99,64%	100,00%
Total anual		94,18%	94,18%	94,18%	94,18%	94,09%	94,09%	94,18%	97,27%
2021	1º Trimestre	96,11%	96,11%	96,11%	96,11%	92,82%	96,11%	96,11%	100,00%
	2º Trimestre	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	89,38%
	3º Trimestre	45,47%	45,47%	45,47%	45,47%	45,47%	45,47%	45,47%	75,72%
	4º Trimestre	47,33%	47,33%	47,33%	47,33%	47,33%	47,33%	47,33%	66,67%
Total anual		71,82%	71,82%	71,82%	71,82%	71,02%	71,82%	71,82%	82,83%

Tabela 6.1-2: Análise da disponibilidade de dados meteorológicos observados de ar superior (Estação Aeroporto de Vitória) - Vitória (ES) (2019-2021).

Ano	Trimestre	% de dados válidos - Ar superior			
		Temperatura (°C)	Temperatura do ponto de orvalho (%)	Direção do vento (°)	Velocidade do vento (ms ⁻¹)
2019	1º Trimestre	97,78%	97,78%	97,78%	97,78%
	2º Trimestre	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
	3º Trimestre	92,39%	92,39%	92,39%	92,39%
	4º Trimestre	98,91%	98,91%	98,91%	98,91%
Total anual		97,26%	97,26%	97,26%	97,26%
2020	1º Trimestre	74,73%	74,73%	74,73%	74,73%
	2º Trimestre	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	3º Trimestre	52,17%	52,17%	52,17%	52,17%
	4º Trimestre	94,57%	94,57%	94,57%	94,57%
Total anual		55,46%	55,46%	55,46%	55,46%
2021	1º Trimestre	97,78%	97,78%	97,78%	97,78%
	2º Trimestre	93,14%	93,14%	93,14%	93,14%
	3º Trimestre	76,09%	76,09%	76,09%	76,09%
	4º Trimestre	44,57%	44,57%	44,57%	44,57%
Total anual		77,81%	77,81%	77,81%	77,81%

Considerando as recomendações da EPA, mencionadas anteriormente, para os dados de superfície, nenhum dos anos analisados pode ser considerado para estudos de dispersão atmosférica, uma vez que a porcentagem de dados medidos é inferior a 90% por 4 trimestres consecutivos em todos os anos. Já para os dados de ar superior, apenas o ano de 2019 pode ser considerado para estudos para estudos de dispersão atmosférica.

6.1.1 Triagem dos dados meteorológicos observados

Considerando as recomendações da EPA, os dados meteorológicos devem passar por alguns critérios de triagem (**Tabela 6.1.1-1**) onde deve-se escolher um conjunto de dados de forma aleatória com o objetivo de identificar se os valores medidos estão dentro dos padrões esperados para o local de estudo e também se não há nenhuma inconsistência nos dados medidos. Para evitar erros em análises posteriores, neste presente estudo, os critérios de triagem foram aplicados para todos os dados meteorológicos de superfície medidos na estação A634 (**Tabela 6.1.1-1**).

Tabela 6.1.1-1 - Triagem dos dados meteorológicos dados meteorológicos observados de superfície (Estação A634) – Vila Velha (ES) (2019-2021).

Variável	Critério de triagem	Porcentagem de dados que não passaram no respectivo critério de triagem
Velocidade do vento	< 0 ou > 25 m/s	0,00 %
	Não varia mais de 0,1 m/s por 3 horas consecutivas	0,12%
	Não varia mais de 0,5 m/s por 12 horas consecutivas	0,00 %
Direção do vento	< 0 ou > 360 °	0,00%
	Não varia mais de 1 ° por mais de 3 horas consecutivas	0,02%
	Não varia mais de 10 ° por mais de 18 horas consecutivas	0,00 %
Temperatura	É maior que o recorde máximo local	0,00 %
	É menor que o recorde mínimo local	0,00 %
	Varia mais de 5,0 °C com relação ao horário anterior	0,04%
	Não varia mais que 0,5 °C por 12 horas consecutivas	0,00 %
Precipitação	> 25 mm hora *	0,06%
	> 100 mm dia *	0,27 %
	< 30 mm em três meses *	0,00 %
Pressão	> 1060 mb (nível do mar)	0,00 %
	< 940 mb (nível do mar)	0,00 %
	Varia em mais de 6 mb em três horas	0,00 %
Radiação	> 0 no período da noite	0,00 %
	Maior que o máximo possível para a latitude	0,00 %

*Valores adotados de acordo com a climatologia do local.

De maneira geral, a quase totalidade dos dados respeita os critérios pré-estabelecidos. A pequena porcentagem de dados que não está dentro dos critérios de triagem foi retirada de análises posteriores. É importante salientar que para essa análise, foram considerados apenas os dias com 100% de dados medidos, sendo desconsiderados os demais na realização da triagem.

6.1.2 Caracterização e análise da representatividade dos dados meteorológicos observados

Nas recomendações da EPA, não existem critérios quantitativos para determinar a representatividade de dados meteorológicos observados de uma determinada região. Fica, portanto, a critério do especialista, analisar a representatividade ou não dos dados. Diante desses aspectos, nesse tópico apresenta-se uma análise da representatividade dos dados meteorológicos observados da estação A634.

Para verificar a representatividade dos dados optou-se pela análise do comportamento mensal das variáveis, que foram comparados com a climatologia do local, de acordo com as recomendações da EPA. Para análise da climatologia local é necessário um período mínimo de dados de 30 anos.

Uma vez que a estação A634 está operante apenas desde 2007, os dados para análise da climatologia local foram obtidos da estação meteorológica convencional pertencente ao INMET, localizada em Vitória, que está a uma distância de aproximadamente 18,50 Km da estação A634. O período de dados considerado foi de 1990-2001.

A comparação dos dados observados para o período de 2019-2021 com relação à climatologia local está apresentada na **Figura 6.1.2-1**.

Em função da baixa disponibilidade de dados de radiação solar global e direção do vento, a análise para essas variáveis será apresentada nos tópicos a seguir.

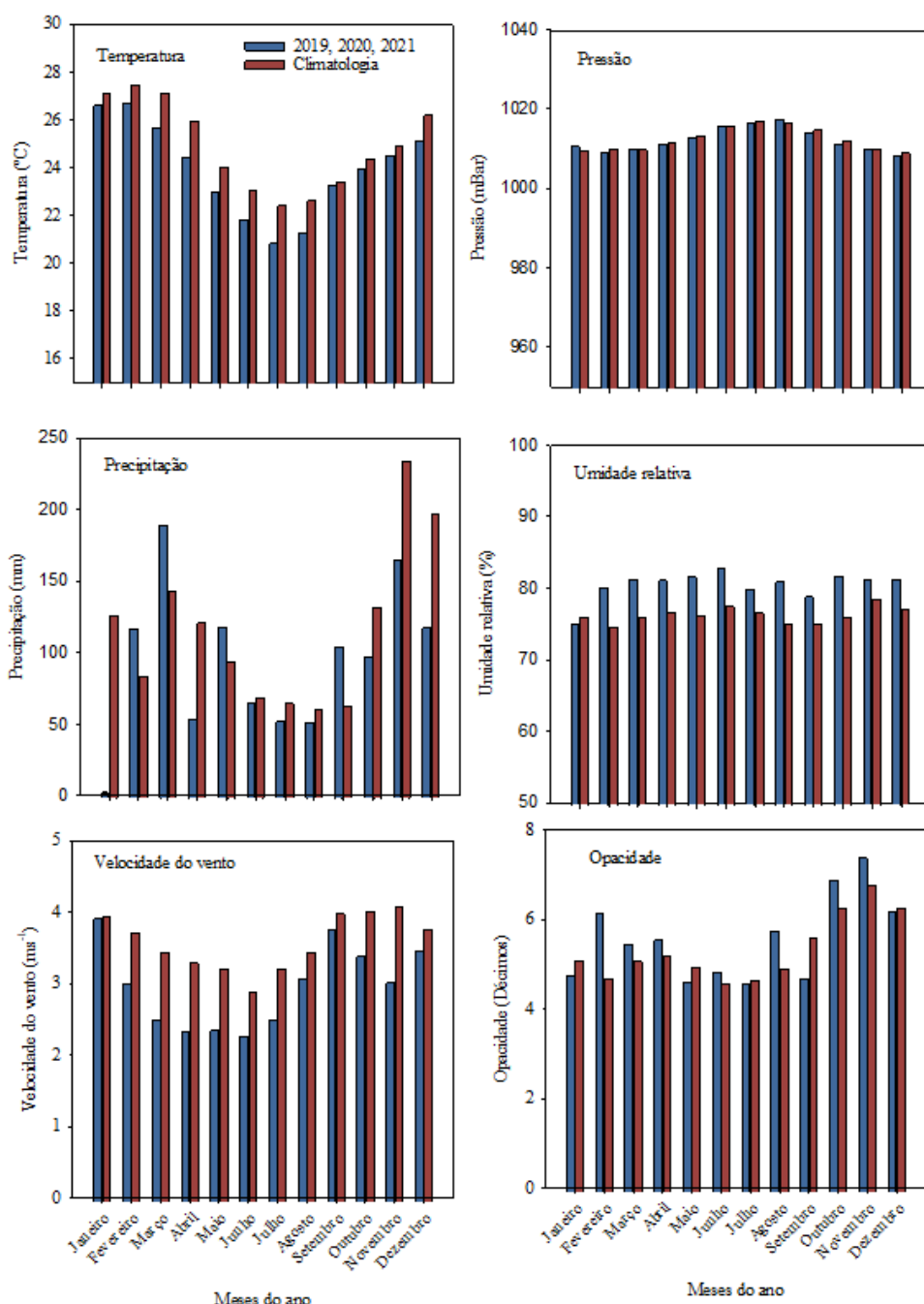


Figura 6.1.2-1: Ciclo anual da temperatura média do ar, pressão atmosférica, precipitação, umidade relativa, velocidade do vento e opacidade para os anos de 2019, 2020 e 2021 e para climatologia. Dados provenientes da estação meteorológica automática localizada no município de Vila Velha/ES e da estação meteorológica convencional localizada no município de Vitória/ES, respectivamente.

De maneira geral, os dados observados para os anos de 2019-2021 representam bem a variação intra-anual das variáveis e além disso, seguem o padrão da climatologia local, o que indica boa representatividade dos dados.

Para a temperatura, os dados estão de acordo com a climatologia local, com menores valores nos meses de inverno e maiores valores no verão. Em geral, a temperatura medida na estação de Vila Velha é ligeiramente menor do que a climatologia obtida da estação de Vitória. Fator que se justifica, além da distância entre as estações, pelas diferenças da cobertura do solo no entorno de cada estação, enquanto

a estação de Vila Velha está em uma região mais rural, a estação de Vitória está em uma região mais urbanizada.

Para a pressão, os dados seguem o que o padrão da climatologia local, com uma variação baixa ao longo dos meses do ano, indicando boa qualidade das medidas. Já para a precipitação, os dados apresentam maior discrepância com relação à climatologia local, o que é esperado visto que a precipitação é a variável que apresenta maior variabilidade inter-anual. Embora exista uma diferença com relação à climatologia, os dados para os anos de 2019, 2020 e 2021, com exceção do mês de janeiro, seguem o padrão de chuvas observado no sudeste brasileiro, com maiores acumulados no verão e menores acumulados no inverno.

Chama a atenção, como mencionado anteriormente, a diferença da precipitação no mês de janeiro para os anos de 2019-2021 com relação à climatologia local. Esta diferença ocorre, pois os dados de precipitação para os anos de 2020 e 2021 não foram considerados na análise em função da baixa disponibilidade. Enquanto isso, o mês de janeiro de 2019 apresentou uma anomalia negativa de precipitação, o que também foi registrado em estações próximas e também foi descrito no boletim trimestral do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2019).

Para umidade relativa e nebulosidade os dados apresentam boa concordância com a climatologia local. Destaca-se que a umidade relativa medida para a estação de Vila Velha é quase sempre maior que a medida pela estação de Vila Velha. Mais uma vez, fator que se deve à localização das estações, em áreas mais arborizadas, a umidade relativa tende a ser maior do que em áreas urbanas.

Por fim, a velocidade do vento também se aproxima da climatologia local considerando a variação anual da mesma. As diferenças em termos de valores absolutos ocorrem em função da diferença das regiões entorno às estações.

Embora os dados meteorológicos medidos para os anos de interesse tenham se aproximado bastante da climatologia local e sido considerados representativos da região de análise, eles não foram utilizados para o presente estudo de dispersão atmosférica em função da baixa disponibilidade de dados (**Tabelas 6.1-1 e 6.1-2**), não atendendo as recomendações da EPA descritas anteriormente para serem utilizados em estudos de dispersão atmosférica de poluentes.

Ainda que os dados meteorológicos observados não tenham sido utilizados, a boa representatividade dos dados é importante para análises posteriores, visto que estes são tomados como base para a análise de dados meteorológicos modelados, como descrito a seguir.

6.2 DADOS METEOROLÓGICOS MODELADOS

6.2.1 Aquisição dos dados meteorológicos modelados

Com base nas recomendações de órgãos ambientais estaduais do Brasil, optou-se pela utilização dos dados do modelo meteorológico Weather Research and Forecasting Model (WRF – v.4.2.2, 2022) e Mesoscale Model Interface (MMIF – v.4.0, 2022) (programa que converte os dados meteorológicos prognósticos em um formato adequado para aplicações de modelagem de dispersão - User's Manual THE MESOSCALE MODEL INTERFACE PROGRAM (MMIF)) para o presente estudo de dispersão atmosférica. Os dados utilizados foram adquiridos da Lakes Environmental, empresa sediada no Canadá.

O modelo WRF é um modelo de prognóstico meteorológico, não hidrostático e que utiliza escala sigma, este modelo foi desenvolvido para simular ou prever a circulação atmosférica de mesoescala e de escala regional, sendo amplamente utilizados em estudos de dispersão de poluentes atmosféricos (FEYZINEJAD, et al., 2018; FLORES-JÍMEZ et al., 2019; FEAM, 2019; SNOUN et al., 2019).

Utilizou-se um alinhamento de 3 grades neste presente estudo (**Figura 6.2.1-1**). A grade 1 foi configurada com uma resolução horizontal de 27 km e a grade 2 com uma resolução de 9 km. Por fim, a grade 3 possui uma resolução final de 3 km (Ponto central: 20°25'57.71"S / 40°26'17.20"O).



Figura 6.2.1-1: Grades alinhadas utilizadas pela Lakes Environmental para extração dos dados simulados pelo WRF (3 km, 9 km e 27 km, com resolução de 0,5°).

Como condições de iniciais e de fronteira para as simulações com o modelo WRF, utilizaram-se dados da análise do *Global Forecast System* do *National Centers for Environmental Prediction* (GFS-NCEP), que possuem resolução espacial de 0,5° e frequência temporal de 6 horas (00, 06, 12, 18Z).

Os esquemas de parametrizações físicas utilizadas no processamento do WRF, estão apresentados no **Tabela 6.2.1-1**.

Tabela 6.2.1-1: Opções físicas utilizadas para a modelagem do WRF.

WRF Opções Físicas	
Tipo	Opção utilizada
Microfísica	WRF <i>Single-moment 3-class scheme</i>
	mp_physics = 3
Radiação de onda longa	RRTMG <i>Longwave scheme</i>
	ra_lw_physics = 4
Radiação de onda curta	RRTMG <i>Shortwave scheme</i>
	ra_sw_physics = 4

WRF Opções Físicas	
Tipo	Opção utilizada
Camada superficial	<i>Revised MM5 scheme</i>
	sf_sfclay_physics = 1
Superfície da terra	<i>Unified Noah Land Surface model</i>
	sf_surface_physics = 2
Camada limite planetária	<i>Yonsei University (YSU) scheme</i>
	bl_pbl_physics = 1
Parametrização cumulus	Kain-Fritsch
	cu_physics = 1

6.2.2 Análise estatística dos dados meteorológicos modelados

Para analisar a qualidade das simulações do modelo WRF foi feita a validação dos dados modelados através da comparação com os dados observados para o período 2019-2021. Nessa etapa analisou-se as variáveis temperatura do ar, pressão atmosférica, precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar, opacidade e temperatura do ponto de orvalho.

As estatísticas utilizadas para analisar o desempenho do modelo foram: raiz do quadrado médio do erro (RQME), índice BIAS, índice de concordância de Wilmott (d) e índice de desempenho (índice-c) (Equação 6.2.2-1 a 6.2.2-4).

$$RQME = \left[\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / n \right]^{0,5} \quad \text{Equação 6.2.2-1}$$

$$BIAS = \left(\sum_{i=1}^n E_i - \sum_{i=1}^n O_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \quad \text{Equação 6.2.2-2}$$

$$d = 1 - \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \right] / \left[\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| * |O_i - \bar{O}|)^2 \right] \right\} \quad \text{Equação 6.2.2-3}$$

$$\text{índice} - c = \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) * (E_i - \bar{E}) / \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \right] \right\} * d \quad \text{Equação 6.2.2-4}$$

Em que:

E_i - Estimativa do modelo para cada variável;

O_i - Variável observada;

$\bar{E}_i$ - Média dos valores de cada variável estimada pelo modelo;
 $\bar{O}_i$ - Média dos valores observados;
 n - números de observações.

O critério para a interpretação do índice-c é: > 0,85: excelente; 0,76 a 0,85: muito bom; 0,66 a 0,75: bom; 0,61 a 0,65: moderado; 0,51 a 0,60: fraco; 0,41 a 0,50: muito fraco; e ≤ 0,40: péssimo (CAMARGO e SENTELHAS, 1997; MONTEIRO e MARTINS, 2019).

Ainda, os dados de intensidade e direção do vento foram validados através da comparação da rosas-dos-ventos, construídas com dados horários das simulações e observações.

As estatísticas calculadas para cada variável de interesse estão apresentadas na **Tabela 6.2.2-1**.

Tabela 6.2.2-1: Estatísticas calculadas para analisar o desempenho do modelo WRF.

Superfície				
Variável	RQME	BIAS	d	Índice-c
Temperatura	1,688	-0,003	0,993	0,899
Pressão	2,381	0,002	1,000	0,978
Precipitação	1,396	0,176	0,207	0,022
Umidade relativa	8,781	-0,021	0,984	0,766
Velocidade do vento	1,699	0,256	0,846	0,534
Radiação solar	7,457	0,255	0,673	0,415
Opacidade	5,151	-0,144	0,974	0,219
Ar superior				
Variável	RQME	BIAS	d	Índice-c
Temperatura	18,18	-0,001	0,999	0,822
Temperatura do ponto de orvalho	21,59	0,023	0,834	0,593
Velocidade do vento	32,374	-0,125	0,726	0,392

Para os dados de superfície, o modelo apresentou desempenho excelente em simular as variáveis temperatura e pressão ($c > 0,85$) e desempenho muito bom na simulação da umidade relativa ($0,76 < c < 0,85$). Destaca-se os altos valores do índice de concordância de Wilmott (d) (~1) para a temperatura e pressão, que indicam concordância quase que perfeita entre dados simulados e observados. Ainda, destaca-se os valores do índice BIAS muito próximo a 0 para essas variáveis, o que indica que não há uma tendência de super ou subestimativa nas simulações do modelo WRF.

Para os dados de precipitação e opacidade, o desempenho do modelo foi considerado péssimo ($c < 0,40$). Com relação à precipitação, o desempenho é esperado e já foi observado por outros autores, uma vez que esta é uma das variáveis mais difíceis de ser simulada por modelos, já que depende de diversos esquemas de parametrizações de processos dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera. Concomitantemente, a precipitação pode variar mais significativamente entre um horário e outro do que as demais variáveis analisadas, fator que não é facilmente identificado por simulações de modelos atmosféricos. Entretanto, apesar da dificuldade do modelo em simular essa variável em escala horária, as simulações do modelo representaram bem a climatologia local quando se analisam os dados em escala mensal, como descrito no item a seguir.

Para a radiação, houve uma tendência de superestimativa (BIAS=0,255) por parte do modelo WRF e o desempenho foi considerado fraco. Entretanto, os dados modelados representaram bem a ciclo anual dessa variável. Além disso, a baixa disponibilidade de dados observados e a necessidade da calibração

periódica dos instrumentos que medem a radiação são fatores que influenciaram no desempenho do modelo.

Para os dados de ar superior o desempenho do modelo WRF foi muito bom e moderado nas simulações para temperatura e temperatura do ponto de orvalho, respectivamente. O alto valor de RQME se deu pela maior variação dessas variáveis em altos níveis e pelo fato de os dados observados estarem a uma maior distância do ponto central de análise. Ainda, o modelo foi péssimo na simulação da velocidade do vento, fator esperado, considerando a distância entre o ponto centro central da análise e a estação em que foram medidos os dados observados, sendo essa uma região que apresenta maior turbulência.

6.2.3 Caracterização e análise da representatividade dos dados meteorológicos modelados

Além da análise estatística apresentada no item anterior, optou-se por comparar os comportamentos mensais dos dados modelados ao longo do ano para os anos de 2019, 2020 e 2021 com os dados observados e também com a climatologia local, com exceção dos dados de radiação, que não continham medições para a climatologia (**Figura 6.2.3-1**).

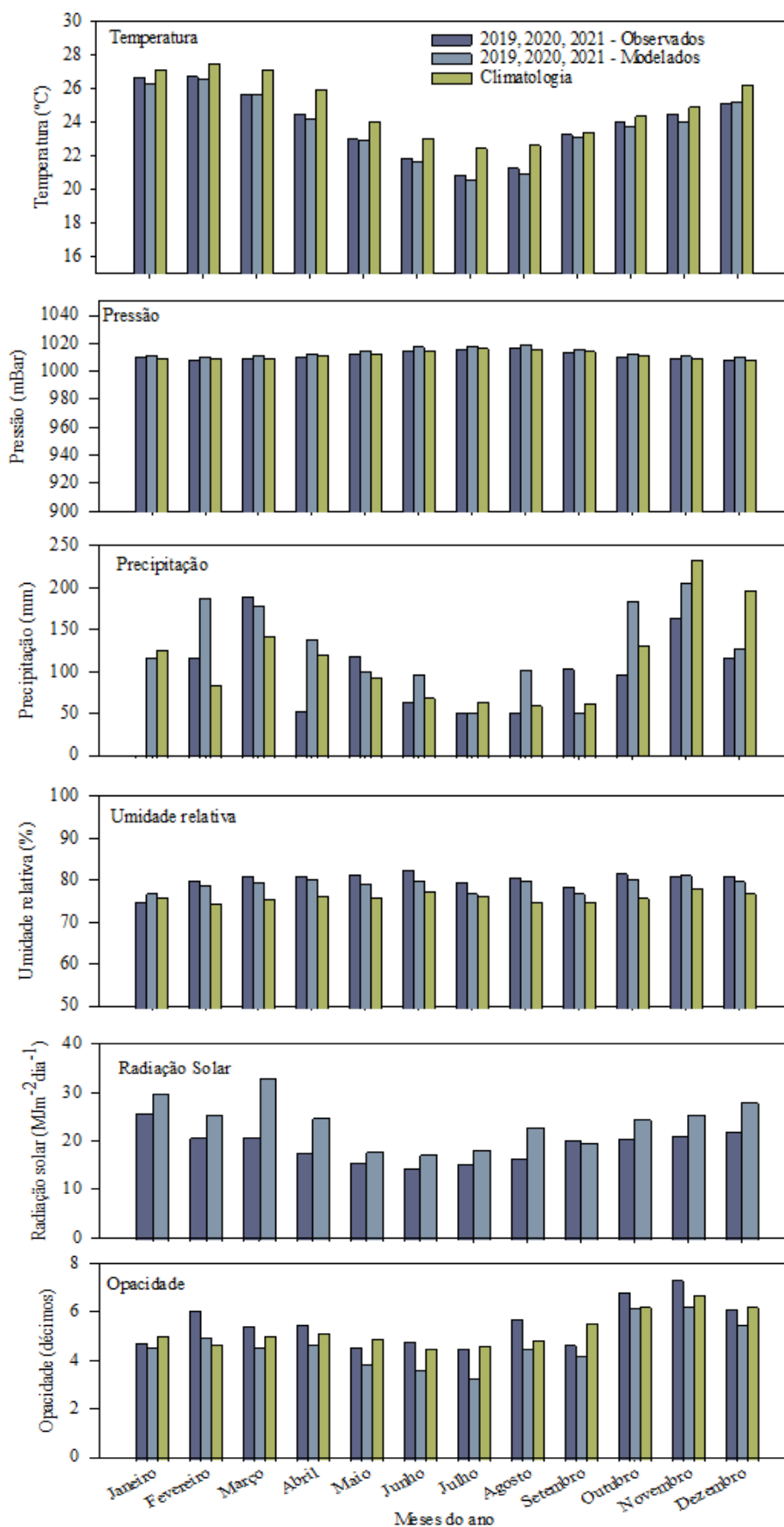


Figura 6.2.3-1: Comparação entre dados observados e modelados para os o período de 2019-2021 e climatologia local.

Para temperatura, como demonstrado pelas estatísticas, o modelo WRF foi excelente na representação dos dados. Pode observar na **Figura 6.2.3-1** que os dados modelados e observados estão bem próximos, com diferença menor que 1,0 °C. Além disso, os dados representaram bem a climatologia local. O mesmo padrão foi observado para os dados de pressão, com dados modelados e observados apresentando uma diferença mínima entre si e se aproximando muito da climatologia local.

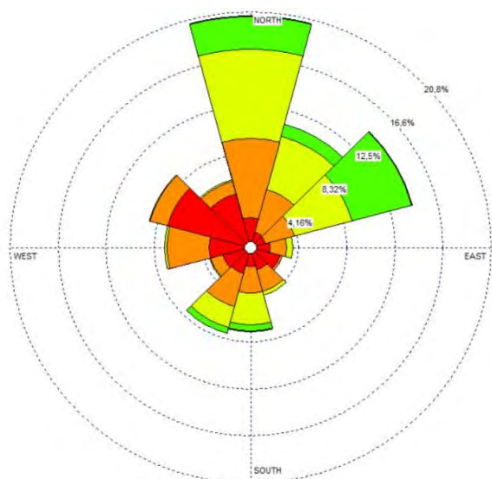
Para a umidade, os dados modelados também foram fidedignos às observações e à climatologia local. Apresentando o mesmo padrão dos dados observados (maiores valores em comparação à climatologia local), o que já foi discutido anteriormente.

Para as a variável precipitação, embora o baixo desempenho estatístico do modelo, as simulações representaram bem a climatologia local, com acumulados próximos aos dados históricos. Aqui, vale ressaltar que a baixa disponibilidade dos dados observados é um fator preponderante nas diferenças entre valores observados e modelados, visto que, diferente das demais variáveis, como temperatura e pressão, a precipitação é avaliada através dos acumulados e não pela média.

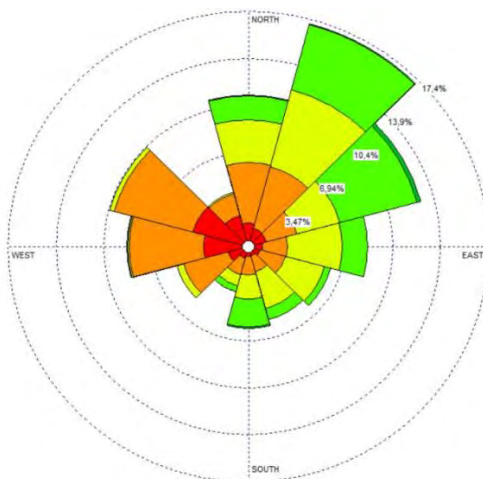
Embora o modelo tenha apresentado uma superestimativa para a radiação solar, especialmente para o mês de março, o modelo representou bem a variação anual da radiação de acordo com o que se espera para a latitude do estudo. Ainda, o modelo se mostrou mais eficaz na estimativa da radiação para os meses de inverno, assim como demonstrado por Florencio (2021) e Fagundes (2021), fator associado à limitação do modelo em estimar a radiação em condições de maior nebulosidade.

Para a opacidade, o mesmo padrão da precipitação é observado: baixo desempenho estatístico das simulações, mas boa representatividade dos dados em escala mensal. Os dados seguem o que é esperado para a região analisada, menores valores de opacidade nos meses de inverno e maiores valores os meses de verão.

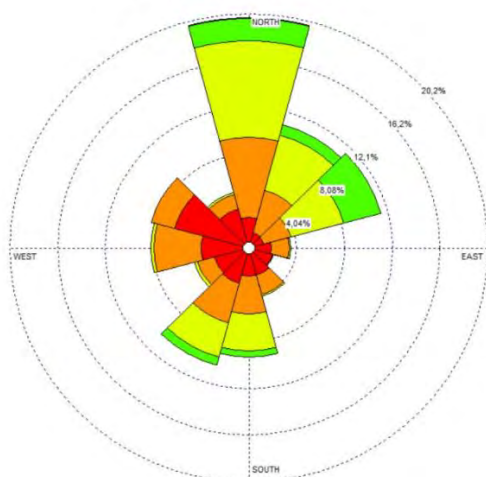
Nas **Figura 6.2.3-2** e **6.2.3-3** está apresentada a rosa dos ventos para os dados modelados observados em uma escala anual e mensal, respectivamente.



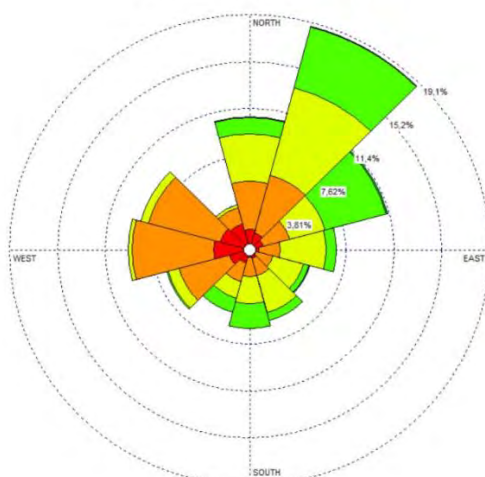
Observado - 2019



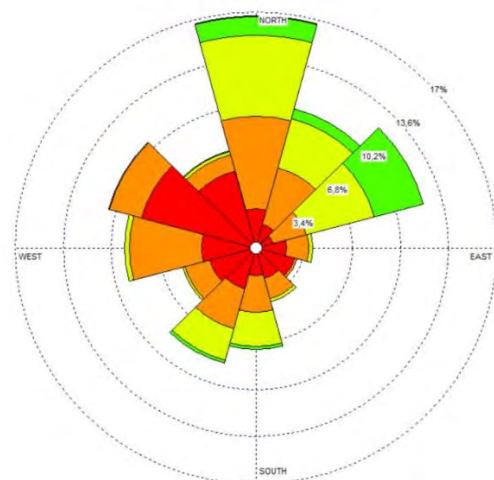
Modelado - 2019



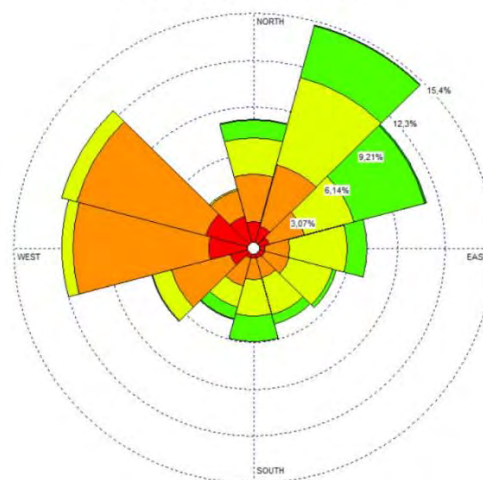
Observado - 2020



Modelado - 2020



Observado - 2021



Modelado - 2021

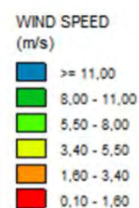


Figura 6.2.3-2: Rosa dos ventos referente aos anos de 2019, 2020 e 2021 para os dados observados e modelados.

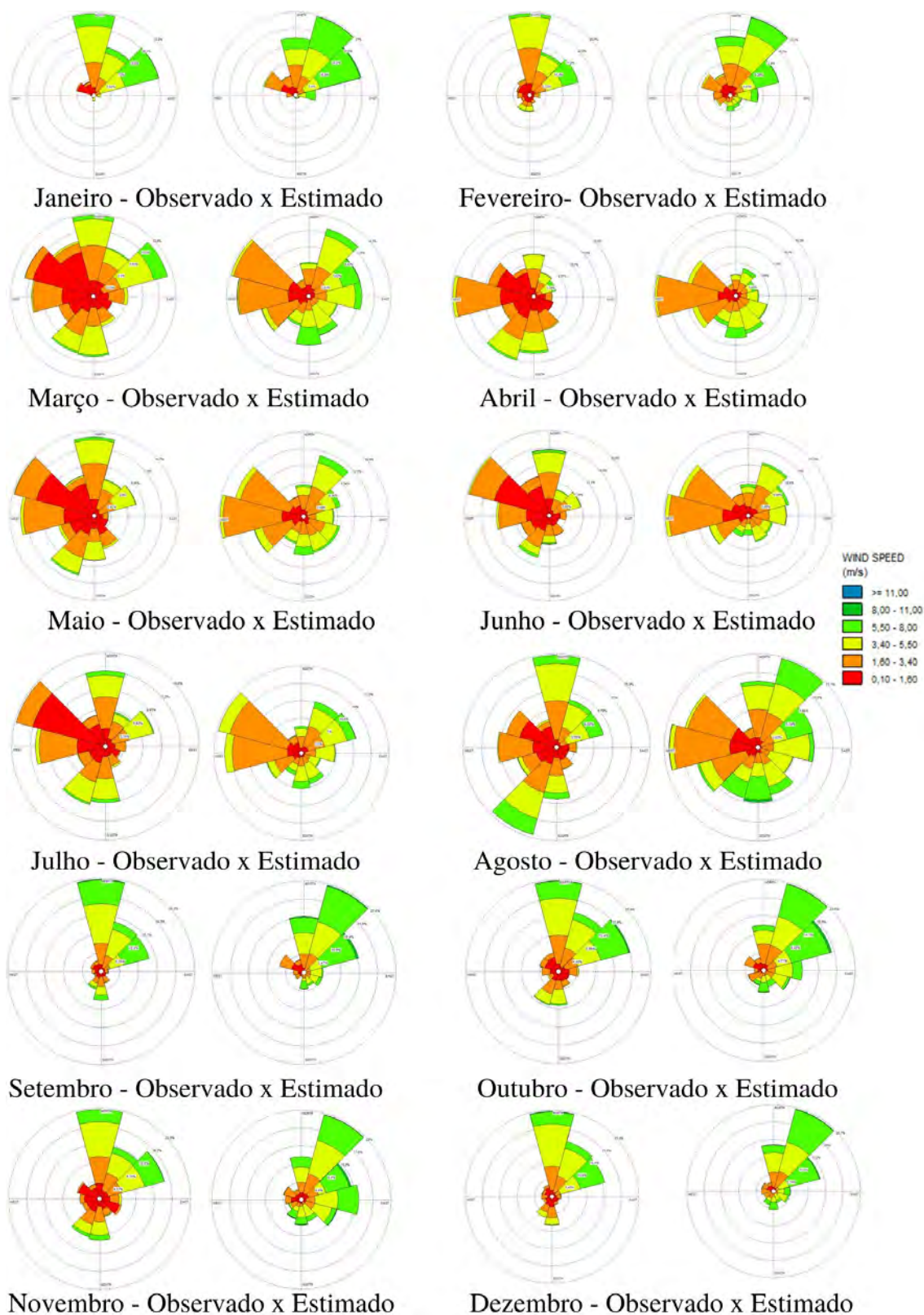


Figura 6.2.3-2: Rosa dos ventos para cada mês dos anos 2018, 2019 e 2020, considerando os dados observados e modelados.

O modelo WRF foi capaz de representar bem o padrão dos ventos na região de estudo, com ventos predominantes de norte e nordeste, assim como descrito por Correa (2020). A predominância de ventos de nordeste se dá especialmente em função do efeito de Coriolis e sua influência na ASAS, que

associado a outros fatores locais, proporciona a ocorrência de ventos nesse quadrante, assim como observado por Mattiuzzi e Marchioro (2012).

Ainda, o modelo WRF foi capaz de identificar bem a variação da direção do vento entre os anos, cita-se como exemplo o ano de 2021, em que os dados observados indicaram uma maior ocorrência de ventos de noroeste, o que também foi identificado pelo modelo.

Além de simular bem a variação da direção e velocidade do vento entre os anos, o modelo WRF foi capaz de simular com eficiência a variação sazonal das variáveis supracitadas (**Figura 6.2.3-2**). Com base nas simulações e observações, é possível identificar março como o mês de transição na direção do vento, com diminuição da frequência de ventos de norte e nordeste e aumento da frequência de ventos de noroeste e sudoeste, padrão que perdura até agosto, o que corrobora com os resultados observados por Ramos et al. (2021), que associa essa mudança no padrão dos ventos em função da maior incidência de frentes frias nessa época do ano.

Diante do exposto, as simulações de todas as variáveis pelo modelo WRF foram consideradas representativas da região de estudo, fator importante para a análise do estudo de dispersão apresentada a seguir.

7. CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE ADOTADAS - WRF

A atmosfera é o meio propagador dos poluentes emitidos e os movimentos atmosféricos exercem um papel determinante na frequência, duração e concentração dos poluentes a que estão expostos os possíveis receptores. A avaliação de impactos de emissões atmosféricas sobre a qualidade do ar do seu entorno exige um razoável conhecimento das condições meteorológicas de micro e meso-escala que ocorrem na área de influência das fontes emissoras.

No presente estudo foram utilizados dados meteorológicos de superfície e ar superior dos anos de 2019, 2020 e 2021 da estação Virtual processada pelo WRF, posicionado na latitude: 349.984 m E e longitude: 7.739.347 m S, inserida próximo ao ponto médio da linha férrea a ser construída, o qual, possui características com vários elementos da superfície terrestre por onde percorrerá todo o traçado da linha férrea, como descrito nos **Capítulos 4 e 5**.

7.1 DIREÇÃO E VELOCIDADE DO VENTO

A **Figura 7.1-1** apresenta a distribuição da velocidade média do vento para todas as direções nos anos de 2019, 2020 e 2021 da estação virtual, modelada pelo WRF, cuja predominância anual é Nordeste (NE), devido as influências no litoral espírito-santense sofridas pelo ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (CORREA, 2020).

É possível notar que em uma análise anual dessas médias há uma predominância das direções do vento vindo de sudeste (NE) com magnitudes médias de velocidade do vento entre 1,60 m.s⁻¹ a 3,40 m.s⁻¹. Na **Figura 7.1-2** é possível observar a distribuição e magnitudes do vento durante os meses do ano.

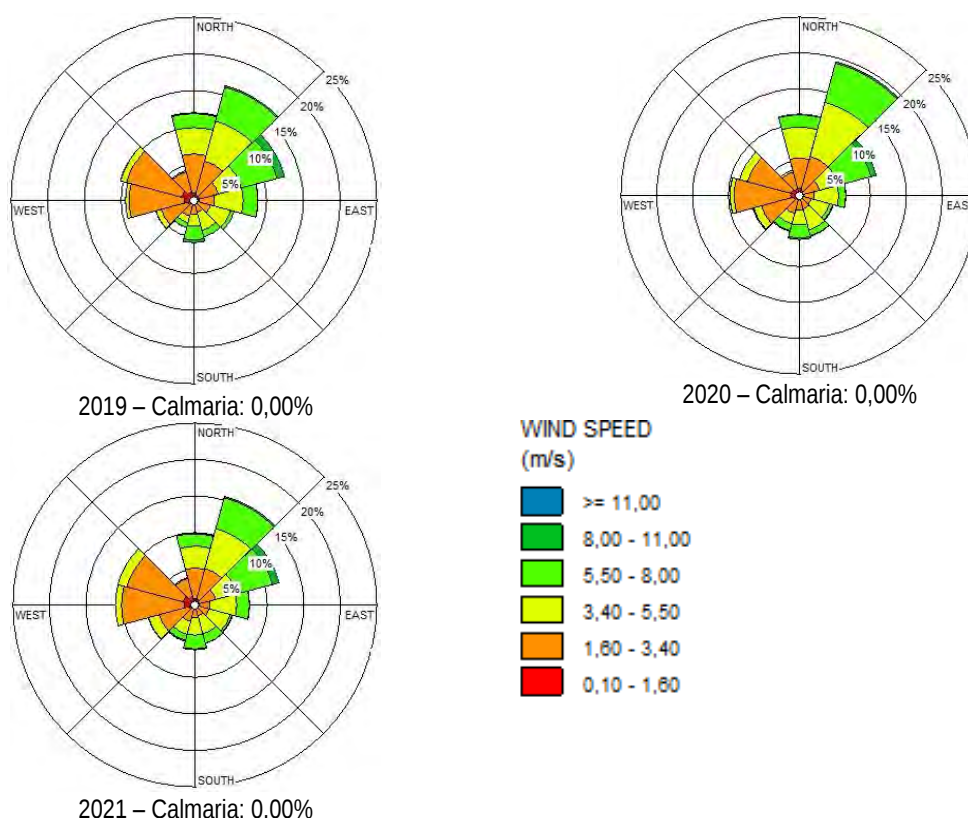
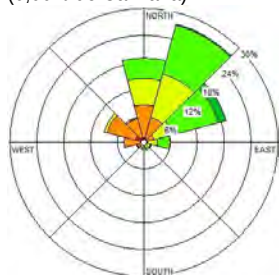
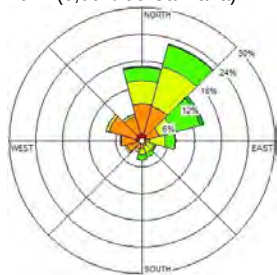


Figura 7.1-1: Rosa dos ventos referentes aos anos de 2019, 2020 e 2021 do modelo meteorológico WRF.

Janeiro – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



Fevereiro – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



Março – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



Abril – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



Mai – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



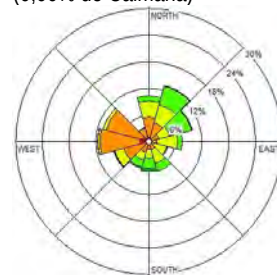
Junho – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



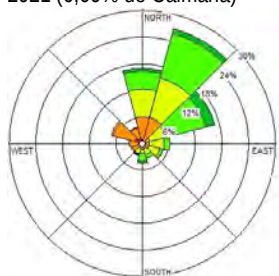
Julho – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



Agosto – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



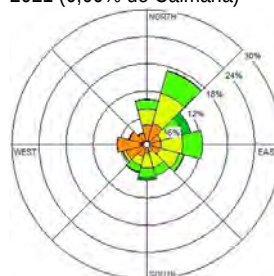
Setembro – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



Outubro – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



Novembro – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)



Dezembro – 2019, 2020 e 2021
(0,00% de Calmaria)

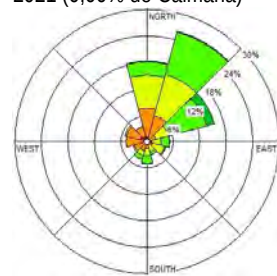


Figura 7.1-2: Distribuição da direção e intensidade de ventos para cada mês dos anos 2019, 2020 e 2021.

7.2 PRECIPITAÇÃO

A **Figura 7.2-1** contém a distribuição da precipitação acumulada durante os meses dos anos processados pelo WRF. A precipitação mínima ocorreu em janeiro de 2019 (18,29 mm), a máxima em novembro de 2021 (333,26 mm) e a média anual entre os anos foi de 129,92 mm, estando as variações e distribuições ao longo dos meses e anos, consoantes com os dados observados e disponibilizado pelo CEMADEN (2022), utilizado pelo INCAPER (2022) com cruzamento de dados observados pelo INMET, com meses mais chuvosos de outubro a abril, e períodos mais secos de abril a setembro.

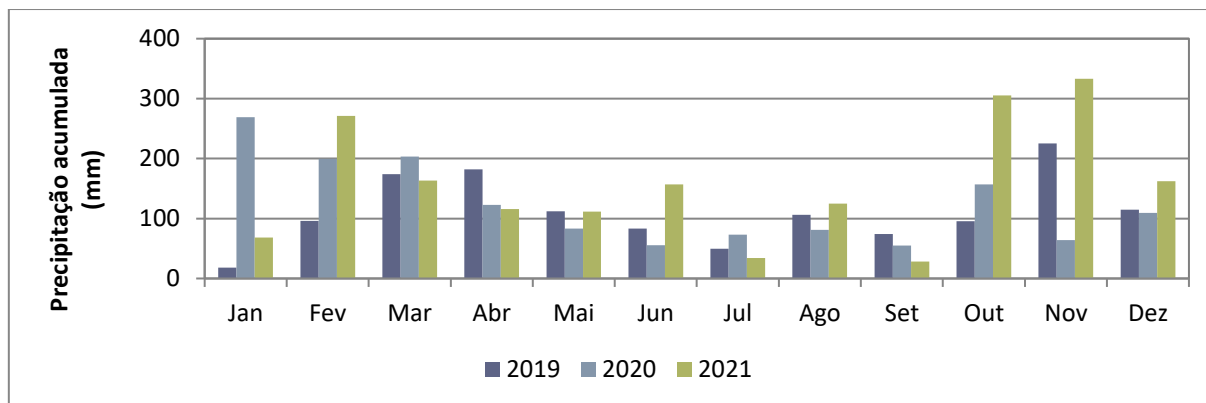


Figura 7.2-1: Distribuição da precipitação durante os meses dos anos de 2018, 2019 e 2020.

7.3 TEMPERATURA

A **Figura 7.3-1** contém a distribuição da temperatura durante os meses dos anos processados pelo WRF. A temperatura mínima ocorreu em julho de 2021 (19,81 °C), a máxima em fevereiro de 2019 (27,70 °C) e a média anual entre os anos foi de 23,77 °C. Ademais observa-se uma distribuição normal entre os anos.

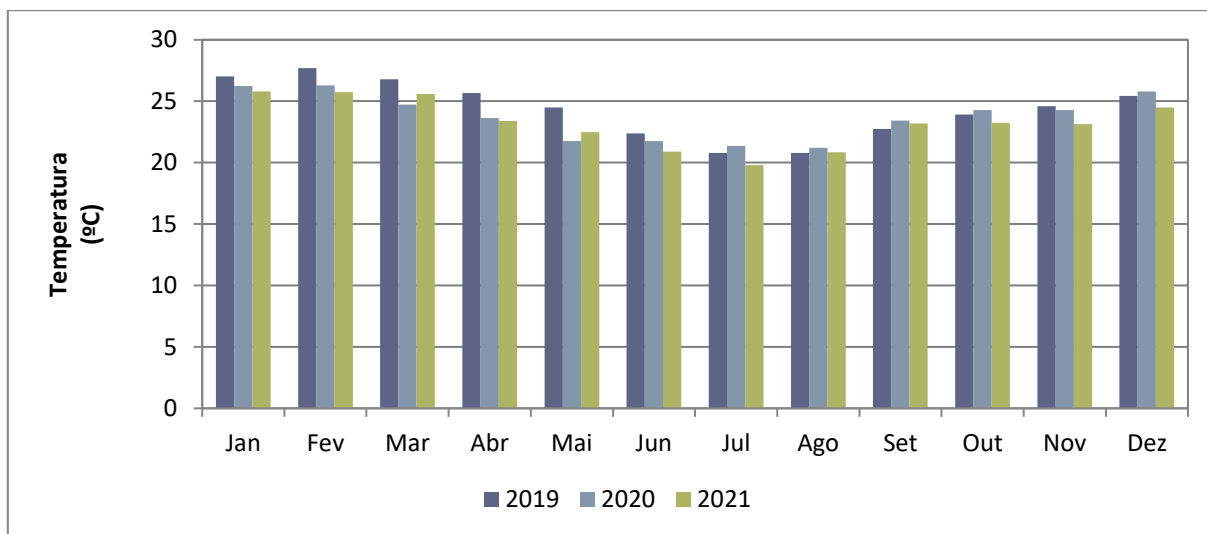


Figura 7.3-1: Distribuição da temperatura durante os meses dos anos de 2018, 2019 e 2020.

7.4 UMIDADE RELATIVA

A **Figura 7.4-1** contém a distribuição da umidade relativa durante os meses dos anos processados pelo WRF. A umidade relativa mínima ocorreu em janeiro de 2019 (74,97%), a máxima em outubro de 2021 (83,64%) e a média anual entre os anos foi de 79,54%.

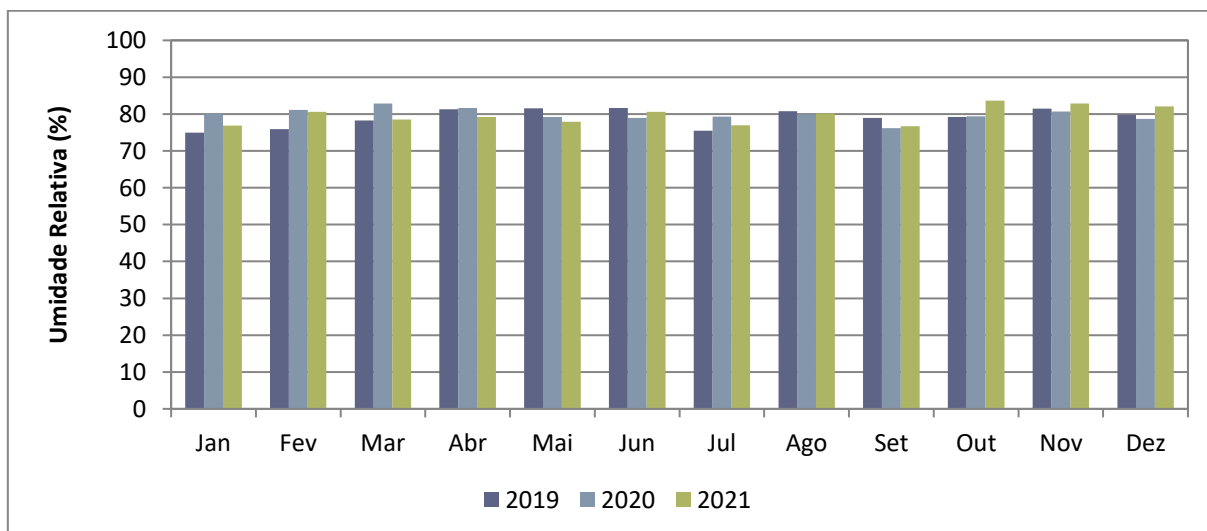


Figura 7.4-1: Distribuição da umidade relativa do ar durante os meses dos anos de 2018, 2019 e 2020.

7.5 PRESSÃO ATMOSFÉRICA

A **Figura 7.5-1** contém a distribuição da pressão atmosférica durante os meses dos anos processados pelo WRF. A pressão atmosférica mínima ocorreu em janeiro de 2020 (1009,37 mbar), a máxima em agosto de 2019 (1020,57 mbar) e a média anual entre os anos foi de 1014,22 mbar.

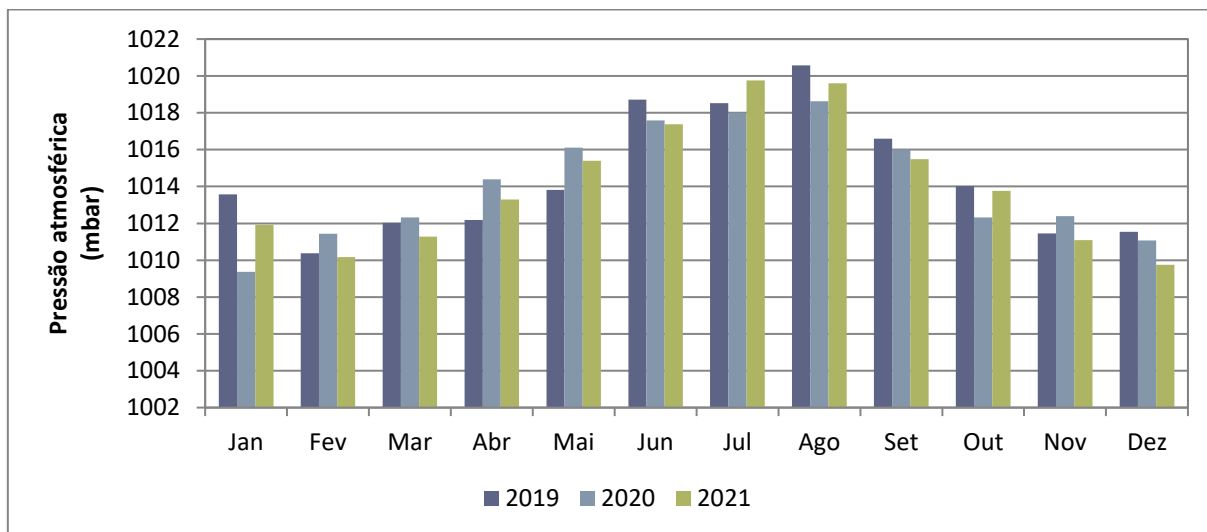


Figura 7.5-1: Distribuição da pressão atmosférica durante os meses dos anos de 2018, 2019 e 2020.

8 PARÂMETROS PROCESSADOR PELO AERMET

A seguir, a evolução dos principais parâmetros processados pelo AERMET, para os anos de 2018, 2019 e 2020.

8.1 COMPRIMENTO DE MONIN-OBUKHOV

Para descrever os níveis de turbulência na atmosfera, e desta forma sua capacidade de dispersão de poluentes, é calculado o comprimento de Monin-Obukhov (L) para determinar o grau de estabilidade atmosférica (**Figura 8.1-1**). O comprimento de Monin-Obukhov (L) pode ser fisicamente interpretado como uma altura em relação ao solo na qual a energia cinética turbulenta produzida pelas forças do empuxo térmico equivale à energia cinética turbulenta produzida por efeitos mecânicos.

Conforme evolução horária, $L > 0$ das 18h às 6h, sendo às 17h os maiores valores observados para o parâmetro (média de 615,30 m). Das 7h até às 17h, $L < 0$ a média mínima é de 126,79 m e é observada às 7h. Quando $L < 0$, a estabilidade atmosférica assume condição instável, e quando $L > 0$ assume condição atmosférica estável, sendo que condições de instabilidade atmosférica favorecem a dispersão de poluentes na atmosfera, enquanto condições de estabilidade prejudicam a dispersão de poluentes na atmosfera.

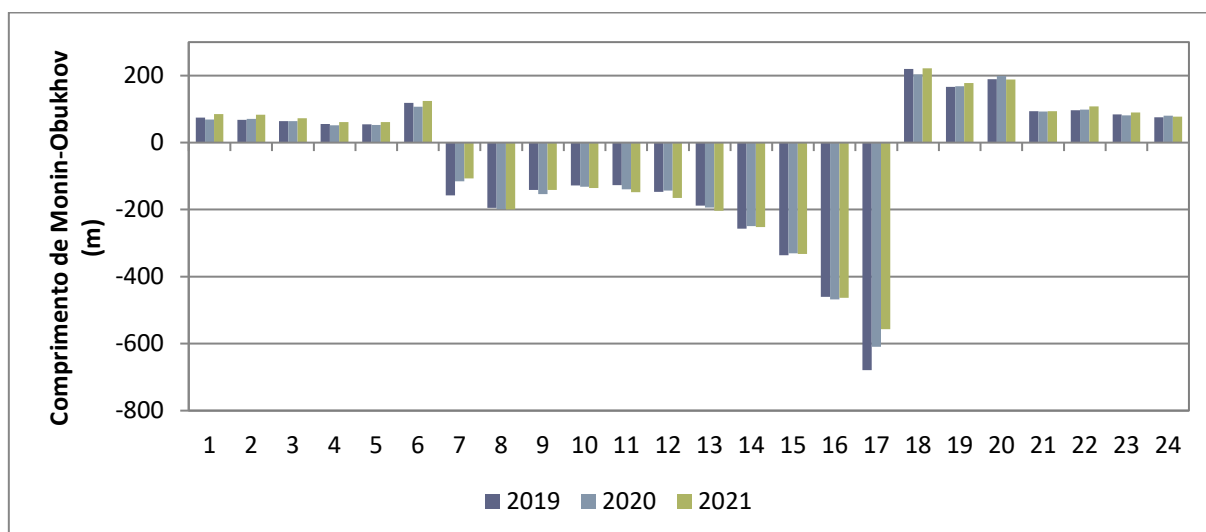


Figura 8.1-1: Dados processados de Monin-Obukhov.

8.2 FLUXO DE CALOR SENSÍVEL

O fluxo de calor é uma variável influenciada pela quantidade de radiação solar incidente na superfície terrestre. Quando o fluxo de calor é positivo, significa que a superfície terrestre se encontra mais aquecida que as camadas de ar superiores, aquecendo-as. Quando a superfície terrestre está mais fria que as camadas de ar superiores, o fluxo de calor se torna negativo, ou seja, da atmosfera para o solo.

Dessa forma, o fluxo de calor sensível é negativo a partir das 18h até às 6h, quando não há radiação solar incidindo na superfície terrestre (**figura 8.2-1**). Seu valor atinge o pico mínimo às 2h com um valor médio de $-19,38 \text{ W/m}^2$. Entre 7h e 17h, o fluxo de calor sensível é positivo e seu valor máximo ocorre às 12h com um valor médio de $115,49 \text{ W/m}^2$.

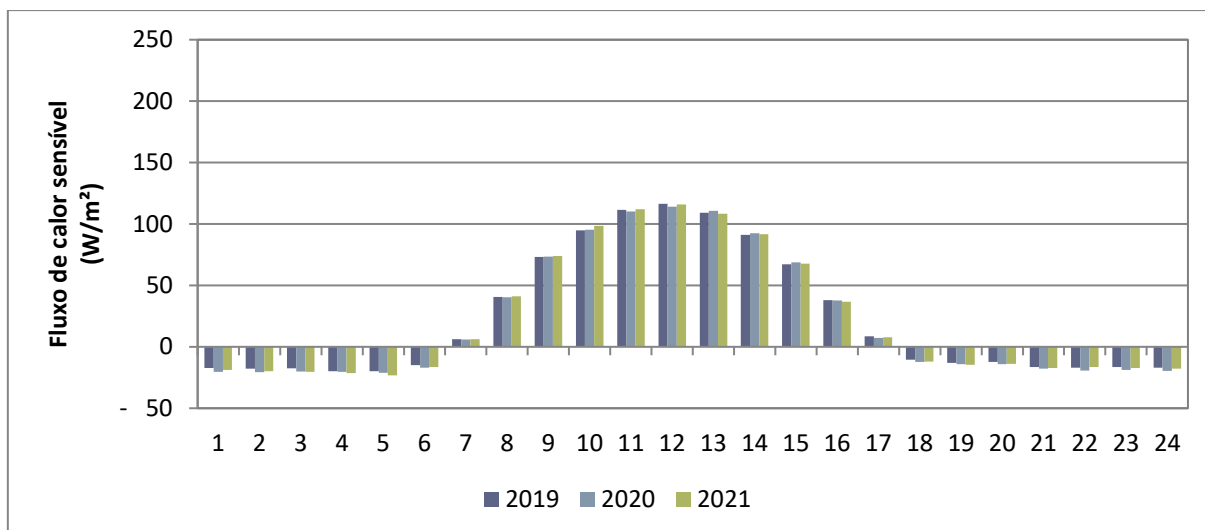


Figura 8.2-1: Dados processados do fluxo de calor sensível.

8.3 VELOCIDADE DE FRICÇÃO

A velocidade de fricção está ligada a turbulência dominada por tensões de cisalhamento (mecânico) que dependem da velocidade do vento (gradientes horizontais de pressão) e da rugosidade e irregularidades da superfície terrestre.

Observa-se que a velocidade de fricção apresenta seu pico mínimo às 4h, com um valor médio para os três anos de 0,182 m/s, e seu pico máximo às 14h com uma média de 0,519 m/s (**Figura 8.3-1**).

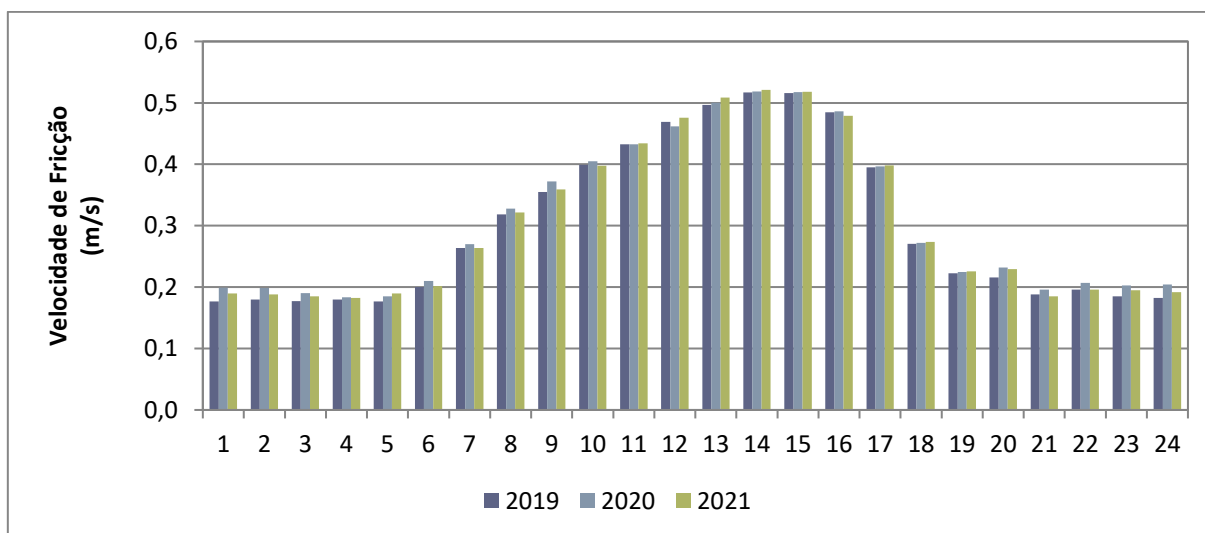


Figura 8.3-1: Dados processados de velocidade de fricção.

8.4 ESCALA DE VELOCIDADE CONVECTIVA

Quanto à escala de velocidade convectiva, observações de campo, experimentos em laboratórios e estudos de modelos numéricos mostram que as grandes escalas turbulentas na Camada Limite Conectiva - CLC têm velocidades proporcionais à escala de velocidade convectiva w_* .

Os valores da escala de velocidade convectiva estão compreendidos entre as horas 6 e 18, sendo que às 6h é observado os menores valores horários médios (0,08 m/s), que aumenta até atingir o pico máximo por volta das 12h (1,49 m/s), e depois decresce até as 18h (**Figura 8.4-1**).

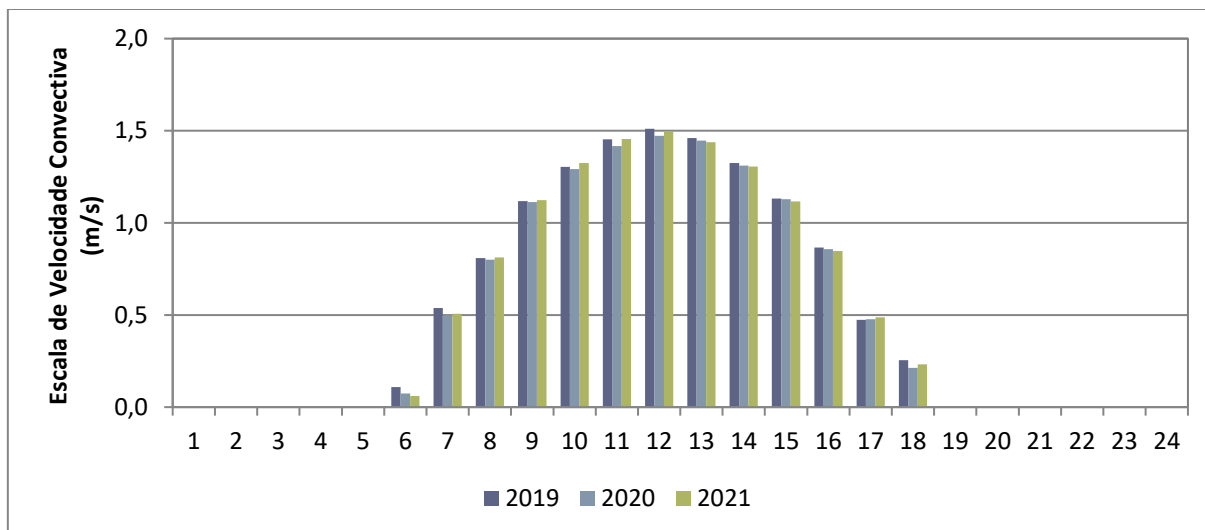


Figura 8.4-1: Dados processados de velocidade convectiva.

8.5 ALTURA DA CAMADA MECÂNICA

No modelo AERMET, a altura da camada limite mecânica é calculada supondo que sua altura de equilíbrio seja dada em função da altura de mistura mecânica de equilíbrio e do parâmetro de Coriolis.

Os maiores valores são observados entre o período de 7h às 17h, período no qual o pico máximo ocorre aproximadamente às 12h e obtém um valor médio de 1212,90 m. É observado o menor valor às 5h (média de 87,52 m) (**Figura 8.5-1**).

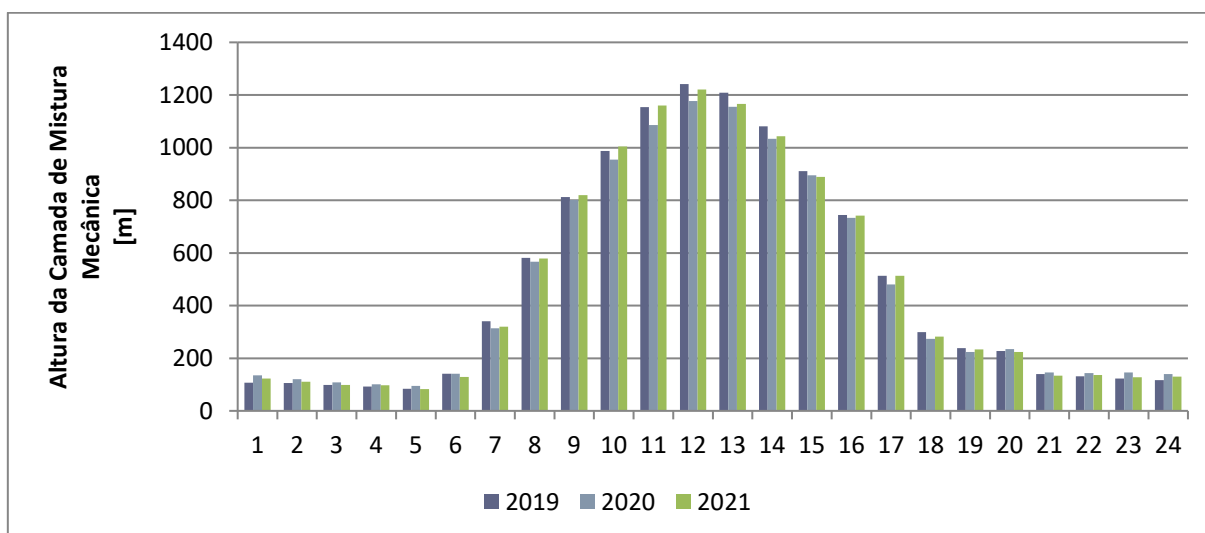


Figura 8.5-1: Dados processados da altura da camada de mistura mecânica.

8.6 ALTURA DA CAMADA CONVECTIVA

A camada de mistura convectiva Z_{ic} é calculada no modelo AERMET através da sondagem da temperatura potencial matutina, e a variação temporal do fluxo de calor de superfície para calcular a evolução temporal da CLC. Assim, esse parâmetro só é computado para horas convectivas, ou seja, somente no período diurno (6h - 18h).

No comportamento horário da altura da camada convectiva é observado o menor valor às 6h, em que o valor médio obtido para os três anos é de 786,51 m. A partir de 6h, os valores do parâmetro crescem no decorrer das horas do dia, atingindo seu pico máximo às 12h com uma média de 1212,90 m (**Figura 8.6-1**).

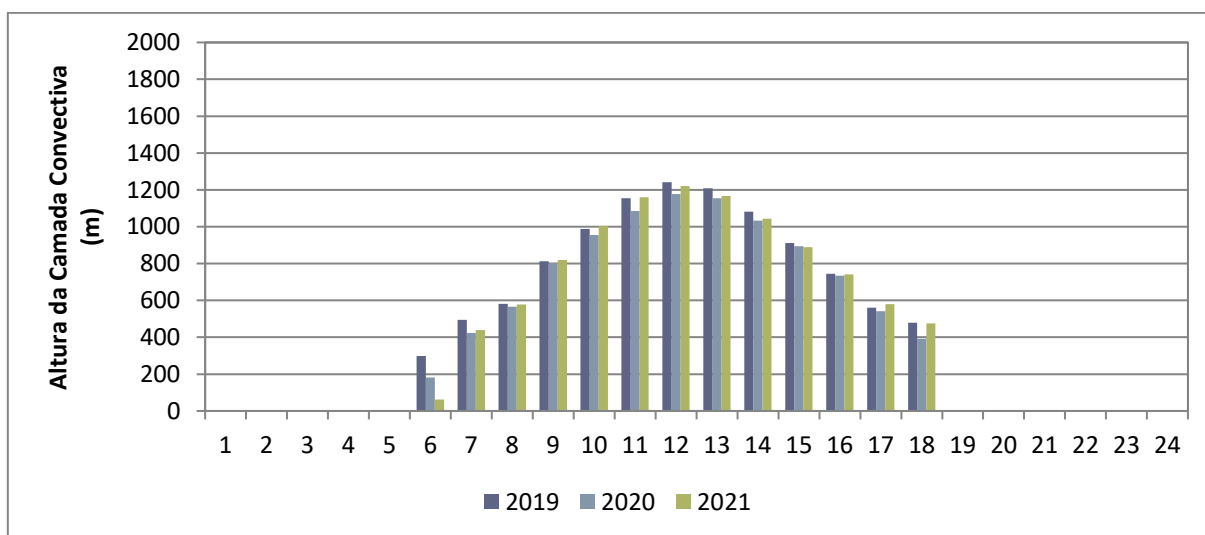


Figura 8.6-1: Dados processados da altura da camada de mistura mecânica mensal.

9. POLUENTES E PADRÕES DE QUALIDADE DO AR

Segundo a Resolução CONAMA nº 491/2018, considera-se poluente atmosférico qualquer substância presente no ar e que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, causando inconveniente ao bem-estar público, danos aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade. Portanto, o grau de poluição atmosférica é medido pelo nível de concentrações de substâncias poluentes presentes no ar.

Os poluentes são divididos em duas categorias: primários, que são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão; e os secundários, que são aqueles formados na atmosfera através de reações químicas entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera.

A exposição aos poluentes pode ocorrer de duas formas:

- **Exposição Crônica:** exposição de caráter repetitivo a concentrações de poluentes mesmo que baixas durante um longo período de tempo, podendo chegar até vários anos;
- **Exposição Aguda:** exposição a concentrações elevadas de poluentes por um período curto de tempo, podendo esse ter a duração de algumas horas ou um dia.

9.1 POLUENTES ESTUDADOS

Partículas respiráveis finas (MP_{2,5}): São aquelas partículas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 2,5 µm. Devido ao seu tamanho diminuto, penetram profundamente no sistema respiratório, podendo atingir os alvéolos pulmonares.

Partículas inaláveis (MP₁₀): São aquelas partículas cujo diâmetro aerodinâmico é menor que 10 µm. Dependendo da distribuição de tamanho na faixa de 0 a 10 µm, podem ficar retidas na parte superior do sistema respiratório ou penetrar mais profundamente, alcançando os alvéolos pulmonares.

Partículas Totais em Suspensão (PTS): Podem ser definidas de maneira simplificada como aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 50 µm. Uma parte destas partículas é inalável e pode causar problemas à saúde, outra parte pode afetar desfavoravelmente a qualidade de vida da população, interferindo nas condições estéticas do ambiente e prejudicando as atividades normais da comunidade.

9.2 PADRÕES DE QUALIDADE DO AR

Os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, são menos restritivos que o Decreto Estadual Nº 3463-R de 16/12/2013, aplicado a todo Estado do Espírito Santo, com exceção do limite estabelecido do parâmetro MP₁₀ no período de referência **anual**. Dessa forma e por ser mais restritivo, os limites definidos no referido decreto foram utilizados para avaliação dos cenários de qualidade do ar estimados para área de estudo, somente, para o limite estabelecido do parâmetro MP₁₀ no período de referência **anual** foi utilizado o limite preconizado na Resolução CONAMA nº 491, por ser mais restritiva.

Os valores de referência adotados para os padrões da qualidade do ar na referida Resolução e no Decreto, são baseados nas recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS) no documento intitulado "Air Quality Guidelines Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and

sulfur dioxide”. Segundo a publicação, esses valores de referência variam de acordo com a abordagem adotada para balancear riscos à saúde, viabilidade técnica, considerações econômicas e vários outros fatores políticos e sociais, que por sua vez dependem, entre outras coisas, do nível de desenvolvimento e da capacidade nacional de gerenciar a qualidade do ar.

As diretrizes recomendadas pela OMS levam em conta essa heterogeneidade e, em particular, reconhecem que, ao formularem políticas de qualidade do ar, os governos devem considerar cuidadosamente circunstâncias locais antes de adotarem os valores propostos como padrões nacionais. Para tal, foram estabelecidas metas intermediárias, ou seja, valores temporários, que devem ser gradativamente alcançadas até atingir os valores dos padrões finais. Os critérios estabelecidos são discutidos abaixo:

I - Metas Intermediárias - (MI) - estabelecidas como valores temporários a serem cumpridos em etapas, visando à melhoria gradativa da qualidade do ar, baseada na busca pela redução gradual das emissões de fontes fixas e móveis, em linha com os princípios do desenvolvimento sustentável;

II - Padrões Finais - (PF) - Padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica.

As Metas Intermediárias devem ser obedecidas em 3 (três) etapas assim determinadas:

- a) Meta Intermediária Etapa 1 - (MI1) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados a partir da publicação deste decreto;
- b) Meta Intermediária Etapa 2 - (MI2) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados subsequentemente à MI1, que entrará em vigor após avaliações realizadas na Etapa 1, reveladas por estudos técnicos apresentados pelo órgão ambiental estadual, após devida ciência do CONSEMA;
- c) Meta Intermediária Etapa 3 - (MI-3) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados subsequentemente à MI2, que entrará em vigor após avaliações realizadas na Etapa 2, reveladas por estudos técnicos apresentados pelo órgão ambiental estadual, após devida ciência do CONSEMA.

Com base nos padrões de qualidade do ar mencionados, para a análise da área de estudo em questão, foram aplicadas as metas da qualidade do ar definidos pelo Decreto Estadual Nº 3463-R de 16/12/2013, desse modo, para os poluentes PTS e MP₁₀ foi utilizado a meta intermediária da etapa 1 (MI-1), e para MP_{2,5} a meta intermediária da etapa 2 (MI-2). Entretanto, para a referência temporal de longo período do parâmetro MP₁₀ utilizou-se a limite máximo permitido na Resolução CONAMA 491/2018, por ser mais restritiva.

Os Padrões de Qualidade do Ar estabelecido no Decreto Estadual Nº 3463-R de 2013 estão apresentados na **Tabela 9.2-1**. Conforme descrito acima o limite anual de MP₁₀ foi comparado com a Resolução CONAMA nº 491/2018 (**TABELA 9.2-1**), por ser mais restritiva. Ademais, os valores utilizados para comparação estão destacados em vermelho nas referidas tabelas.

Tabela 9.2-1: Padrões da qualidade do ar por poluente do Decreto Estadual nº 3463-R/2013.

Poluente	Referência Temporal	Valor estabelecido em $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		MI-1	MI-2	MI-3	PF
MP _{2,5}	24 horas	-	50	37	25
	Anual ^a	-	20	15	10
MP ₁₀	24 horas	120	80	60	50
	Anual ^a	45	33	25	20
PTS	24 horas	180	170	160	150
	Anual ^b	65	63	62	60

^a Valor obtido a partir da média aritmética anual

MI-1 – Meta Intermediária 1 válida a partir da publicação do Decreto;

MI-3 – Meta Intermediária 3 válida a partir de avaliações na MI-2;

^b Valor obtido pela média geométrica anual

MI-2 – Meta Intermediária 2 válida a partir de avaliações realizadas na MI-1;

PF – Padrão Final válido a partir de avaliações na PI-3.

Tabela 9.2-2: Padrões da qualidade do ar por poluente da Resolução CONAMA nº 491/2018.

Poluente	Referência Temporal	Valor estabelecido em $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		PI-1	PI-2	PI-3	PF
MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25
	Anual ^a	20	17	15	10
MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50
	Anual ^a	40	35	30	20
PTS	24 horas	-	-	-	240
	Anual ^b	-	-	-	80

^a Valor obtido a partir da média aritmética anual

PI-1 – Padrão Intermediário 1 válido a partir da publicação da Resolução;

PI-3 – Padrão 3 válido a partir de avaliações na PI-2;

^b Valor obtido pela média geométrica anual

PI-2 – Padrão 2 válido a partir de avaliações realizadas na PI-1;

PF – Padrão Final válido a partir de avaliações na PI-3.

10. METODOLOGIA

A partir dos dados fornecidos pela Vale e a consulta realizada em literatura científica de fatores de emissão referentes às atividades que serão executadas, que se refere a construção e operação do ramal ferroviário de Santa Leopoldina/ES a Anchieta/ES, a metodologia do presente estudo foi estruturada em duas etapas principais: i) estimativa de emissões de poluentes atmosféricos, compondo o inventário de fontes e ii) modelagem matemática da dispersão de poluentes através do código aberto AERMOD V.23132 (USEPA), utilizando o software da Lakes Environmental v.12.0 (2023).

A **Figura 10-1** contém o fluxograma da metodologia empregada, a fim de atingir os objetivos listados no **Capítulo 2**.

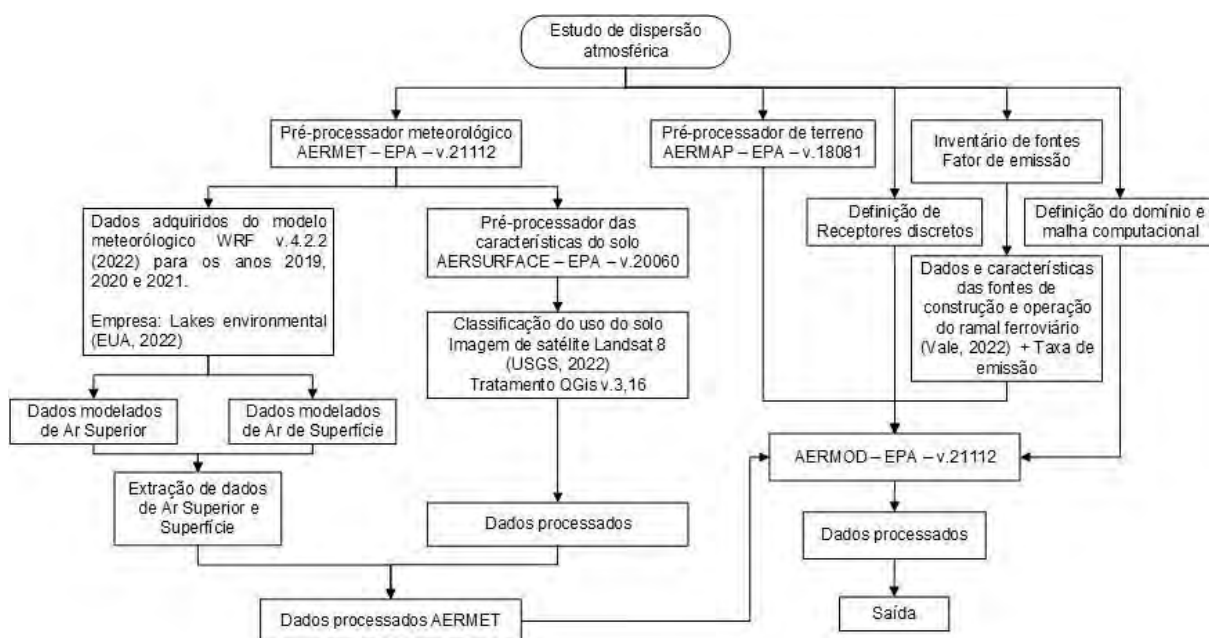


Figura 10-1: Fluxograma da metodologia utilizada nos estudos realizados.

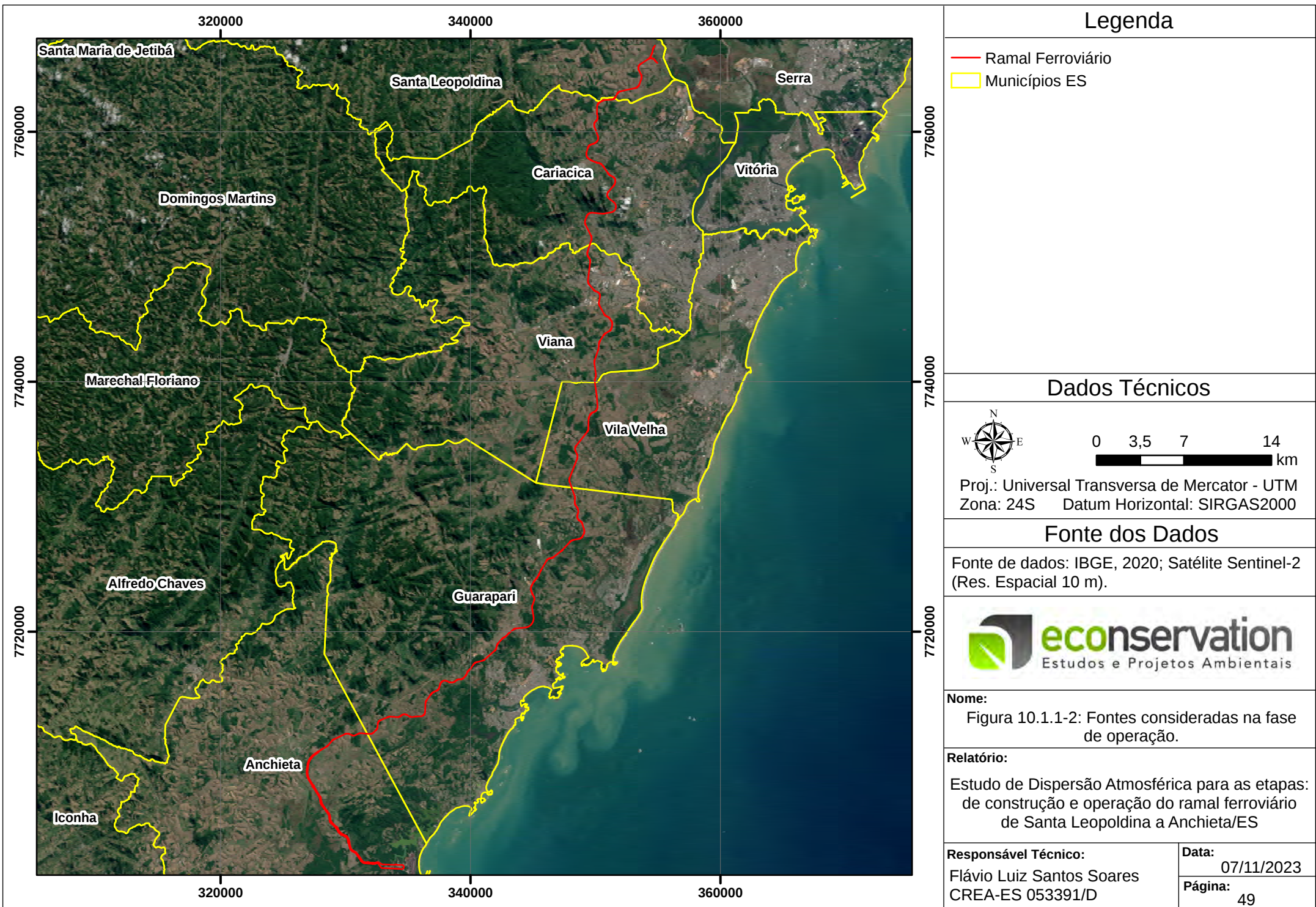
10.1 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

10.1.1 Grupos de emissões considerados

As emissões de material particulado total e das frações 10 µm e 2,5µm, gerados para os cenários da fase de construção e fase de operação do ramal ferroviário, foram classificadas nas categorias apresentadas na **Tabela 10.1.1-1**. A **Figura 10.1.1-1** apresenta as fontes de emissões para o cenário de construção e a **Figura 10.1.1-2** para o cenário de operação.

Tabela 10.1.1-1: Descrição das fontes de emissão de cada grupo considerado.

Cenário	Grupo	Descrição
Fase de construção	Áreas expostas	Emissões de material particulado referentes às fontes tipo área como construções pesadas: preparo do solo para abertura da área de servidão, áreas de acesso, ADMs, canteiros e pátio super fora da faixa de servidão.
Fase de Operação	Emissões dos vagões	Emissões de material particulado referentes às fontes tipo linha: Contempla as emissões do atrito do vento com as áreas expostas dos vagões de minério de ferro.
	Emissões da locomotiva	Emissões de material particulado referentes a fontes tipo linha: Contempla as emissões da queima de combustível (diesel) pela locomotiva.



10.1.1.1 Fase de Construção – Áreas expostas

As áreas expostas são responsáveis pelas emissões decorrentes do arraste eólico sobre os solos e as atividades exercidas no manejo do solo, seja raspagem, escavação ou transposição de um local para o outro, e outras atividades, dentro de uma determinada área.

Para a presente tipologia, as taxas de emissões foram calculadas a partir da metodologia disponibilizada pela Agência Norte Americana de Meio Ambiente, EPA, no documento AP-42, 5ª Ed. Vol. 01, Capítulo 13: Fontes Diversas – 13.2.3 – Operações de construção pesada (USEPA, 1995). Essa metodologia abrange todas as emissões de um canteiro de obra que visa realizar a raspagem, nivelamento, abertura de cavas e conformação do solo/terreno, bem como carregamento de caminhões e despejo de materiais dentro da área e outros. O fator de emissão encontrado na referida literatura se dá para material particulado total, todavia como forma de caracterizar as frações de material particulado 10 µm (MP₁₀) e 2,5 µm (MP_{2,5}), foram utilizadas o documento disponibilizado pelo departamento de proteção ambiental de Hong Kong (EPD, 2016). A **Equação 10.1.1.1-1** traz o cálculo para material particulado total (MPT) e as **Equações 10.1.1.1-2** e **10.1.1.1-3** para as frações MP₁₀ e MP_{2,5}, respectivamente.

$$E = FE * A * (1 - FC) * t \quad \text{Equação 10.1.1.1-1}$$

Onde:

E - Taxa de emissão [t/mês];

FE - Fator de emissão [t/ha/mês];

A - Dimensão da área exposta [ha];

t - Horizonte temporal de construção [mês];

FC - Fator de controle.

$$E = \left(FE * \frac{27}{100} \right) * A * t * (1 - FC) \quad \text{Equação 10.1.1.1-2}$$

Onde:

E - Taxa de emissão [t/mês];

FE - Fator de emissão [t/ha/mês];

A - Dimensão da área exposta [ha];

t - Horizonte temporal de construção [mês];

FC - Fator de controle;

27/100 - Quantidade de MP₁₀ em relação ao *FE* de MPT.

$$E = \left(FE * \frac{3}{100} \right) * A * t * (1 - FC) \quad \text{Equação 10.1.1.1-3}$$

Onde:

E - Taxa de emissão [t/mês];

FE - Fator de emissão [t/ha/mês];

A - Dimensão da área exposta [ha];

t - Horizonte temporal de construção [mês];

FC - Fator de controle;

3/100 - Quantidade de MP_{2,5} em relação ao *FE* de MPT.

A **Tabela 10.1.1.1-1** apresenta os fatores de emissão em t/ha/mês. Cabe destacar que apenas as emissões provenientes das áreas de acesso terão método de controle com umectação do solo, sendo

adotado no presente estudo a eficiência de 40% para umectação de uma vez a cada 1h com caminhão pipa, conforme o documento *Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing* (CDC, 2012).

Tabela 10.1.1.1-1: Fatores de emissão associados à construção pesada (USEPA, 1995; EPD, 2016).

Poluente	Fator de Emissão - Sem Controle [t/ha/mês]
MP total	2,69
MP<10 µm	0,73
MP<2,5 µm	0,08

A **Tabela 10.1.1.1-2** traz as fontes de emissão consideradas para o grupo de áreas expostas.

Tabela 10.1.1.1-2: Fontes de emissão consideradas na fase de construção do ramal ferroviário.

ID	Fonte	Área [ha]	Coord. UTM E [m]	Coord. UTM S [m]	Tempo para execução da obra [mês]
IMPLAN01	Faixa de servidão - Linha Férrea	880,88	354722,6	7766921,06	42
IMPLAN02	Construção Vias de acesso	54,11	354604,94	7766730,88	3
IMPLAN03	Canteiro, ADME e Pátio Super	5,82	350381,58	7745255,16	3

10.1.1.2 Fase de Operação – Emissões dos vagões

O grupo das emissões dos vagões são responsáveis pelas emissões de material particulado decorrentes do arraste eólico da superfície das áreas expostas dos vagões de minério de ferro.

Emissões do transporte de minério de ferro

Para o cálculo das taxas de emissões de minério de ferro foi utilizado a metodologia aplicada para carvão mineral, uma vez que não há fatores de emissão específico para minério de ferro. A literatura utilizada foi a definida pela Agência de Proteção Ambiental Australiana - AUEPA denominado de “Appendix R Environmental Evaluation of Coal Dust Emissions – Final report, Environmental Evaluation of fugitive coal dust emissions from coal trains, goonyella, blackwater and moura voal rail systems, Queensland rail limited (UAEPA, 2008 apud WITT, P., et al, 1999, FERREIRA, et al, 2003). O fator de emissão encontrado na referida literatura se dá para MPT e o fator de emissão para MP₁₀ é considerado 50% do valor de MPT, todavia como forma de caracterizar as frações de material particulado de 2,5 µm (MP_{2,5}), foram utilizados os mesmos 50% de MP₁₀ do valor de MPT. A **Equação 10.1.1.2-1** traz o cálculo do fator de emissão em g/km/t para material particulado total (MPT) e a **Equações 10.1.1.2-2** para as frações MP₁₀ e MP_{2,5}, respectivamente.

$$FE = k1 * v^2 + k2 * v + k3$$

Equação 10.1.1.2-1

Onde:

FE - Fator de emissão utilizado para minério de ferro da superfície do vagão [g/km/t];

k1 - Constante de valor 0,0000378;

k2 - Constante de valor -0,000126;

k3 - Constante de valor 0,000063;

v - Velocidade do ar sobre a superfície do trem [km/h] (considerada a velocidade média do vento + velocidade do trem).

$$FE = (k1 * v^2 + k2 * v + k3) * 50/100$$

Equação 10.1.1.2-2

Onde:

FE - Fator de emissão utilizado para minério de ferro da superfície do vagão [g/km/t];

k1 - Constante de valor 0,0000378;

k2 - Constante de valor -0,000126;

k3 - Constante de valor 0,000063;

v - Velocidade do ar sobre a superfície do trem [km/h] (considerada a velocidade média do vento + velocidade do trem);

50/100 – Porcentagem de MP₁₀ e MP_{2,5} da taxa de emissão calculada para MPT.

Os dados utilizados da velocidade trafegada pelo trem foi o disponibilizado pela área de operação da Vale com velocidade média percorrida de 65 km/h, já a velocidade do vento foi utilizada a média para os três anos de dados meteorológicos modelados pelo WRF de 2019 a 2021, desse modo, a velocidade média do vento adotada foi de 3,697 m/s ou 13,307 km/h. Os fatores de emissão calculados para os dados apresentados são apresentados na **Tabela 10.1.1.2-1**.

Tabela 10.1.1.2-1: Fatores de emissão obtidos provenientes do transporte de minério de ferro.

Poluente	Fator de Emissão [g/km/t]
MP total	0,222
MP<10 µm	0,111
MP<2,5 µm	0,111

A taxa de emissão por sua vez foi calculada a partir da **Equação 10.1.1.2-3**.

$$E = FE * ELF * MT * 10^{-6}$$

Equação 10.1.1.2-3

Onde:

E - Taxa de emissão [t/ano];

FE - Fator de emissão utilizado para minério de ferro da superfície do vagão [g/km/t];

ELF – Extensão da linha férrea a ser percorrida [km];

MT - Material transportado [t/ano];

10⁻⁶ - Conversão de grama para toneladas.

A **Tabela 10.1.1.2-2** apresenta a propriedade da fonte considerada para o grupo de emissões proveniente do transporte de minério de ferro. Cabe ressaltar que a quantidade de material média a ser transportada anualmente, foi estimada com base na projeção de transporte médio anual em 30 anos (2034 a 2063).

Tabela 10.1.1.2-2: Dados de operação no transporte de minério, tomando como base na projeção de transporte médio anual em 30 anos (2034 a 2063).

ID	Fonte	Qtd. Média de material transportado [t/ano]	Velocidade média percorrida [km/h]	Extensão da linha férrea [km]
OP01	Transporte de minério de ferro	14.416.013,33	65	99,3

8.1.1.4 Fase de Operação – Emissões de material particulado da locomotiva

O grupo das emissões da locomotiva, foi definida somente as emissões de material particulado emitida pela queima de combustível fóssil durante a operação para o transporte de minério de ferro.

Para o cálculo das taxas de emissões de material particulado (MPT, MP₁₀ e MP_{2,5}) utilizou-se a metodologia proposta pela *European Environmental Agency* – EEA (2019), do Guia de inventário de emissões de poluentes atmosféricos, capítulo 01: Energia – 1.A – Combustão, categoria 1.A.3.C – Emissões de Ferrovias – Locomotivas (**EQUAÇÃO 10.1.1.4-1**). Cabe destacar que a quantidade de combustível consumida foi calculada pela quantidade de idas e vindas no trajeto determinado pela equipe de engenharia de ferrovia da Vale, tomando como base a média da operação projetada em 30 anos (2034 e 2063).

$$E = FE * (QC * \rho * 10^{-6}) * 10^{-3} \quad \text{Equação 10.1.1.4-1}$$

Onde:

E - Taxa de emissão [t/ano];

FE - Fator de emissão [kg/t];

QC - Quantidade de combustível consumido [l/ano];

ρ - Densidade do óleo diesel [g/l];

10^{-6} - Conversão de grama para toneladas;

10^{-3} - Conversão de quilograma para toneladas.

A densidade do óleo diesel utilizada foi a disponibilizada pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética do Ministério de Minas e Energia (2021), com densidade padrão de 840,0 g/l a 20 °C. A **Tabela 10.1.1.4-1** apresenta dos fatores de emissão para materiais particulados emitidos pela queima do diesel pela locomotiva. Os dados operacionais da fonte se encontram na **Tabela 10.1.1.4-2**.

Tabela 10.1.1.4-1: Fatores de emissão associados a locomotiva (EMEP/EEA, 2019).

Poluente	Fator de Emissão [kg/t de combustível]
MP total	1,52
MP<10 µm	1,44
MP<2,5 µm	1,37

Tabela 10.1.1.4-2: Característica da fonte associada a locomotiva.

ID	Fonte	Consumo de combustível [l/km]	Consumo combustível [l/ano]	Extensão da linha férrea [km]
OP05	Locomotiva	48,4	14.127.792,9	99,3

10.2 MODELAGEM DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

O modelo AERMOD foi desenvolvido pela *American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model Improvement Committee* (AERMIC) como estado da arte por incorporar conceitos de dispersão baseados na estrutura turbulenta da camada limite planetária, calculando o campo das concentrações em função da posição do receptor a partir do valor médio horário de variáveis meteorológicas.

O AERMOD, no ano de 2006, substituiu o modelo *Industrial Source Complex Model* (ISCST3), até então adotado como modelo regulatório para os processos de predição de concentrações ambientais decorrentes das emissões atmosféricas de fontes emissoras. O AERMOD foi desenvolvido para estudar os fenômenos e impactos oriundos das emissões de vários tipos de poluentes (partículas ou gases) provenientes de diversos tipos e alturas de fontes, incluindo em seu tratamento matemático a capacidade de modelagem da dispersão de poluentes sobre terrenos planos e complexos (irregulares).

Quanto ao tratamento matemático, o modelo AERMOD pode simular diferentes tipos de plumas, dependendo da estabilidade atmosférica e dos locais dentro ou acima da camada limite. Para condições atmosféricas estáveis (SBL), por exemplo, o AERMOD modela a pluma com distribuição gaussiana na vertical e horizontal de forma semelhante, típicas de modelos estacionários:

$$C_s(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}u\sigma_{zs}} F_y \sum_{m \rightarrow \infty} \left[\exp \exp \left(-\frac{(z - h_{es} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2} \right) + \exp \exp \left(-\frac{(z + h_{es} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2} \right) \right]$$

Equação 10.2-1

Sendo:

$$F_y = \left(-\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \right)$$

Equação 10.2-2

Onde:

z_{ieff} é a altura da camada de mistura mecânica efetiva, Q é a taxa de emissão; u é a velocidade do vento, σ_z é a dispersão vertical total na camada limite estável e h_e é a altura da pluma, σ_y são os coeficientes de dispersão lateral; x , y e z são as distâncias segundo as direções dos eixos coordenados e m representa o índice do somatório para fontes dentro da camada de mistura, que representa a reflexão da pluma.

Contudo, na condição de camada limite convectiva (CBL), a distribuição horizontal é dada como gaussiana, mas a distribuição vertical é descrita por uma função de densidade probabilidade bi gaussiana.

Embora o AERMOD seja capaz de modelar os processos de deposição seca e deposição úmida de material particulado, tais opções não foram consideradas com o objetivo de manter o estudo conservador do ponto de vista dos acréscimos ambientais.