

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA - REGIÃO DA UTE CANDIOTA III

ANEXO VII.1 - COMPLEMENTO DIAGNÓSTICO 05/02/2025

\

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	4
2.	MATERIAL E MÉTODO	4
2.1.	Fontes de dados	4
3.	SITUAÇÃO SINÓTICA	5
4.	VERIFICAÇÃO NUMÉRICA INDEPENDENTE.....	11
5.	REGISTRO OBSERVACIONAL DE SUPERFÍCIE.....	11
6.	CONSEQUÊNCIA PARA A DISPERSÃO	12
7.	CRONOLOGIA CONSOLIDADA.....	13
8.	CONCLUSÕES.....	13

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DO ANEXO VII-1 E O RECÁLCULO INDEPENDENTE	11
TABELA 2 – REGISTROS METAR E SPECI DO AERÓDROMO DE BAGÉ (SBBG) EM 05/02/2025	12
TABELA 3 – INDICADORES DA CAMADA LIMITE EM 05/02/2025 E NA MADRUGADA DE 06/02.....	12
TABELA 4 – CRONOLOGIA DO EVENTO.....	13

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - IMAGEM DO CANAL INFRAVERMELHO DO GOES-16 DO DIA 05 DE FEVEREIRO DE 2025 ÀS 23 UTC.....	6
FIGURA 2 - DIAGRAMA SKEW-T SIMPLIFICADO DE CANDIOTA E BAGÉ PARA O DIA 05 DE FEVEREIRO ÀS 22 UTC.	7
FIGURA 3 - DIAGRAMA SKEW-T SIMPLIFICADO DE CANDIOTA E BAGÉ PARA O DIA 05 DE FEVEREIRO ÀS 23 UTC.	7
FIGURA 4 - UMIDADE RELATIVA NO NÍVEL DE 700 hPa (ESQUERDA) E NA COLUNA ENTRE 700-500 hPa (DIREITA) NO DIA 05 DE FEVEREIRO DE 2025 ÀS 22 UTC.....	8
FIGURA 5 - UMIDADE RELATIVA NO NÍVEL DE 700 hPa (ESQUERDA) E NA COLUNA ENTRE 700-500 hPa (DIREITA) NO DIA 05 DE FEVEREIRO DE 2025 ÀS 23 UTC.....	8
FIGURA 6 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DO DÉFICIT VERTICAL DE TEMPERATURA POTENCIAL EQUIVALENTE (TED) EM CANDIOTA E BAGÉ ENTRE 18 E 23 UTC DO DIA 05 DE FEVEREIRO DE 2025. AS LINHAS TRACEJADAS INDICAM OS LIMIARES DE 20 E 30 K DISCUTIDOS POR PRYOR E ELLROD (2004)	9
FIGURA 7 - ÁGUA PRECIPITÁVEL (PWAT) NOS DIAS 05 DE FEVEREIRO DE 2025 ÀS 22, 23 E NO DIA 06 DE FEVEREIRO ÀS 00 UTC.....	10
FIGURA 8 - CAPE NO DIA 05 DE FEVEREIRO DAS 2025 ÀS 22UTC E 23 UTC.....	10
FIGURA 9 - Θ E VENTO EM 850 hPa NO DIA 05/02/2025 AS 21, 22 E 23 UTC.	11

1. INTRODUÇÃO

O Anexo VII-1 documenta a situação sinótica e termodinâmica do dia 5 de fevereiro de 2025, data em que a modelagem registra os máximos absolutos de toda a série nos Cenários B e C. Este complemento acrescenta àquele documento quatro elementos: o registro observacional de superfície, ausente da versão anterior; a verificação numérica independente dos parâmetros termodinâmicos; a cronologia do evento com a correção do horário; e a ligação explícita entre o fenômeno meteorológico e as concentrações simuladas.

Acrescenta-se ainda uma seção sobre relatos de imprensa e de redes sociais, com o protocolo de validação aplicável a esse tipo de registro e o resultado da busca realizada.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1. FONTES DE DADOS

- ✦ Reanálise ERA5, do ECMWF/Copernicus, e perfis do ECMWF IFS na resolução de 0,25°, processados a partir dos campos originais para o cálculo independente de DCAPE, CAPE, CIN, déficit vertical de temperatura potencial equivalente e água precipitável (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-pressure-levels>).
- ✦ Registros METAR e SPECI do aeródromo de Bagé (SBBG), a 40 km do sítio, recuperados do acervo do Iowa Environmental Mesonet (<https://mesonet.agron.iastate.edu/ASOS/>).
- ✦ Estação automática do INMET em Bagé (A827), dados horários de vento, temperatura, umidade e precipitação (<https://bdmep.inmet.gov.br>).
- ✦ Índices oceânicos e de temperatura da superfície do mar do NOAA, para a caracterização do ambiente de grande escala.
- ✦ Imagens do canal infravermelho do GOES-16, acervo do CPTEC/INPE, usadas no Anexo VII-1 original.

3. SITUAÇÃO SINÓTICA

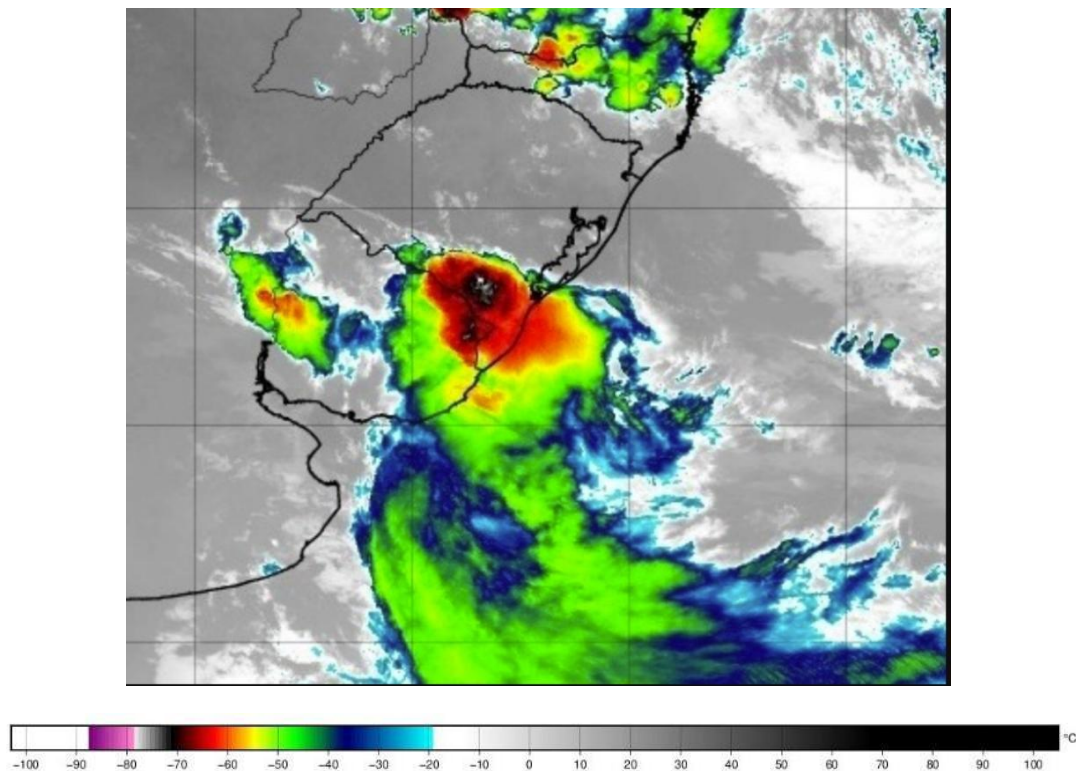
O dia é classificado como frontal. A pressão ao nível médio do mar às 12 UTC é de 1.010,5 hPa, a mais baixa entre os 90 dias diagnosticados no Anexo VII, e o gradiente de pressão no entorno do sítio é de 0,39 hPa/100 km, com vento geostrófico de 4,3 m/s de sudoeste. A tendência de pressão entre 06 e 18 UTC é de -3,9 hPa, a segunda maior queda da série, coerente com a aproximação do sistema frontal pelo Uruguai.

A temperatura máxima alcança 35,1 °C e a umidade relativa máxima, 97 %. A combinação de temperatura elevada à superfície, alto conteúdo de umidade na coluna e camada intermediária relativamente seca é a assinatura clássica do ambiente de corrente descendente úmida.

Às 23 UTC de 05 de fevereiro de 2025, a imagem do canal infravermelho do GOES-16 (Figura 1) evidencia um núcleo convectivo muito profundo sobre a região de Bagé–Candiota, caracterizado por temperaturas de brilho muito baixas no topo da nuvem. A presença de uma área compacta com os menores valores de temperatura indica forte desenvolvimento vertical da convecção e é compatível com uma corrente ascendente intensa no estágio de maior desenvolvimento da tempestade. A passagem desse núcleo ocorreu no mesmo período em que foi registrada na estação meteorológica de Bagé rajada de aproximadamente 82 km h⁻¹, acompanhada de precipitação intensa, constituindo a primeira evidência de que a tempestade esteve associada a uma corrente descendente significativa.

A imagem de satélite, isoladamente, não permite identificar uma micro explosão, mas estabelece a coincidência espacial e temporal entre uma célula convectiva profunda e a rajada observada em superfície.

Figura 1 - imagem do canal infravermelho do GOES-16 do dia 05 de fevereiro de 2025 às 23 UTC.



Os perfis termodinâmicos do ERA5 mostram que o ambiente já apresentava, antes da passagem do núcleo convectivo, condições favoráveis à aceleração de correntes descendentes. Às 22 UTC (Figura 2), o DCAPE atingia 1282 J kg^{-1} em Candiota e 1324 J kg^{-1} em Bagé. Uma hora depois, às 23 UTC (Figura 3), quando o núcleo convectivo aparece sobre a região nas imagens de satélite, os valores permaneciam elevados, com 1005 J kg^{-1} em Candiota e 1112 J kg^{-1} em Bagé. Esses valores indicam disponibilidade expressiva de energia potencial para aceleração de parcelas descendentes. A redução observada entre 22 e 23 UTC ocorre simultaneamente à evolução da convecção, embora não deva ser interpretada diretamente como consumo de DCAPE pelo evento.

Os mesmos perfis mostram uma estrutura vertical importante para compreender o mecanismo responsável pela corrente descendente. A atmosfera não apresentava uma camada profunda uniformemente seca. Em torno de 700 hPa, temperatura e ponto de orvalho permaneciam relativamente próximos, enquanto uma separação maior entre as duas curvas aparecia em níveis médios, especialmente próximo de 500 hPa, nível a partir do qual o cálculo indicou a origem da parcela associada ao DCAPE. Essa configuração permite a coexistência de grande quantidade de água na tempestade e de uma camada suficientemente sub-saturada

em níveis médios para promover evaporação parcial da precipitação e resfriamento do ar descendente.

Figura 2 - Diagrama Skew-t simplificado de Candiota e Bagé para o dia 05 de fevereiro às 22 UTC.

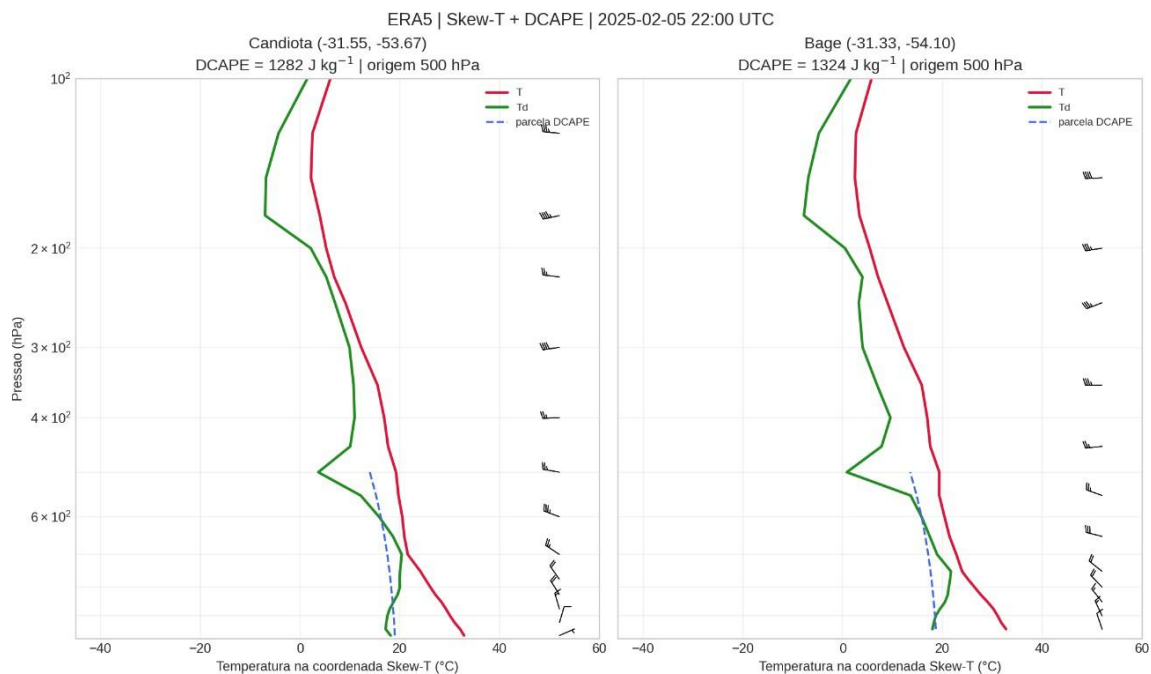
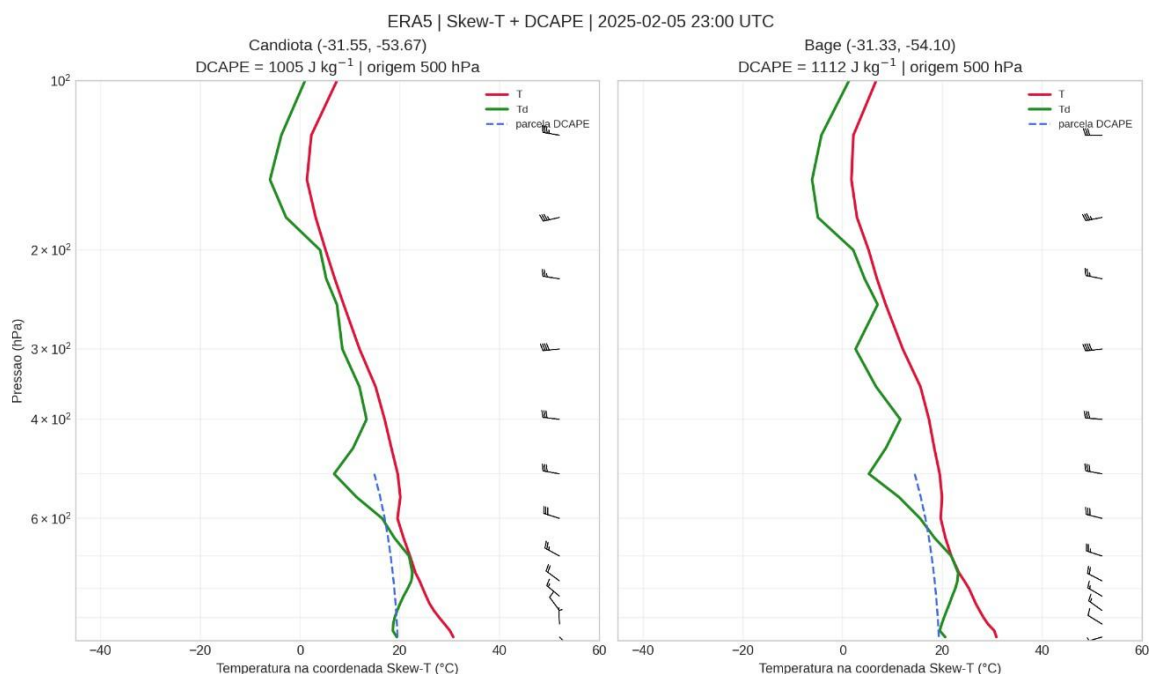


Figura 3 - Diagrama Skew-t simplificado de Candiota e Bagé para o dia 05 de fevereiro às 23 UTC.



Os campos horizontais de umidade relativa reforçam essa interpretação. Entre 22 (Figura 4) e 23 UTC (Figura 5), a umidade relativa em 700 hPa atingia aproximadamente 80–100% na região de Bagé–Candiota, demonstrando a presença de uma camada bastante

úmida. Entretanto, considerando a média entre 700 e 500 hPa, os valores diminuía para aproximadamente 60–70%, evidenciando uma camada média menos saturada. Assim, o ambiente não apresenta a estrutura tipicamente associada a uma micro explosão seca, mas uma configuração na qual uma atmosfera úmida em níveis inferiores e uma sub saturação relativa acima favorecem simultaneamente elevada produção de precipitação e resfriamento evaporativo durante a descida dos hidrometeoros.

Figura 4 - Umidade Relativa no nível de 700 hPa (esquerda) e na coluna entre 700-500 hPa (direita) no dia 05 de fevereiro de 2025 às 22 UTC.

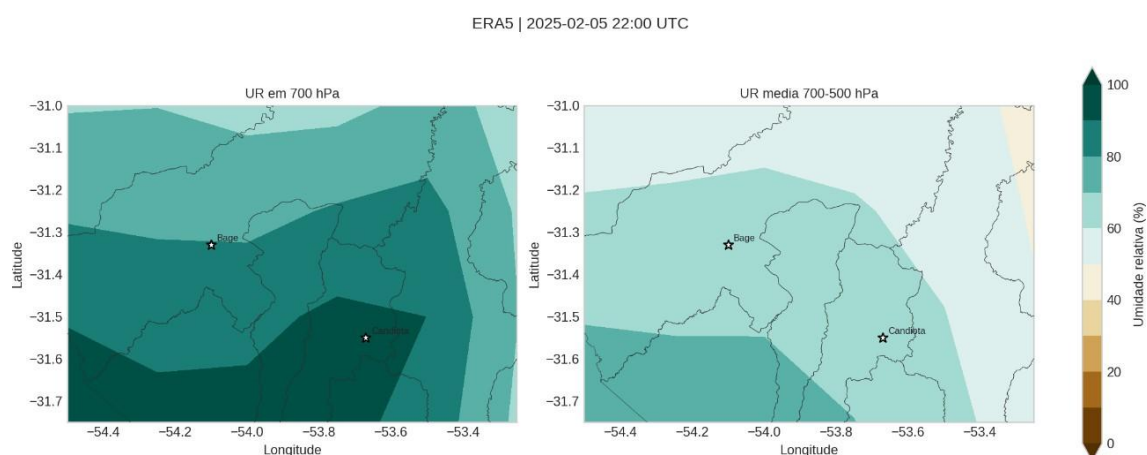
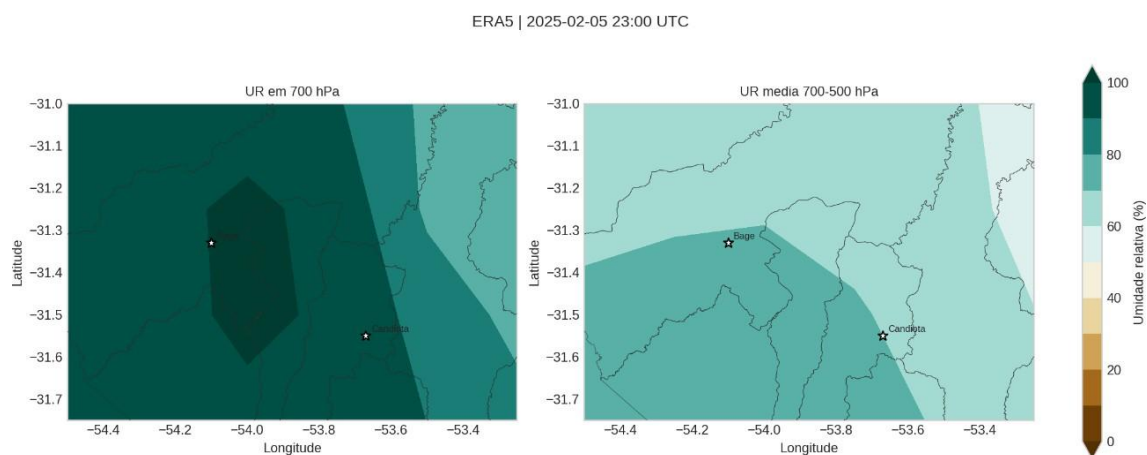


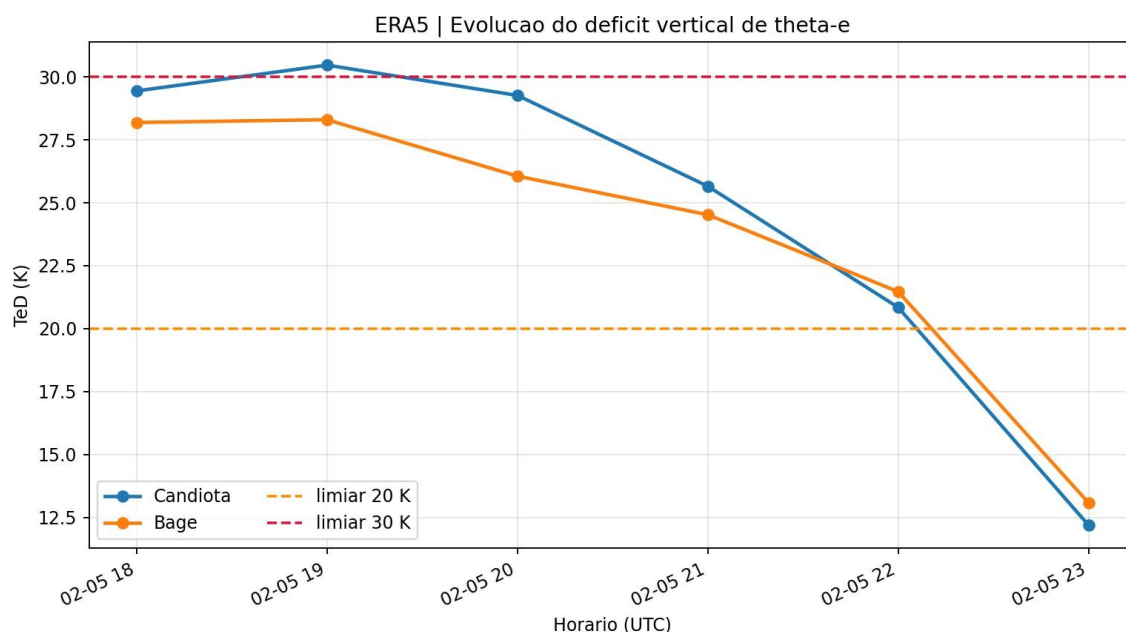
Figura 5 - Umidade Relativa no nível de 700 hPa (esquerda) e na coluna entre 700-500 hPa (direita) no dia 05 de fevereiro de 2025 às 23 UTC.



A estrutura termodinâmica observada também foi avaliada por meio do déficit vertical de temperatura potencial equivalente (TeD), parâmetro utilizado por Pryor e Ellrod (2004) na identificação de ambientes favoráveis à ocorrência de *wet microbursts*. Entre 18 e 22 UTC, o TeD permaneceu superior a 20 K em Bagé e Candiota, atingindo máximo de 30,46 K em Candiota às 19 UTC e 28,30 K em Bagé no mesmo horário. Em Candiota, valores próximos ou superiores a 30 K ocorreram durante o período pré-convectivo, enquanto em ambas as

localidades o TeD permaneceu acima de 20 K até 22 UTC, imediatamente antes da passagem do núcleo convectivo mais intenso.

Figura 6 - Evolução temporal do déficit vertical de temperatura potencial equivalente (TeD) em Candiota e Bagé entre 18 e 23 UTC do dia 05 de fevereiro de 2025. As linhas tracejadas indicam os limiares de 20 e 30 K discutidos por Pryor e Ellrod (2004).



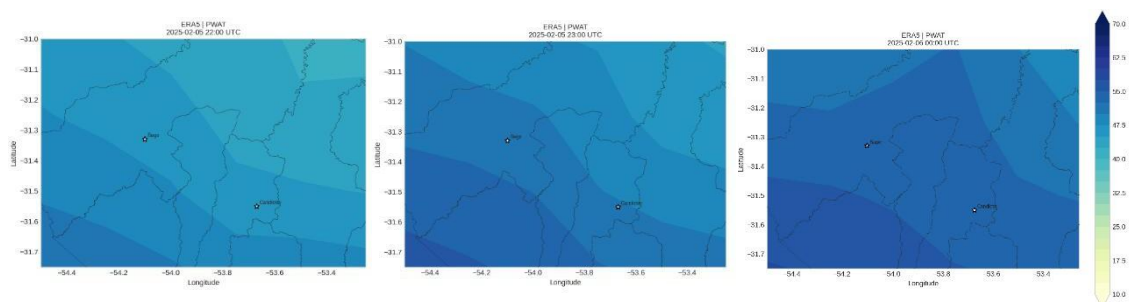
Esses valores são relevantes porque Pryor e Ellrod (2004), a partir dos resultados do experimento MIST, destacam que ambientes associados a *wet microbursts* apresentavam déficit vertical de θ_e igual ou superior a 20 K, com o mínimo de θ_e localizado tipicamente entre 650 e 500 hPa. No episódio analisado, o mínimo de θ_e ocorreu entre 550 e 500 hPa, reproduzindo essa característica vertical.

A evolução temporal mostra ainda redução progressiva do TeD a partir das 19 UTC, seguida de queda acentuada entre 22 e 23 UTC, quando os valores passam de 20,84 para 12,19 K em Candiota e de 21,47 para 13,08 K em Bagé. Essa mudança ocorre simultaneamente à passagem da convecção profunda pela região e indica rápida modificação do ambiente termodinâmico.

Além da estrutura vertical evidenciada pelo TeD, o elevado conteúdo de umidade da coluna atmosférica também contribuiu para um ambiente favorável à geração de correntes descendentes intensas, vista nos campos de água precipitável (PWAT). Entre as 22 UTC do dia 05 e as 00 UTC do dia 06, o PWAT situava-se aproximadamente entre 45 e 55 mm. O

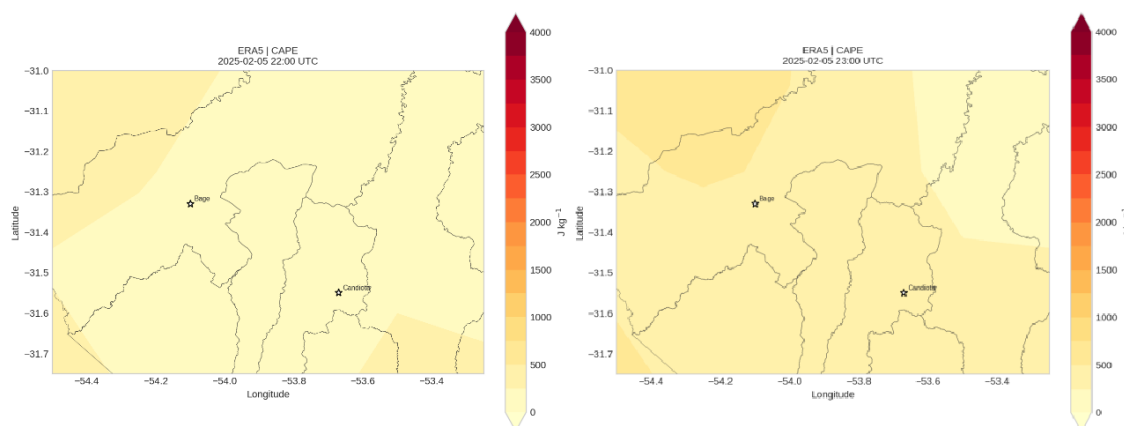
elevado conteúdo de vapor d'água favorece grande produção de precipitação dentro da célula e reforça o mecanismo de “*precipitation loading*”, ou seja, a massa de água e gelo em queda contribui para a aceleração descendente, enquanto a evaporação de parte da precipitação amplia a flutuabilidade negativa. A combinação é coerente com ambientes de wet downburst descritos na literatura de diagnóstico de microbursts (PRYOR; ELLROD, 2004).

Figura 7 - água Precipitável (PWAT) nos dias 05 de fevereiro de 2025 Às 22, 23 e no dia 06 de fevereiro Às 00 UTC.



O campo de CAPE (Figura 8) mostra que a tempestade não ocorreu necessariamente em um ambiente de instabilidade convectiva excepcionalmente elevada. Nas proximidades de Bagé e Candiota predominavam valores de algumas centenas de J kg^{-1} . Embora esses valores sejam moderados, a presença simultânea de TeD superior a 20 K durante várias horas no período pré-convectivo e DCAPE superior a 1000 J kg^{-1} próximo à passagem da tempestade indica que o ambiente apresentava condições termodinâmicas particularmente favoráveis ao desenvolvimento de correntes descendentes intensas.

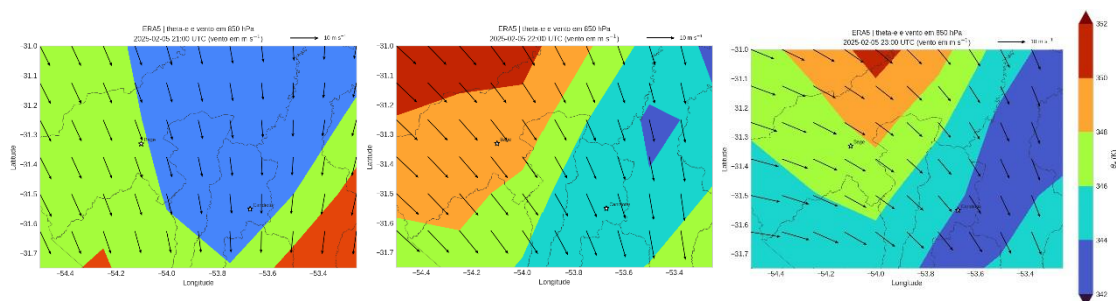
Figura 8 - CAPE no dia 05 de fevereiro das 2025 às 22UTC e 23 UTC.



A evolução da temperatura potencial equivalente em 850 hPa (θ_e) também evidencia uma importante organização termodinâmica na região. Entre 21 e 23 UTC (Figura 9), observa-se forte gradiente espacial de θ_e atravessando Bagé e Candiota, acompanhado por vento

predominantemente de noroeste em 850 hPa. Essa configuração indica a presença de forte contraste termodinâmico na área de desenvolvimento da tempestade e fluxo em baixos níveis capazes de transportar ar com maior θ_e em direção à região.

Figura 9 - θ_e e vento em 850 hPa no dia 05/02/2025 as 21, 22 e 23 UTC.



4. VERIFICAÇÃO NUMÉRICA INDEPENDENTE

Os parâmetros termodinâmicos apresentados no Anexo VII-1 foram recalculados do zero a partir dos perfis do IFS, com a formulação de Bolton (1980) para a temperatura potencial equivalente e o DCAPE, obtido por descida pseudo-adiabática saturada a partir do nível de mínimo de θ_e . Os resultados constam da Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre os valores do Anexo VII-1 e o recálculo independente

PARÂMETRO	ANEXO VII-1	RECÁLCULO	DIFERENÇA
DCAPE EM CANDIOTA, 22 / 23 UTC	1.282 / 1.005 J kg ⁻¹	1.172 / 856 J kg ⁻¹	9 % / 15 %
DCAPE EM BAGÉ, 22 / 23 UTC	1.324 / 1.112 J kg ⁻¹	1.296 / 1.079 J kg ⁻¹	2 % / 3 %
NÍVEL DO MÍNIMO DE θ_e	650 a 500 hPa	503 a 511 hPa	concorda
DÉFICIT VERTICAL DE θ_e (22–23 UTC)	> 20 K	> 20 K	concorda
ÁGUA PRECIPITÁVEL	45 a 55 mm	42 a 53 mm	≤ 3 mm

Recálculo a partir dos perfis do ECMWF IFS, resolução de 0,25°.

A foco central deste documento procede e os seus números conferem dentro da margem esperada para métodos de cálculo distintos. O CAPE nos perfis processados cai, de 560 para 410 J kg⁻¹ em Candiota, e de 290 para 260 J kg⁻¹, em Bagé. Ao contrário: CAPE em queda com DCAPE alto é justamente a assinatura do estágio maduro de uma corrente descendente, quando a água líquida já evapora e consome a energia disponível.

5. REGISTRO OBSERVACIONAL DE SUPERFÍCIE

O Anexo VII-1 sustenta a ocorrência de uma rajada severa com registros apresentados na Tabela 2: a sequência de METAR e SPECI do aeródromo de Bagé, a 40 km do sítio, mostra a passagem da frente de rajada com precisão de minutos.

Tabela 2 – Registros METAR e SPECI do aeródromo de Bagé (SBBG) em 05/02/2025

HORÁRIO (UTC)	TIPO	OBSERVAÇÃO
22:00	METAR	Vento de 350° a 10 kt, CAVOK, 35/20 °C, QNH 1002 hPa
22:02	SPECI	Vento de 220° a 16 kt, rajada de 31 kt, variando entre 170° e 300°, 34/21 °C, 1003 hPa
22:17	SPECI	Vento de 200° a 26 kt, rajada de 36 kt (66 km/h), 26/22 °C, 1003 hPa
22:19	SPECI	Vento de 200° a 27 kt, 25/22 °C, 1004 hPa
22:19 A 01:00	—	Estação sem emissão por cerca de 2 h 40 min
06/02, 03:00	METAR	Vento de 350° a 9 kt, rajada de 19 kt — segunda saída de ar frio

Acervo do Iowa Environmental Mesonet. Conversão: 36 kt = 18,5 m/s = 66 km/h.

Em dezessete minutos a temperatura cai 9°C, o vento gira cerca de 170° e a pressão sobe 2 hPa.

6. CONSEQUÊNCIA PARA A DISPERSÃO

O evento convectivo não interessa apenas como fenômeno meteorológico: ele explica, em dois tempos distintos, o comportamento das concentrações simuladas naquele dia.

O primeiro tempo é a própria rajada. A corrente descendente rebate a pluma contra a superfície e produz um pico curto de concentração, de duração de minutos. O segundo tempo, mais importante para as médias diárias. A Tabela 4 reúne os indicadores da camada limite obtidos da reanálise para o dia e a madrugada seguinte.

Tabela 3 – Indicadores da camada limite em 05/02/2025 e na madrugada de 06/02

INDICADOR	VALOR	LEITURA
ALTURA MÁXIMA DA CAMADA DE MISTURA	2.330 m	Camada convectiva profunda no fim da tarde
ALTURA NA MADRUGADA	186 m (mínimo de 100 m)	Abaixo do topo da chaminé, de 200 m
COEFICIENTE DE VENTILAÇÃO MÉDIO	2.972 m ² /s	Menos da metade do limiar de boa ventilação
COEFICIENTE NA MADRUGADA	1.036 m ² /s	Diluição praticamente interrompida
COEFICIENTE MÍNIMO	240 m ² /s	7 horas do dia abaixo de 1.000 m ² /s
UMIDADE RELATIVA MÁXIMA	97 %	Ar saturado junto à superfície
NEBULOSIDADE MÉDIA	46 %	Cobertura total no período noturno

PRECIPITAÇÃO	16,5 mm	Remoção úmida atuante durante a passagem
AMPLITUDE TÉRMICA	12,4 °C	Resfriamento acentuado após a piscina fria

Fonte: ERA5 (C3S/ECMWF), ponto 31°33' S; 53°40' O. Os valores integram a base do Anexo VII.

O colapso de 2.330 m para pouco mais de 300 m em poucas horas, e a permanência entre 100 e 180 m durante toda a madrugada, colocam o topo da chaminé acima da camada de mistura. A pluma fica aprisionada numa camada rasa, saturada e praticamente sem vento, com inibição convectiva de -181 J kg^{-1} . É a condição de menor capacidade de diluição de toda a série de cinco anos.

A modelagem registra, para esta data, os máximos absolutos dos Cenários Anexo VI: 152,37 e 152,44 $\mu\text{g/m}^3$ de SO_2 em 24 horas. Sendo mais de três vezes o Padrão Intermediário 2, e 1.456,60 e 1.456,80 $\mu\text{g/m}^3$ de NO_x em uma hora, às 23 h, seis vezes o padrão de NO_2 . A concentração simulada e o diagnóstico meteorológico, obtidos por caminhos independentes, convergem para a mesma data e a mesma hora.

7. CRONOLOGIA CONSOLIDADA

Tabela 4 – Cronologia do evento

HORÁRIO (UTC)	HORÁRIO LOCAL	EVENTO
18:00 A 22:00	15 H A 19 H	Déficit vertical de θ_e acima de 20 K; DCAPE em elevação; camada de mistura próxima de 2.330 m
22:00	19 H	METAR de Bagé com céu limpo, 35 °C e vento de norte a 10 kt
22:02	19 H 02	Primeira rajada e giro do vento; início da passagem da frente de rajada
22:17	19 H 17	Rajada máxima registrada: 36 kt (66 km/h); queda de 9 °C em 17 minutos
22:00 A 22:20	19 H A 19 H 20	Núcleo convectivo profundo sobre Bagé-Candiota nas imagens do GOES-16
23:00	20 H	Registro horário do INMET com rajada de 22,8 m/s, carimbado no fecho do intervalo 22–23 UTC
00:00 A 09:00 DE 06/02	21 H A 06 H	Camada de mistura entre 100 e 180 m; calmaria; umidade próxima da saturação
03:00 DE 06/02	00 H	Segunda saída de ar frio registrada em Bagé

Horário local = UTC – 3 h.

8. CONCLUSÕES

- ✦ A tese central do Anexo VII-1 procede: o ambiente de 5 de fevereiro de 2025 era favorável a correntes descendentes intensas, e os valores apresentados conferem com o recálculo independente.
- ✦ O registro observacional de superfície confirma a ocorrência, com rajada de 66 km/h às 22:17 UTC, queda de 9 °C e giro de 170° em dezessete minutos.

- ✦ A escala documentada é de frente de rajada, de ordem de 100 km. A designação de micro explosão exige o campo de velocidade radial do radar, ainda não obtido.
- ✦ A consequência para a dispersão é maior do que o pico associado à rajada: o colapso da camada de mistura de 2.330 m para pouco mais de 300 m, e a sua permanência abaixo do topo da chaminé durante toda a madrugada, explicam as horas seguintes e a magnitude das concentrações simuladas.

REFERÊNCIAS

- ATKINS, N. T.; WAKIMOTO, R. M. Wet microburst activity over the southeastern United States: implications for forecasting. *Weather and Forecasting*, v. 6, p. 470-482, 1991.
- BOLTON, D. The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, v. 108, p. 1046-1053, 1980.
- EMANUEL, K. A. *Atmospheric convection*. New York: Oxford University Press, 1994.
- FUJITA, T. T. *The downburst: microburst and macroburst*. Chicago: University of Chicago, 1985. (SMRP Research Paper n. 210).
- HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020. DOI: 10.1002/qj.3803.
- HERSBACH, H. et al. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. DOI: 10.24381/cds.bd0915c6.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Banco de dados meteorológicos — estação automática de Bagé (A827). Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>.
- IOWA ENVIRONMENTAL MESONET. ASOS/AWOS/METAR data Archive. Ames: Iowa State University. Disponível em: <https://mesonet.agron.iastate.edu/ASOS/>.
- PRYOR, K. L.; ELLROD, G. P. Recent improvements to the GOES microburst products. *Weather and Forecasting*, v. 19, p. 582-594, 2004.
- SRIVASTAVA, R. C. A simple model of evaporatively driven downdraft: application to microburst downdraft. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 42, p. 1004-1023, 1985.
- WAKIMOTO, R. M. Forecasting dry microburst activity over the high plains. *Monthly Weather Review*, v. 113, p. 1131-1143, 1985.