



## Análise de Índices de Instabilidade em Casos de Chuva Intensa, Chuva Moderada e Chuva Fraca/sem Chuva nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil

Analysis of Instability Indexes for Intense, Moderate and low/no Rain in Southern and Southeastern Regions of Brazil

Luiz Felipe Rodrigues do Carmo<sup>1</sup>; Fernanda Cerqueira Vasconcellos<sup>1</sup>;  
Wallace Figueiredo Menezes<sup>1</sup> & Eduardo Charles Vasconcellos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto de Geociências – Departamento de Meteorologia.

Rua Athos da Silveira Ramos, 274. Cidade Universitária – Ilha do Fundão – 21.941-916. Rio de Janeiro-RJ

<sup>2</sup>Universidade Federal Fluminense - Instituto de Computação. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.  
Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/n°. São Domingos – 24.210-346. Niterói- RJ

E-mails: luizao@lma.ufrj.br; fernandavasconcellos@igeo.ufrj.br; wallace.menezes@gmail.com; evasconcellos@id.uff.br

Recebido em: 10/09/2018 Aprovado em: 18/02/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_1\\_769\\_782](http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_769_782)

### Resumo

Chuvas intensas são eventos de baixa previsibilidade, mas com grande impacto social, causando prejuízos tanto financeiros quanto humanos. Neste interm, os índices de instabilidade são uma boa ferramenta para auxiliar os previsores, pois podem indicar se o ambiente atmosférico é ou não propício para a formação de nuvens profundas. Neste trabalho, foi analisado o comportamento de alguns índices de instabilidade para diferentes taxas de precipitação. Foram utilizados os dados SYNOP (1996 a 2014), provenientes de estações meteorológicas das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, para as quais também estavam disponíveis os dados das sondagens atmosféricas. Os dados coletados foram categorizados em três intervalos de classe de interesse de acordo com os registros dos acumulados pluviométricos: acima de 60 mm/dia (classe 1 – chuva intensa), entre 60 mm/dia e 5 mm/dia (classe 2 – chuva moderada) e abaixo de 5 mm/dia (classe 3 – chuva fraca/não chuva). Os eventos de chuvas intensas (classe 1) mais frequentes ocorreram associados à atuação de Sistemas Frontais, desta forma optou-se por selecionar, para as três classes, eventos de chuva que estivessem associados à esse sistema. Ao final, 12 eventos de chuvas intensas foram identificados. De forma a uniformizar as classes, foram selecionadas também 12 eventos das classes 2 e 3, onde todos os casos com chuva (fraca e moderada) também estavam associados a Sistemas Frontais. Os casos sem chuva (precipitação igual a zero) da classe 3 não tinham nenhum sistema associado. Foram calculados cinco índices de instabilidade para as três classes de precipitação (12 eventos em cada). Os índices K, *Total Totals* (TT) e *Severe Weather Threat* (SWEAT) se destacaram como bons indicadores nos casos de chuvas moderadas a intensas (classes 1 e 2). Os índices *Lifted Index* (LI), Índice *Showalter* (IS) e *Convective Potential Available Energy* (CAPEv), entretanto, não caracterizam bons resultados para os eventos de chuva analisados (associados com sistemas frontais). A análise combinada entre os índices K, TT e SWEAT também se mostrou eficiente como um indicador atmosférico para a ocorrência de chuvas moderadas a intensas.

**Palavras-chave:** Índice K; Índice TT; SWEAT; Sistemas Frontais, precipitação

### Abstract

Intense precipitations events have low predictability; however, they can cause many losses, both, material, and human. In this paper, analyses of instability indexes for different precipitation rates were made with the goal of helping weather forecasters. These indexes can indicate if the atmosphere is conducive to deep cloud formation. Weather station data with radiosondes in South and Southeastern Brazil (1996 to 2014) are used. The events are split into three classes, according to precipitation volume: daily volumes greater than 60mm are class 1 (intense rain), daily volumes between 5 and 60 mm are class 2 (moderate rain), and daily volumes smaller than 5mm are class 3 (low/no rain). The intense rainfall events most frequent (class 1) were associated with Frontal Systems, so it was decided to select rainfall events associated with this system for the three classes. A total of twelve events of intense precipitation were identified. In order to standardize the classes, 12 events of classes 2 and 3 were also selected, where all the cases with rain (weak and moderate) were also associated with Frontal Systems. Cases without rain (precipitation equal to zero) of class 3 did not have a meteorological system associated. It was calculated five instability indexes for three precipitation classes (twelve events each). The results show that K-Index (K), Total Totals (TT) and Severe Weather Threat (SWEAT) indexes are good indicators for moderate and intense precipitation (classes 1 and 2). In the other hand, Lifted Index (LI), Showalter Index (SI) and Convective Potential Available Energy (CAPEv) indexes are poor indicators for these precipitation events analyzed (associated with frontal systems). The combined analysis among K, TT and SWEAT indexes was also efficient as an indicator for moderate to intense precipitation.

**Keywords:** K-Index; TT index; SWEAT; Frontal Systems; precipitation

## 1 Introdução

A previsão da precipitação e, principalmente quando associada a tempestades severas, é de extrema importância para a sociedade. As tempestades convectivas severas têm seus núcleos muito intensos, provocando rajadas e/ou precipitações intensas. Os sistemas atmosféricos responsáveis por causar precipitação intensa possuem baixa previsibilidade, devido as suas escalas espacial e temporal. A maior parte das nuvens que causam precipitação possui um tamanho menor que a resolução espacial da maioria dos modelos atmosféricos operacionais utilizados nos centros de previsão do tempo (Boucher *et al.*, 2013; Chan *et al.*, 2014). Além disso, uma nuvem cumulonimbus pode desenvolver-se, atingir o estágio maduro (nuvem bigorna), precipitar e se dissipar dentro de uma hora (Mapes *et al.*, 2006). Por essa razão, a busca por técnicas diferentes das comumente aplicadas e que destaquem as condições de intensa instabilidade convectiva e cisalhamento vertical do vento é de grande importância.

Segundo Nascimento (2005), existe estratégias específicas para a previsão de tempo severo no Brasil que ainda precisam ser discutidas. Para isso é necessário: (i) conhecer melhor os ambientes atmosféricos sinóticos e de mesoescala propícios ao desenvolvimento de tempestades severas no Brasil; (ii) estudar os procedimentos que maximizem a extração de informações relevantes aos dados observacionais e de modelos de mesoescala que identifiquem esses ambientes atmosféricos, visando uma implementação operacional. Tal estratégia envolve o cálculo de parâmetros meteorológicos que destaquem de forma objetiva e concisa as condições conducentes ao desenvolvimento de convecção severa.

Os índices de instabilidade foram definidos pela *American Meteorological Society* (AMS) como uma medida do potencial atmosférico para a formação de atividade convectiva através do seu perfil atmosférico. Esses índices podem ser separados em cinemáticos e termodinâmicos. Os índices cinemáticos são aqueles associados aos eventos de rajadas de ventos e fisicamente eles estão relacionados ao rotacional das massas de ar. Já os termodinâmicos são mais relacionados com a precipitação, já que os mes-

mos são associados com a rápida ascensão das parcelas de ar na atmosfera (Weisman & Klemp, 1982; Nascimento, 2005; Hallak & Pereira Filho, 2012).

Em estudos prévios, foi sugerido o uso de índices de instabilidade como uma ferramenta para a análise de eventos de precipitação, vento e outros (Houze, 1993; Silva Dias, 2000; Nascimento, 2005; Hallak & Pereira Filho, 2012; Da Silva *et al.*, 2015; Nascimento *et al.*, 2016; Machado *et al.*, 2017; Da Silva *et al.*, 2017, Da Silva *et al.*, 2018). Segundo Doswell III & Schultz (2006) os índices são ferramentas diagnósticas, isso por que elas evidenciam o potencial da atmosfera, que, não necessariamente é um prognóstico. Entretanto alguns trabalhos calcularam esses índices a partir de previsões de modelo (e.g. Da Silva *et al.*, 2015; Machado *et al.* 2017). Apesar de já existirem há décadas, o comportamento desses índices para o território brasileiro ainda é pouco explorado, sendo utilizados majoritariamente os limiares estabelecidos para outras regiões, em geral, no Hemisfério Norte (eg. Da Silva *et al.*, 2017).

O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de alguns índices de instabilidade para casos de chuvas intensas, moderadas e fracas ou sem chuvas, analisando qualitativamente, quantitativamente e estatisticamente o comportamento dos mesmos. Na Seção 2, serão abordadas as definições dos índices de instabilidade analisados neste trabalho. Na Seção 3, a descrição dos dados e metodologias utilizadas. Na Seção 4, serão apresentadas as análises e resultados. As principais conclusões serão abordadas na Seção 5.

## 2 Índices de Instabilidade

Existem diferentes índices de instabilidade já calculados em diversos trabalhos, entretanto, os índices mais comuns utilizados para a previsão de tempestades convectivas são os índices K, TT (Índice *Total Totals*), IS (Índice *Showalter*), LI (Índice de Levantamento), SWEAT (*Severe Weather Threat*) e CAPE (*Convective Potential Available Energy* - Energia Potencial Convectiva Disponível).

O índice K é definido por George (1960) e necessita das temperaturas do ar e do ponto de orvalho das sondagens nos níveis de 700 e 850 hPa e a tem-

peratura do ar no nível de 500 hPa. Ele é calculado pela Equação (1):

$$K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}) [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

Onde T é a temperatura do ar, Td a temperatura do ponto de orvalho e 850, 700 e 500, os níveis de pressão (hPa) onde são medidas essas temperaturas.

Valores acima de 30°C são considerados potencialmente favoráveis à formação de tempestades. Valores acima de 40°C são extremamente favoráveis à formação de tempestades, segundo critério pré-estabelecido pela literatura (Henry, 1987).

Quando se fala do índice K, é importante ressaltar que uma camada seca em 700 hPa pode afetar o valor de K. Isso implica que a temperatura em 700 hPa seria muito maior que a temperatura do ponto de orvalho em 700 hPa, que diminui consideravelmente o valor do índice K.

O índice TT é definido por Miller (1972). Para seu cálculo, é preciso que se tenham as temperaturas do ar nos níveis de 850 e 500 hPa e a temperatura do ponto de orvalho de 850 hPa. Para o cálculo de TT, utiliza-se a seguinte Equação (2):

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500} [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

Onde os significados dos termos são equivalentes ao do índice K. Valores de TT a partir de 40°C indicam uma atmosfera favorável à formação de tempestades. E acima de 50°C, indicam uma atmosfera extremamente favorável à formação tempestade severa (Henry, 1987).

O índice TT exige calor e umidade em 850 hPa e frio em 500 hPa e não restringe a umidade em 700 hPa. Se houver uma camada seca em 700 hPa isso não afeta TT. Portanto, quando ambos os índices K e TT são altos a tendência será ocorrer chuvas torrenciais (Silva Dias, 2000). Se K é baixo e TT é alto, então a tendência será ocorrer ventanias, uma vez que a camada seca evapora as gotas, provocando o resfriamento do ar e correntes descendentes intensas.

O índice CAPE (Houze, 1993) é a área positiva de um diagrama termodinâmico (Skew T- Log P)

e ele pode ser calculado, tanto através das temperaturas da parcela em elevação e do ambiente, como também das temperaturas virtuais dos mesmos. Neste trabalho, será utilizada a temperatura virtual ao invés da temperatura do ar, que é uma metodologia aplicada no trabalho de Silva Dias (2000), definida pela equação (5):

$$CAPE_v = g \int_{NCC}^{NE} \frac{T_{vp} - T_{va}}{T_{va}} dz \quad [\text{J/kg}] \quad (5)$$

O termo g é a gravidade, T<sub>vp</sub> e T<sub>va</sub> (K) são, respectivamente, as temperaturas virtuais da parcela e do ambiente. O NCC é o nível de condensação convectiva e o NE é o nível de equilíbrio da parcela de ar. São esperados valores de CAPE maiores do que 2000 J/kg em casos de supercélulas (Houze, 1993).

O índice de levantamento (LI) foi definido por Galway (1956) como (3):

$$LI = T_{500} - T'_{500} [^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

Onde é a temperatura do ar em 500 hPa e é a temperatura obtida através do levantamento de uma parcela de ar da superfície até 500 hPa. Neste trabalho foi utilizado o método da *Surface Based LI* (SBLI), que é quando se faz o levantamento da parcela de ar da superfície até o nível médio de 500 hPa.

Segundo Nascimento (2005), operacionalmente é comum calcular-se o LI para a parcela de ar de superfície para o horário em que o perfil é obtido. Também é útil calcular o LI da parcela mais instável entre a superfície e os primeiros 300 hPa. O LI é uma informação importante para analisar o grau de instabilidade atmosférica, especialmente quando combinada com a CAPE.

O índice de instabilidade Showalter (Showalter, 1947) é definido como (4):

$$IS = T_{500} - T''_{500} [^{\circ}\text{C}] \quad (4)$$

Onde é a temperatura do ar em 500 hPa e é a temperatura obtida pelo levantamento da parcela de ar em 850 hPa até o nível de 500 hPa.

O IS e LI denotam apenas a instabilidade da camada (no LI, da superfície até 500 hPa e no IS, de 850 a 500 hPa) e são negativos (menor que  $-3^{\circ}\text{C}$ ) quando há umidade e calor nos níveis baixos e ar frio em 500 hPa (Silva Dias, 2000).

O índice SWEAT (Miller, 1972) é um índice adimensional dinâmico e termodinâmico que foi elaborado majoritariamente para o Hemisfério Norte. Ou seja, os termos da equação levam em conta algumas considerações que são válidas somente naquele hemisfério. Porém, neste trabalho será utilizada a metodologia aplicada por Nascimento (2005) que adapta o índice SWEAT para o Hemisfério Sul. Sendo a sua definição dada por:

$$SWEAT = 20(TT - 49) + 12Td_{850} + 2V_{850} + V_{500} + [125(C)] \quad (6)$$

Onde,  $T_d$  é a temperatura do ponto de orvalho ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{dir}$  é a direção do vento em graus e  $V$  é a velocidade do vento em metros por segundo. Nota-se que o índice  $TT$  é utilizado no cálculo do índice SWEAT.

Segundo Nascimento (2005), na equação do índice SWEAT se o valor de  $TT$  for menor que 49 este termo deverá ser igualado a zero. Se  $Td_{850}$  for menor que zero este termo também será igualado a zero. O termo  $C$  deverá ser desprezado se pelo menos uma das seguintes condições não for satisfeita: 1) direção do vento em 850 hPa deve estar entre  $290^{\circ}$  e  $360^{\circ}$  ou entre  $0^{\circ}$  e  $50^{\circ}$ ; 2) direção do vento em 500 hPa deve estar entre  $230^{\circ}$  e  $330^{\circ}$ ; 3) deve ser negativo, com a consideração importante de que caso a direção do vento em 850 hPa esteja entre  $0^{\circ}$  e  $50^{\circ}$ , deve-se somar 360 ao valor da direção em 850 hPa antes de calcular; 4) tanto  $V_{850}$  quanto  $V_{500}$  devem ser pelo menos 15 nós. Para a formulação original do índice (para o Hemisfério Norte), valores de SWEAT acima de 300 são considerados indicativos de situações propícias a tempestades severas (Miller, 1972).

### 3 Dados e Métodos

Primeiramente, foi criado um conjunto com os dados observacionais SYNOP de 1996 a 2014, obtidos na página do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Tais dados são provenientes das estações meteorológicas das Regiões Sul

e Sudeste do Brasil para as quais também há a disponibilidade dos dados de sondagens atmosféricas. As estações meteorológicas utilizadas neste trabalho são: Rio de Janeiro (Galeão), Santa Catarina (Florianópolis), Paraná (Curitiba) e Rio Grande do Sul (Porto Alegre), todas pertencentes ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

Os dados foram separados em três diferentes classes de eventos: classe 1 – chuva intensa (acima de 60 mm/dia); classe 2 – chuva moderada (entre 5 e 60 mm/dia) e classe 3 – chuva fraca/não chuva (menor do que 5 mm/dia). Segundo o *International Meteorological Vocabulary* (WMO182, 1983), um evento de precipitação intensa ocorre quando a taxa de acumulação excede um valor específico. O limiar utilizado nesse trabalho (60 mm/dia) foi uma adaptação do limiar utilizado no *Severe Weather Information Center* (50 mm/dia - <http://severe.worldweather.wmo.int/rain/>), após avaliação de todos os casos de chuva disponíveis nas estações citadas acima.

Utilizando as cartas sinóticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e as imagens de satélite (CPTEC/INPE), foi realizada uma avaliação preliminar dos ambientes sinóticos, e verificou-se que os casos de chuvas intensas (classe 1) mais frequentes estavam associados a atuação de sistemas frontais (não mostrado). Optou-se então por realizar uma segunda triagem, selecionando somente os casos de chuvas (classe 1) intensas que estivessem sobre a atuação desse sistema. Ao final, 12 eventos de chuvas intensas foram identificados. De forma a uniformizar as classes, foram selecionadas também 12 eventos das classes 2 e 3, onde todos os casos com chuva (fraca e moderada) também estavam associados a Sistemas Frontais. Os casos sem chuva (precipitação igual a zero) da classe 3 não tinham nenhum sistema associado.

Após essa segunda triagem, foram utilizados dados das sondagens atmosféricas nessas estações, extraídos do site da Universidade do *Wyoming*, nos dias dos eventos (12 em cada classe). Calcularam-se então os seguintes índices de instabilidade: CAPEv, SWEAT, K, TT, IL e IS (vide Seção 2), utilizando software Excel. A escolha de qual sondagem do dia do evento utilizada para calcular os índices obedeceu ao seguinte critério: através das imagens de sa-

télite do dia do evento, verificou-se em que em qual horário ocorreu o núcleo mais intenso sobre a região do evento; escolheu-se então a sondagem do horário imediatamente anterior a esse horário de máxima convecção sobre a região do evento.

Primeiramente, construíram-se gráficos com as distribuições dos índices de instabilidade para todos os 36 casos em relação aos limiares conhecidos na literatura (vide Seção 2). Uma vez que não há limiares estabelecidos para a adaptação do SWEAT para o Hemisfério Sul, foram adotados os valores de 200 e 250. Em todos os casos analisados, não houve valores do CAPEv acima de 2000 J/kg, neste caso, definiu-se os limiares de 500 e 1000 J/kg para a análise da distribuição dos casos. Além da distribuição, foram calculados parâmetros estatísticos para os índices de instabilidade, tais como, média e desvio padrão (DP); confeccionadas tabelas de contingência (TC) para cada classe e realizado uma análise concomitante dos índices – K com o TT, LI com o IS e CAPEv com o SWEAT.

No intuito de corroborar os resultados estatísticos, será apresentada neste artigo a avaliação do comportamento dos índices em três estudos de caso, um para cada classe respectivamente. Para isso, serão utilizados os diagramas Skew T- Log P das respectivas sondagens (disponibilizados pela Universidade de Wyoming). Também serão apresentadas as análises sinóticas desses casos. Além das cartas sinóticas (DHN) e imagens de satélite, utilizou-se para a análise sinótica dos estudos de caso, as saídas diárias da Reanálise II (Kanamitsu *et al.*, 2002), do *National Center Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR)

para a confecção dos seguintes campos: advecção de temperatura em 850 hPa, altura geopotencial em 850, 500 e 200 hPa, vento em 850 e 200 hPa e omega em 500 hPa.

#### 4 Resultados

Nas Tabelas de 1 a 3, são mostrados os índices calculados para os 36 casos. Sendo a Tabela 1 referente aos casos de classe 1; a Tabela 2, aos da classe 2 e a Tabela 3, aos da classe 3 respectivamente. As Tabelas mostram os valores da precipitação, dos índices (K, TT, IS, LI, SWEAT e CAPEv) e a sigla da estação do aeródromo referente ao índice calculado. De uma forma geral, nota-se coerência com a literatura, em especial para os índices K e TT no caso de chuvas moderadas e intensas (Tabelas 1 e 2). Esse resultado está em conformidade com os trabalhos de Da Silva *et al.* (2018), Da Silva *et al.* (2017), Machado *et al.* (2017); Vasconcellos & Cavalcanti (2010), Silva Dias (2000), Nascimento (2005) e Henry (1987). Da Silva *et al.* (2015) avaliaram indicadores atmosféricos em eventos de chuva que ocorreram na cidade do Rio de Janeiro, a partir das saídas de simulações feitas com o modelo numérico WRF. Eles encontraram limiares maiores que os da literatura para as simulações dos casos pelo modelo. Os casos de chuva fraca/não chuva (Tabela 3), em geral, possuem valores baixos para os índices K, TT, SWEAT e CAPEv e valores positivos para os índices LI e IS.

Na Figura 1 são apresentados os valores dos índices de instabilidade para cada um dos 36 casos

DATA	Precip. acumulada (mm)	K (°C)	TT (°C)	IS (°C)	LI (°C)	SWEAT	CAPEv (J/Kg)	Estação
20/10/2007	111	33	44,9	0,28	2,1	204	0	SBGL
07/02/2004	81	32,5	42,1	1,57	-1,12	205,4	262,5	SBGL
07/10/2006	93	37,5	45	-0,8	0,14	224,2	11,11	SBGL
11/12/2013	82	40,7	46,2	-2,4	-2,82	253,2	741,75	SBGL
17/02/1996	103	32,2	48,5	-2,1	-3,5	204	1315	SBPA
17/07/1997	133	33	46,3	1,4	2,2	183	0	SBPA
13/03/1998	122	36	45	-0,2	3,1	x	0	SBPA
23/01/2003*	111	46,2	51,4	-3,3	-4	275	523,5	SBPA
23/09/2007	86	37	47	-0,1	3,6	227	12,41	SBPA
26/03/2006	91	38	47	-2,1	-2,8	228	842	SBCT
12/12/2007	86	37,3	49	-3	-3,7	260	800	SBCT
11/02/2011	93	38	42	0,8	0,6	245	87,9	SBCT

Tabela 1 Índices de instabilidade calculados para os casos de classe 1. O evento marcado com \* foi utilizado no estudo de caso.

**Análise de Índices de Instabilidade em Casos de Chuva Intensa, Chuva Moderada e Chuva Fraca/sem Chuva nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil**

Luiz Felipe Rodrigues do Carmo; Fernanda Cerqueira Vasconcellos;  
Wallace Figueiredo Menezes & Eduardo Charles Vasconcellos

DATA	Precip. Acumulada (mm)	K (°C)	TT (°C)	IS (°C)	LI (°C)	SWEAT	CAPEv (J/Kg)	Estação
03/05/2003	26	36,5	45,6	-0,59	-2,76	227,2	857,66	SBGL
26/08/2003	30	25,6	43,2	3,3	2,6	152,02	11,65	SBGL
27/08/2003	33	26,6	41,1	4,2	5,15	168,1	0	SBGL
03/11/2003	23	35	44	0,5	-1,1	197	358,2	SBGL
02/01/2004	24	37	43	0,4	-1,7	207,3	606	SBGL
16/01/2004	30	37,2	44,8	-0,4	-3,35	221	1428	SBGL
17/02/2004	33	34	43	0,5	-1,2	228	903	SBGL
07/11/2004	23	37,6	45,7	-1,2	-2,8	208,3	762	SBGL
23/12/2004	28	29,2	35,8	5,7	4	190	53,6	SBGL
23/01/2005	28	34,2	43,2	0,2	-3	212	1727,2	SBGL
11/12/2005*	26	33,4	37,9	3,1	2,9	208,2	538	SBGL
20/05/2007	31	33,2	42	2,4	13	190	0	SBGL

Tabela 2  
Índices de instabilidade calculados para os casos de classe 2. O evento marcado com \* foi utilizado no estudo de caso.

DATA	Precip. acumulada (mm)	K (°C)	TT (°C)	IS (°C)	LI (°C)	SWEAT	CAPEv (J/Kg)	Estação
03/08/2015	0	-21,3	33	8,7	7,3	105	0,08	SBGL
14/06/2008	0	-12	23	16,5	14,3	187	0	SBPA
20/03/2014*	0	26,6	38,6	4,56	1,31	X	46	SBPA
11/01/2010	0,9	35	43	-0,18	0,56	218	163	SBPA
11/03/2010	1	27	40	3,91	2,2	172	0	SBFL
29/05/2010	1	-17	44	2,9	5,6	179	0	SBPA
10/01/2011	0,4	31	45	0,9	-1,3	179	335	SBPA
19/03/2010	1	10,4	34	8,9	5,6	20	0	SBPA
04/08/2015	0,1	-19,1	35,8	6,5	7,8	96	0	SBPA
05/08/2015	0,6	-22,1	33,8	9,2	6,7	57	0	SBPA
25/05/2011	0,7	21,5	33,8	9,7	6,6	40	0	SBPA
26/05/2011	0,3	31	44	2,8	1,3	215	0	SBPA

Tabela 3  
Índices de instabilidade calculados para os casos de classe 3. O evento marcado com \* foi utilizado no estudo de caso.

de chuva em relação as suas respectivas classes e aos limiares comumente utilizados (retas pretas em destaque nos gráficos). O objetivo é analisar o comportamento de cada índice de acordo com as classes nas quais os casos de chuvas foram categorizados.

Na Figura 1A é apresentada a distribuição dos valores de K para cada um dos 36 casos em relação aos limiares de 30° e 40°C. Nota-se que para casos de chuva intensa – classe 1 - (losango) o índice K poucas vezes ficou acima de 40°C, mas em todas as vezes, ficou acima de 30°C. Já nas classes 2 (quadrado) e 3 (triângulo), valores menores do que 30°C foram observados e nenhum dos resultados de K encontrados para essas classes ultrapassaram os 40°C. Com relação ao índice TT (Figura 1B), todos os eventos da classe 1 apresentaram valores acima de 40°C. Além disso, em 75% das ocorrências foram encontrados valores de TT igual ou acima de 45°C. Já nas classes 2 e 3 apenas 13% dos casos tiveram valores

iguais ou acima de 45°C, evidenciando a criticidade de valores de TT maiores do que 45°C.

A análise da distribuição do índice IS (Figura 1C) revelou que os casos de classe 1 tiveram aproximadamente 70% de valores negativos, porém, verificou-se apenas um valor igual e um valor abaixo de -3°C. Em relação às outras duas classes, apenas 17% dos valores foram negativos. Logo, verificou-se que o índice IS não foi um bom índice para utilizar nos casos de chuvas intensas analisadas neste trabalho. A Figura 1D mostra a distribuição do índice LI. Os casos de classe 1 tiveram 50% de valores negativos, porém, tiveram apenas três eventos com valores abaixo de -3°C. Com relação à classe 2, cerca de 58% dos valores foram negativos. Assim como o IS, o índice LI também não se mostrou como um bom índice para os casos de chuvas intensas analisados.

Para o SWEAT (Figura 1E), a distribuição mostra que 92% dos eventos da classe 1 estão acima

Análise de Índices de Instabilidade em Casos de Chuva Intensa, Chuva Moderada e Chuva Fraca/sem Chuva nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil

Luiz Felipe Rodrigues do Carmo; Fernanda Cerqueira Vasconcellos; Wallace Figueiredo Menezes & Eduardo Charles Vasconcellos

de 200. Por outro lado, nos casos de classe 2 e 3 apenas 39% foram maiores, sendo 58% para classe 2 e 18% para a classe 3. Já no limiar de 250, consegue-se ver um resultado interessante. Nos casos de classe 1, 25% dos casos estudados obtiveram resultados acima de 250. Já nos casos de classe 2 e 3, não se tiveram registros de valores acima de 250. Na Figura 1F se encontram os valores da CAPEv em cada uma das 3 classes comparando ao valor de 500J/kg e 1000J/kg, respectivamente. Quando comparados aos valores de 500 J/kg, tiveram 42% destes casos maiores, enquanto nos casos de classe 2, foram 58% maiores e nenhum para a classe 3. Utilizado o limiar de 1000 J/kg, nos casos de classe 1, 8% dos casos estudados ultrapassaram. Já nos casos de classe 2,

foram 17% acima. Não se teve registro de nenhum caso acima deste valor na classe 3.

Na Figura 2 estão calculadas as estatísticas (médias e DPs) de cada um dos índices de instabilidade analisados neste trabalho. No índice K, pode-se notar que as médias foram de 36,7°C, 33,3°C e 7,58°C, para as classes 1, 2, e 3, respectivamente. O DP de K foi pequeno em relação às médias nas classes 1 e 2 com valores de 4,1°C em ambos. Já na classe 3, o DP foi alto, de 23,7°C. Com isso, pode-se notar que não há uma grande variabilidade nos valores de classe 1 e 2 para o índice K. Para o índice TT, as médias foram de 46,2°C, 42,4°C e 37,3°C,

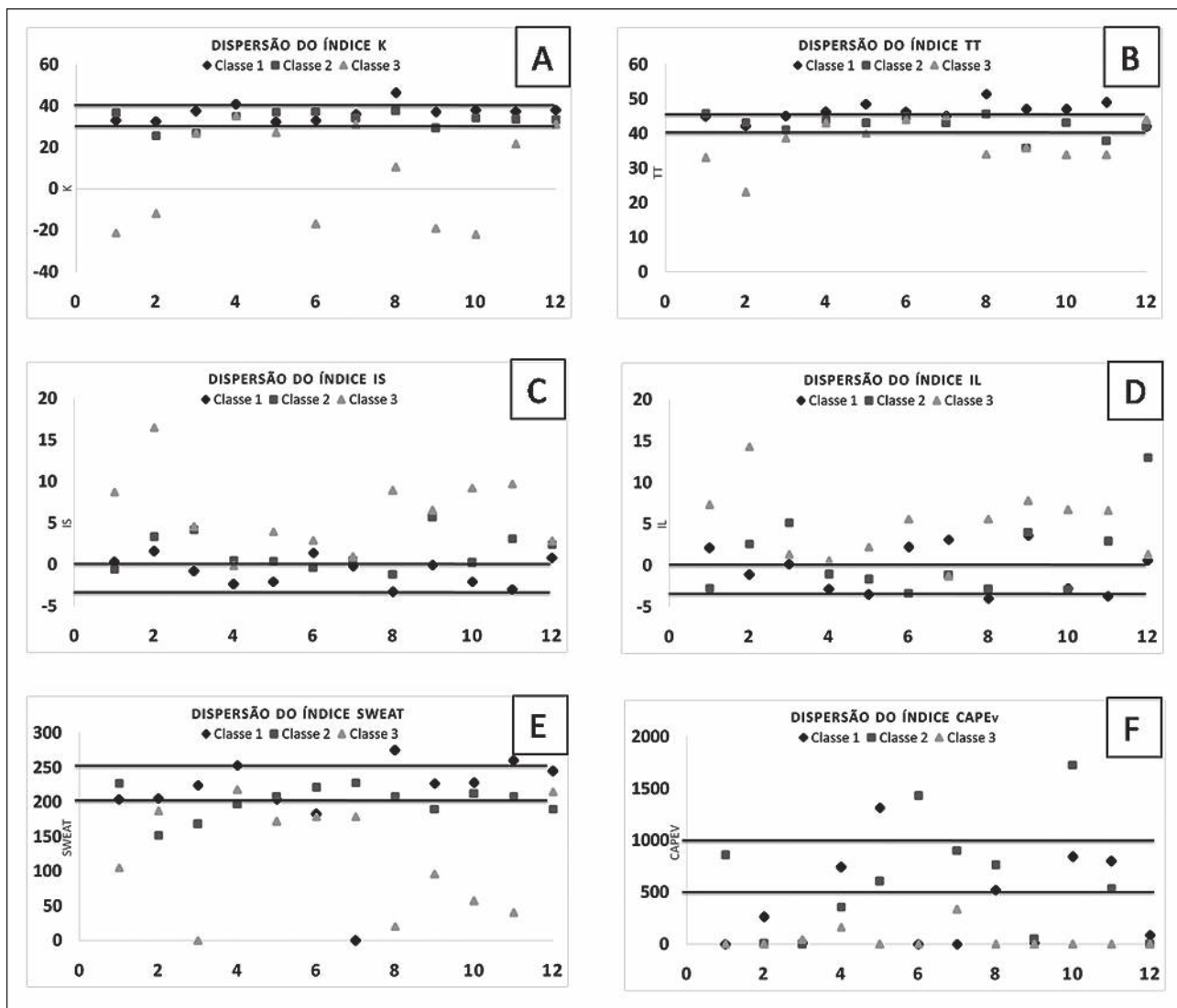


Figura 1 Dispersão dos valores dos índices. A. K (°C); B. TT (°C); C. IS (°C); D. IL (°C); E. SWEAT; F. CAPEv (J/kg).

**Análise de Índices de Instabilidade em Casos de Chuva Intensa, Chuva Moderada e Chuva Fraca/sem Chuva nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil**

Luiz Felipe Rodrigues do Carmo; Fernanda Cerqueira Vasconcellos;  
Wallace Figueiredo Menezes & Eduardo Charles Vasconcellos

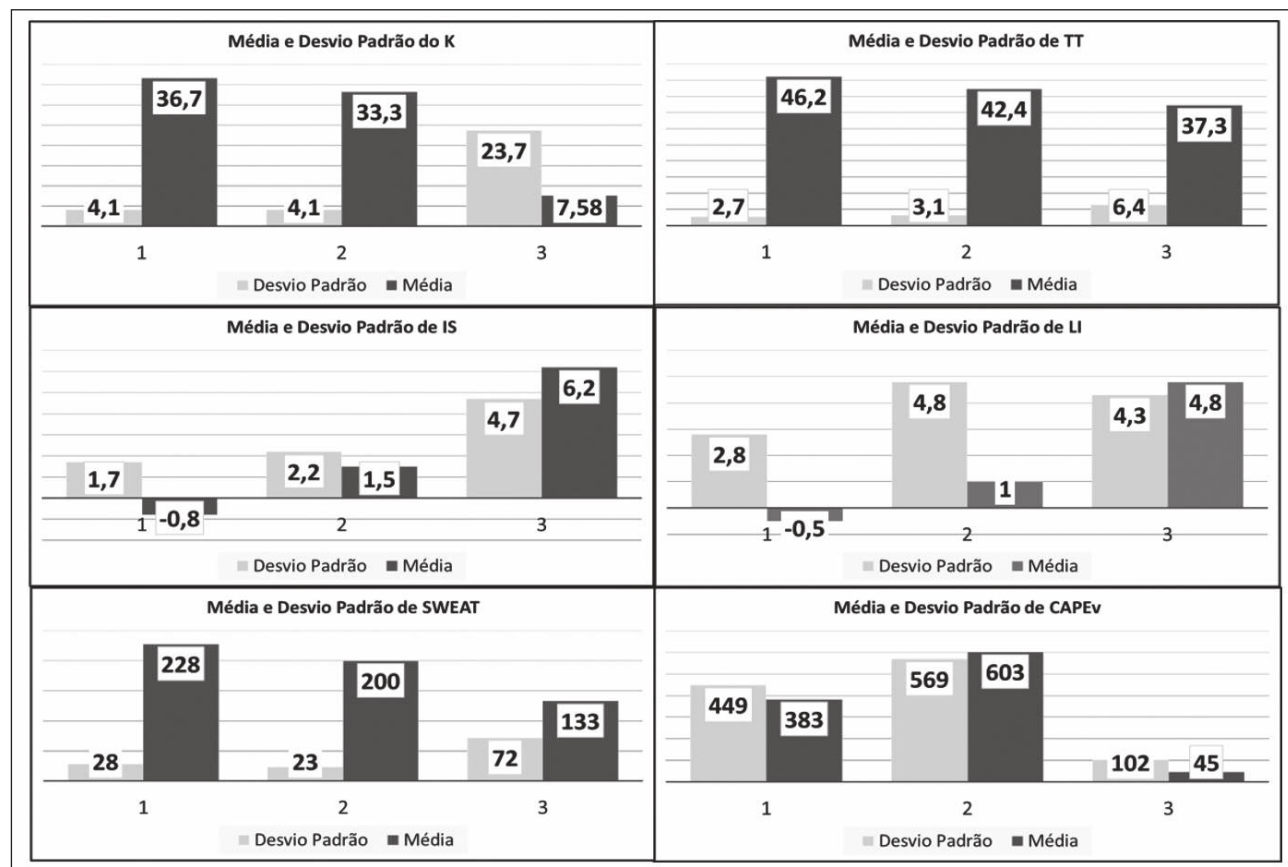
para as classes 1, 2, e 3, respectivamente. O índice TT também mostrou que não há uma grande variabilidade nos valores de cada classe, uma vez que os valores do DP de TT foi pequeno em relação às médias nas classes 1, 2 e 3 com valores de 2,7°C, 3,1°C e 6,4°C, respectivamente.

O IS apresentou médias de -0,8°C, 1,5°C e 6,2°C, para as classes 1, 2, e 3, respectivamente. O valor de DP foi alto em relação às médias nas classes 1, 2 e 3 com valores de 1,7°C, 2,2°C e 4,7°C, respectivamente. Dessa forma, há uma grande variabilidade nos valores de classe 1, 2 e 3 para o índice IS. No LI o DP foi alto em relação às médias nas classes 1, 2 e 3 com valores de 2,8°C, 4,8°C e 4,3°C, respectivamente. Com isso, pode-se notar que há uma grande variabilidade nos valores de classe 1, 2 e 3 para o índice LI. Já as médias foram de -0,5°C, 1,0°C e 4,8°C, para as classes 1, 2, e 3, respectivamente.

O DP do SWEAT foi pequeno em relação às médias nas classes 1 e 2 com valores de 28 e 23,

respectivamente. Com isso, pode-se notar que não há uma grande variabilidade nos valores de classe 1 e 2 para o índice SWEAT. Já na classe 3, o DP foi um pouco maior, de 72. As médias do SWEAT foram de 228, 200 e 133, para as classes 1, 2, e 3, respectivamente. Por fim, pode-se notar que o DP do CAPEv foi alto em relação às médias nas classes 1, 2 e 3 com valores de 449J/kg, 569J/kg e 102J/kg, respectivamente, mostrando que há uma grande variabilidade nos valores de classe 1, 2 e 3. As médias do CAPEv foram de 383J/kg, 603J/kg e 45J/kg, para as classes 1, 2, e 3, respectivamente. Silva et al. (2018), avaliou eventos de inundações em Petrópolis-RJ associados à sistemas frontais, Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e à sistemas convectivos isolados. Eles também encontraram baixos valores de CAPE nos casos relacionados à sistemas frontais e sugeriram que pode estar relacionados à padrões de precipitação estratiforme típicos desses eventos.

Para entender melhor uma possível relação



**Figura 2** Média e DP dos índices K (°C), TT (°C), IS (°C), LI (°C), SWEAT, e CAPEv (J/Kg), para as classes 1-3.



conjunta dos índices, foram construídas TC para cada classe de chuva comparando os índices que tiveram melhores resultados (K, TT, SWEAT), utilizando os seus respectivos limiares (Tabela 4). Na comparação dos resultados para o índice K e TT, pôde-se notar que em todos os casos da Classe 1, os valores ultrapassaram concomitantemente os limiares de 30°C, para o K, e 40°C, para o TT (Tabela 4A). Para a Classe 2, a maioria (67%) também superou concomitantemente os limiares de K e TT, entretanto, não teve a totalidade, como na Classe 1 (Tabela 4D). Para a Classe 3, a maioria (58%) apresentou K menor que 30°C e TT menor que 40°C, concomitantemente (Tabela 4G). Somente 25% dos casos dessa classe ultrapassaram concomitantemente os limiares de K e TT. A suposição é que nesses casos a atmosfera estava instável, porém faltou algum elemento “gatilho” para disparar a convecção (Hane, 1986; Menezes, 1998; Cotton; Bryan & Heever, 2010). Mais de 90% dos casos da Classe 1 ultrapassaram concomitantemente os limiares de 30°C, para o K e 200, para SWEAT (Tabela 4B); assim como também ultrapassaram concomitantemente os limiares de 40°C, para o TT e 200 para SWEAT (Tabela 4C). Nos casos da Classe 2, 58% (50%) ultrapassaram os limiares de K (TT) e SWEAT concomitantemente, Tabela 4E (Tabela 4F). Já na Classe 3, somente 2 casos ultrapassaram concomitantemente os limiares de K e SWEAT (Tabela 4H) e também TT e SWEAT (Tabela 4I). Nessa classe, 72% (55%) dos casos apresentaram concomitantemente valores de K (TT) menor que 30°C (40°C) e SWEAT menor que 200.

#### 4.1 Estudo de Casos

A	K>30	K<30	B	K>30	K<30	C	TT>40	TT<40
TT>40	12	0	SWEAT>200	10	0	SWEAT>200	10	0
TT<40	0	0	SWEAT<200	1	0	SWEAT<200	1	0
D	K>30	K<30	E	K>30	K<30	F	TT>40	TT<40
TT>40	8	2	SWEAT>200	7	0	SWEAT>200	6	1
TT<40	1	1	SWEAT<200	2	3	SWEAT<200	4	1
G	K>30	K<30	H	K>30	K<30	I	TT>40	TT<40
TT>40	3	2	SWEAT>200	2	0	SWEAT>200	2	0
TT<40	0	7	SWEAT<200	1	8	SWEAT<200	3	6

Tabela 4 TC: A. Classe 1 – limiares de 30°C e 40°C para K e TT, respectivamente; B. Classe 1 – limiares de 30°C e 200 para K e SWEAT, respectivamente; C. Classe 1 – limiares de 40°C e 200 para TT e SWEAT, respectivamente; D. Mesmo que A, mas para a Classe 2; E. Mesmo que B, mas para Classe 2; F. Mesmo que C, mas para Classe 2; G. Mesmo que A, mas para a Classe 3; H. Mesmo que B, mas para Classe 3; I. Mesmo que C, mas para Classe 3.

Para corroborar o estudo estatístico dos índices de instabilidade analisados, foram realizados três estudos de caso escolhidos aleatoriamente de cada uma das classes de precipitação obtidas. Da classe 1, foi escolhido o caso do dia 23/01/2003, onde se verificou uma precipitação de 111 mm no aeroporto internacional de Porto Alegre (Tabela 1). Pode-se ver pela Figura 3 - canal de infravermelho 4 do GOES 8, às 07:09Z (A) e carta sinótica da DHN, às 12Z (B) - o ambiente sinótico do evento. Nas Figuras 3C, 3D e 3E podem-se notar campos médios diários dos níveis de 850 hPa, 500 hPa e 200 hPa, respectivamente. Da classe 2, foi escolhido o caso do dia 11/12/2005, onde obteve-se uma precipitação de 26 milímetros, no aeroporto internacional do Galeão (Rio de Janeiro) (Tabela 2). A Figura 4 é similar a Figura 3, porém para o caso da classe 2. Em relação à classe 3, foi escolhido o caso do dia 20/03/2014, do Rio Grande do Sul, na cidade de Porto Alegre, onde não houve registro de precipitação (Tabela 3). Uma vez que não havia nenhum sistema atuante (sem precipitação), não será dada ênfase ao ambiente sinótico do dia referido, apresentando apenas os índices e a sondagem nesse dia.

Em relação aos ambientes sinóticos dos casos da classe 1 e 2, é possível visualizar em ambos as características atmosféricas associadas aos sistemas frontais: i. uma advecção negativa de temperatura associada à frente em 850 hPa (Figuras 3C e 4C); ii. omega negativo indicando movimentos ascendentes naquela região onde se encontra o sistema em 500 hPa (Figuras 3D e 4D); iii. a presença de um cavado em 200 hPa à oeste da região do evento (Curitiba-

### Análise de Índices de Instabilidade em Casos de Chuva Intensa, Chuva Moderada e Chuva Fraca/sem Chuva nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil

Luiz Felipe Rodrigues do Carmo; Fernanda Cerqueira Vasconcellos;  
Wallace Figueiredo Menezes & Eduardo Charles Vasconcellos

-PR, para o caso da Classe 1 – Figura 3E; Rio de Janeiro-RJ, para o caso da Classe 2 – Figura 4E). Ressalta-se que, no casos de chuva intensa: i. o evento ocorre nas proximidades da entrada equatorial da corrente de jato de altos níveis (Figura 3E), o que é coerente com o movimento ascendente na região; ii. há um fluxo meridional em baixos níveis de latitudes mais baixas para o Paraná (Figura 3C), o que pode

indicar uma advecção de umidade vinda da região Amazônica. Essas duas características não estão presentes no caso de chuva moderada (a entrada do jato de altos níveis parece estar mais deslocada para o Atlântico – Figura 4E - e o fluxo meridional não está bem caracterizado – Figura 4C).

Na Figura 5, seguem as sondagens dos casos

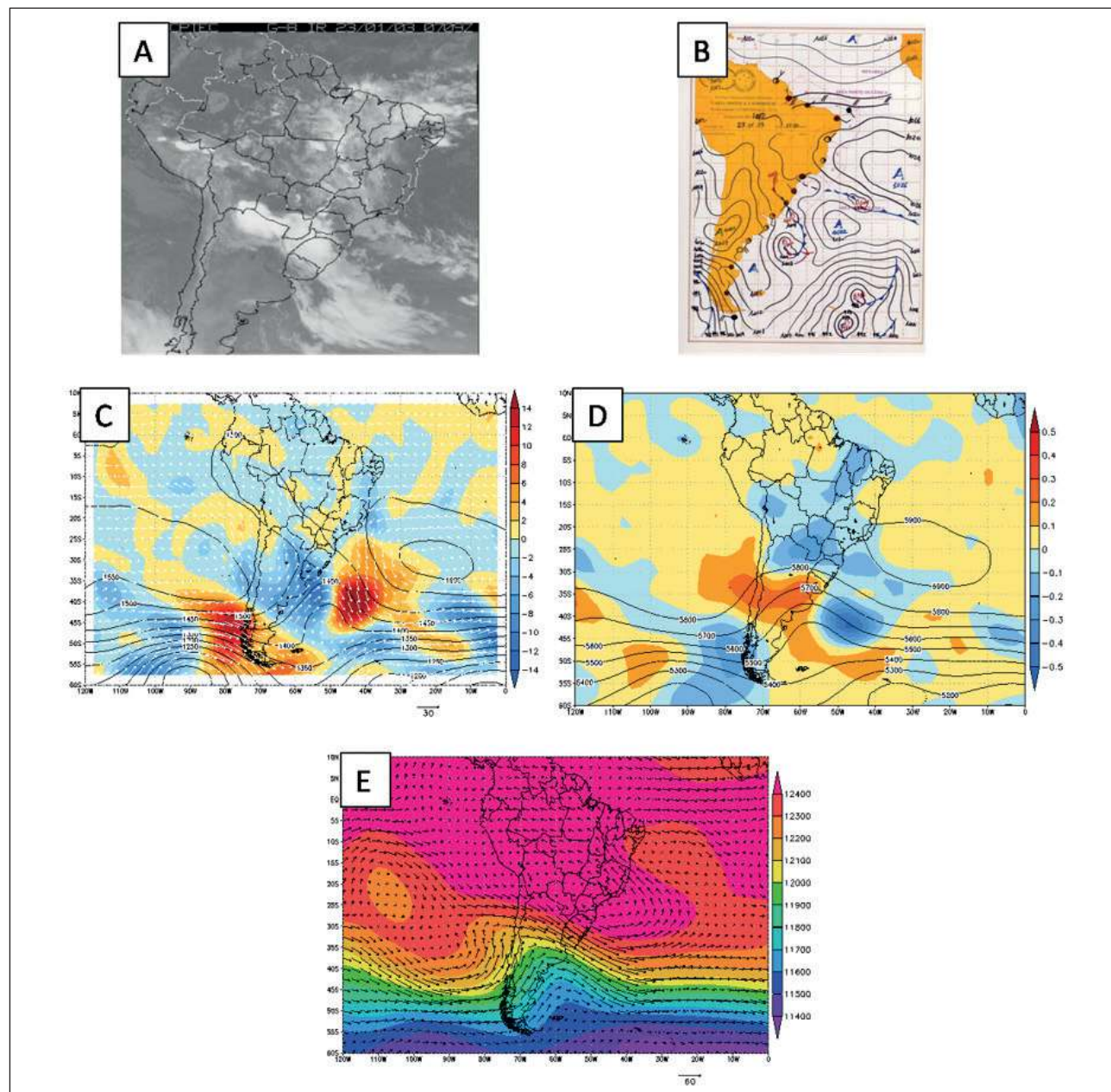


Figura 3 Análise do Evento do dia 23/01/2003 (classe 1). A. Imagem de satélite do GOES-8 (07:09Z); B. Carta sinótica da DHN (12Z); C. Advecção de temperatura ( $10^5$  °C/s - sombreado), altura geopotencial (m - contorno) e vento (vetor) em 850 hPa; D. Altura geopotencial (m - contorno) e omega (Pa/s - sombreado) em 500 hPa; E. Altura geopotencial (m - sombreado) e vento (vetor) em 200 hPa.

Análise de Índices de Instabilidade em Casos de Chuva Intensa, Chuva Moderada e Chuva Fraca/sem Chuva nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil

Luiz Felipe Rodrigues do Carmo; Fernanda Cerqueira Vasconcellos;  
Wallace Figueiredo Menezes & Eduardo Charles Vasconcellos

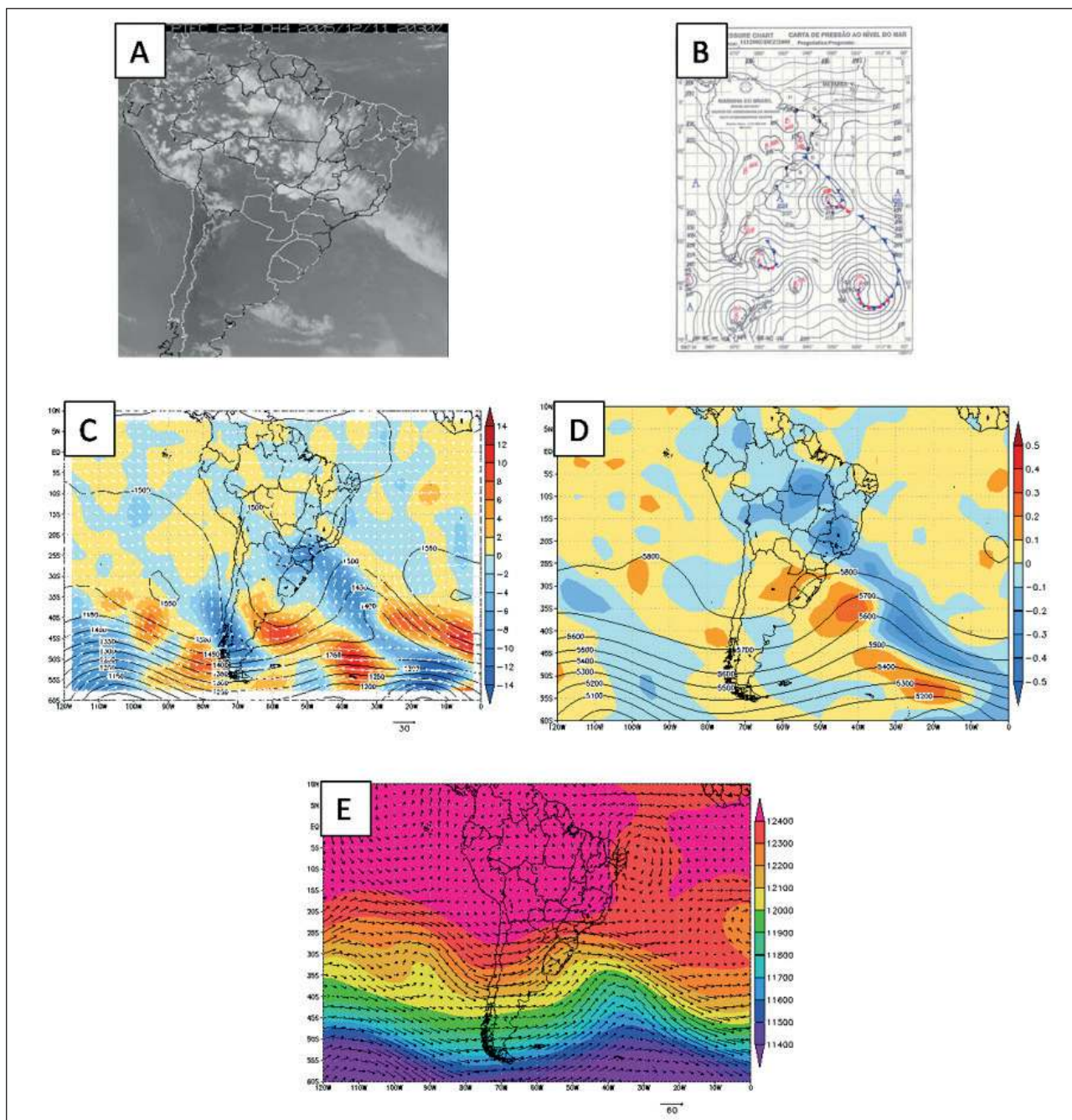


Figura 4 Análise do evento de 11/12/2005 (classe 2). A. Imagem de satélite do GOES-8 (20:30Z); B. Carta sinótica da DHN (12Z); C. Advecção de temperatura ( $10^3\text{°C/s}$  - sombreado), altura geopotencial (m - contorno) e vento (vetor) em 850 hPa; D. Altura geopotencial (m - contorno) e omega (Pa/s - sombreado) em 500 hPa; E. Altura geopotencial (m - sombreado) e vento (vetor) em 200 hPa.

das classes 1, 2 e 3, respectivamente (disponibilizadas pela Universidade de Wyoming). Na sondagem da 00Z do dia 23/01/2003 (classe 1 - Figura 5A), percebe-se uma área positiva (CAPEv igual 523,5 J/kg - Tabela 1), entretanto, há uma área negativa

também. Foi possível observar que a instabilidade atmosférica diminuiu ao longo da madrugada, tendo em vista que na sondagem das 12Z para o dia 23 (Figura 5B), não existia uma área positiva. De fato, grande parte da chuva desse caso da Classe 1 ocor-

reu antes das 12Z (não mostrado). O Sistema Frontal em aproximação pode ter interagido com a instabilidade convectiva presente as 00Z e provocado o surgimento de nuvens cumulonimbus e consequentes chuvas intensas. Ao analisar as sondagens do caso de 11/12/2005 (Classe 2 – Figuras 5 B, para à 00Z e C, para às 12Z) percebe-se que a área positiva era maior em ambos os horários, comparados aos respectivos horários do caso da Classe 1 (CAPEv, com valor de 538 J/kg – Tabela 2). Apesar da área positiva menor no caso da Classe 1 comparado ao caso da Classe 2, os outros índices calculados apresentavam valores mais favoráveis para o caso da Classe 1 (vide Tabelas 1 e 2). Ressalta-se que no caso da Classe 1, a região de ocorrência do evento encontrava-se favorecida dinamicamente e termodinamicamente devido à ação conjunta da saída do fluxo meridional em baixos níveis com a entrada equatorial do jato de altos níveis (o que não ocorreu no caso da Classe 2). Isso sugere que eventos de chuvas intensas podem estar relacionados diversos fatores atmosféricos agindo simultaneamente numa região. Esse resultado reforça a necessidade da utilização combinada de diferentes índices de instabilidade como indicadores de chuvas intensas. Na análise do caso da Classe 3, ocorrido no dia 20/03/2014 (Figura 5 E, 12Z), não é possível observar nenhum padrão relevante de instabilidade atmosférica nas sondagens referentes a esse caso, o que mostra consistência com um caso de não chuva.

## 5 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de alguns índices de instabilidade para casos de chuvas intensas, moderadas, fracas, ou sem chuvas, nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil, ocorridos entre 1996 e 2014. Todos os casos de chuva estudados estavam associados à presença de um sistema frontal, uma vez que uma análise preliminar mostrou que, nos eventos de chuvas intensas nas duas regiões, há principalmente a passagem de sistemas frontais. Houve uma grande coerência dos índices com os casos selecionados. Foi possível verificar que os índices apresentaram resultados mais significativos para os casos de chuvas intensas, que para os outros casos. Entretanto, os limiares nem sempre apresentaram os valores propostos pela literatura. Analisando os gráficos de dispersão, com as TC e as

sondagens, pôde-se notar que alguns índices apresentam resultados melhores do que outros, quando se trata da variável de precipitação. Pelos resultados verificou-se que os índices K, TT e SWEAT são os melhores para se utilizar numa possível previsão de tempestades com chuvas intensas, porque além deles serem altamente correlacionados, possuem baixo DP. Também vale ressaltar que eles têm valores bem definidos em relação aos valores de precipitação, quanto maior o K, o TT e o SWEAT, maior a possibilidade de ter uma precipitação de moderada a intensa, e isso é claramente visto nos resultados apresentados.

Os índices IS e LI embora tenham um comportamento notoriamente diferenciado, têm um alto DP, que os tornam mais difíceis de serem utilizados em uma possível previsão de aguaceiros. O índice CAPEv é de extrema importância para as tempestades severas, entretanto seus resultados não foram bons para os eventos estudados. No caso da atuação de frentes frias, a advecção de ar frio em baixos níveis e a presença de precipitação estratiforme, típica desses sistemas pode prejudicar seus resultados (Da Silva *et al.*, 2018).

As TC também mostraram o potencial da análise conjunta dos índices K, TT e SWEAT. Para o K e TT, 100% dos casos da Classe 1 apresentaram valores acima dos limiares concomitantemente. No caso das combinações K e SWEAT e TT e SWEAT, essa porcentagem foi acima de 90%. Para a Classe 2, em todas as combinações (KK e TT, K e SWEAT, TT e SWEAT), embora não tenha alcançado a totalidade dos casos, a maioria deles ultrapassaram os limiares combinados. Já nos casos da Classe 3 ocorreu o oposto. Em todas as combinações, a maioria dos casos ficou abaixo dos limiares concomitantemente.

Mais índices de instabilidades para as classes citadas precisam ser calculados. Sugere-se também como continuação deste trabalho, o uso de métodos de aprendizado de máquina para obter um conjunto de limiares para os diferentes índices associados a cada classe. Dessa forma, serão definidas, para cada classe, qual ou quais combinações de índices/limiares são mais adequadas para as classes de chuva.

## 6 Referências

Análise de Índices de Instabilidade em Casos de Chuva Intensa, Chuva Moderada e Chuva Fraca/sem Chuva nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil  
 Luiz Felipe Rodrigues do Carmo; Fernanda Cerqueira Vasconcellos;  
 Wallace Figueiredo Menezes & Eduardo Charles Vasconcellos

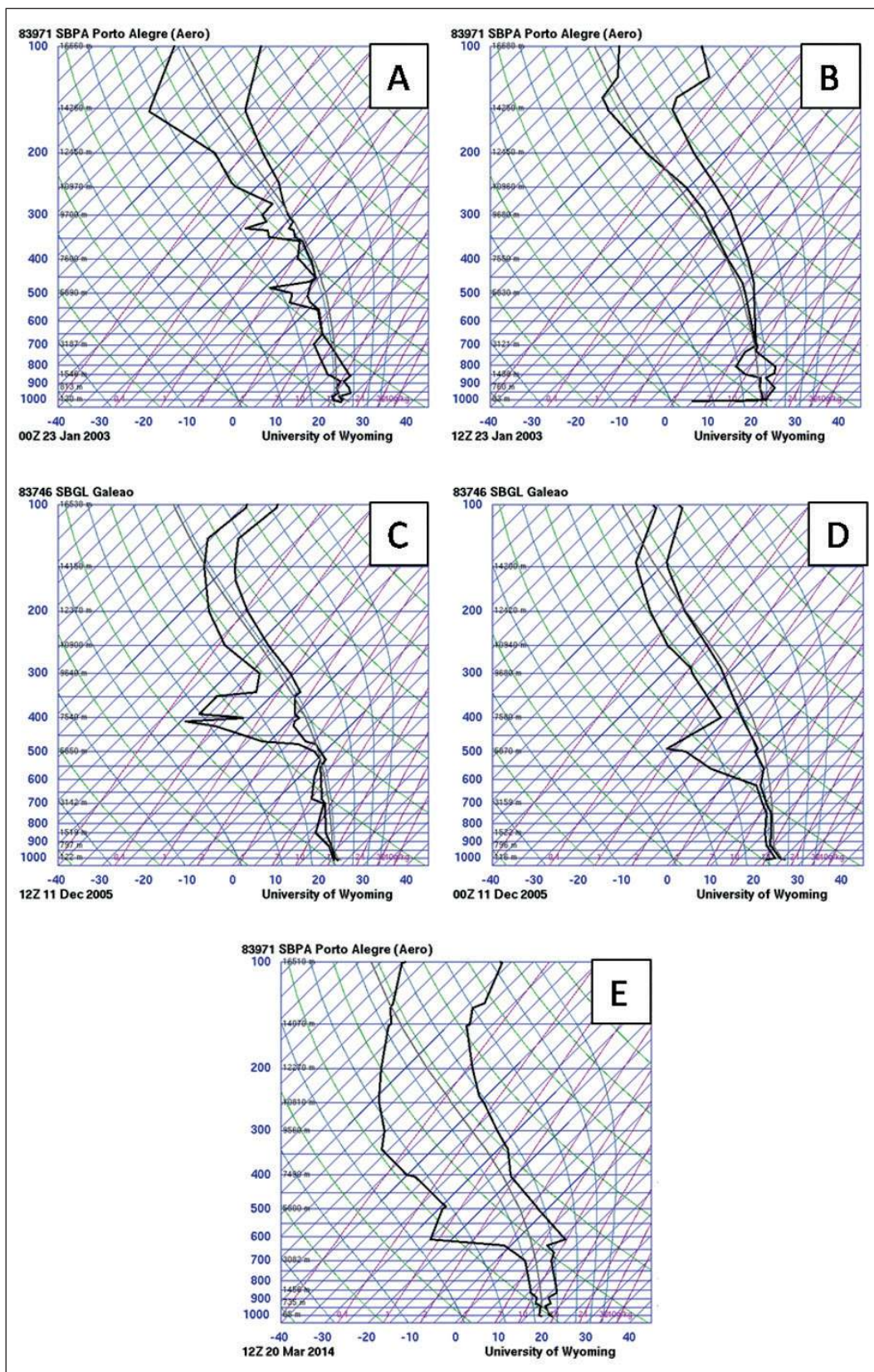


Figura 5 Sondagens para os eventos de:  
 A. classe 1 (00Z, 23/01/2003); B. classe 1 (12Z, 23/01/2003).  
 C. classe 2 (00Z, 11/12/2005);  
 C. classe 2 (12Z, 11/12/2005);  
 D. classe 3 (12Z, 20/03/2014).  
 Fonte: Universidade de Wyoming.

**Análise de Índices de Instabilidade em Casos de Chuva Intensa, Chuva Moderada e Chuva Fraca/sem Chuva nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil**

Luiz Felipe Rodrigues do Carmo; Fernanda Cerqueira Vasconcellos;  
Wallace Figueiredo Menezes & Eduardo Charles Vasconcellos

- Boucher, O.; Randall, D.; Artaxo, P.; Bretherton, C.; Feingold, G.; Forster, P.; Kerminen, V.-M.; Kondo, Y.; Liao, U.; Lohmann, H.; Rasch, P.; Satheesh, S.K.; Sherwood, S.; Stevens, B. & Zhang, X.Y. 2013. Clouds and Aerosols. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V. & MIDGLEY, P.M. (ed.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 571–657.
- Chan, S. C.; Kendon, E.J.; Fowler, H.J.; Blenkinsop, S.; Roberts, N.M. & Ferro, C.A. 2014. The value of high-resolution Met Office regional climate models in the simulation of multihourly precipitation extremes. *Journal of Climate*, 27( 16), 6155–6174.
- Cotton, W.; Bryan, G. & Heever, S. V. D. 2010. *Storm and Cloud Dynamics, Volume 99*. Academic Press, 820p.
- Da Silva, F.P.; Rotunno Filho, O.C.; Sampaio, R.J.; Dragaud, I.C.D.V.; Araújo, A.A.M.; Justi da Silva, M.G.A. & Pires, G.D. 2017. Evaluation of atmospheric thermodynamics and dynamics during heavy-rainfall and no-rainfall events in the metropolitan area of Rio de Janeiro, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0570-5>
- Da Silva, F.P.; Justi da Silva, M.G.A.; Menezes, W.F. & Almeida, V.A. 2015. Avaliação de Indicadores Atmosféricos Utilizando o Modelo Numérico WRF em Eventos de Chuva na Cidade do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 38(2), 81-90.
- Da Silva, F.P.; Justi da Silva, M.G.A.; Rotunno Filho, O.C.; Pires, G.D.; Sampaio, R.J. & Araújo, A.A.M. 2018. Synoptic thermodynamic and dynamic patterns associated with Quitandinha River flooding events in Petropolis, Rio de Janeiro (Brazil). *Meteorology and Atmospheric Physics*. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0609-2>
- Doswell III, C.A. & Schultz, D.M. 2006. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *The Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 1(3), 1-22.
- Galway, J.G. 1956. The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 43, 528-529.
- George, J.J. 1960. *Weather Forecasting for Aeronautics*. Nova York, Academic Press, 673p.
- Hane, C.E. 1986. Extratropical Squall Lines and Rainbands. In: RAY, P. (ed.). *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. American Meteorological Society, p. 359-389.
- Hallak, R. & Pereira Filho, A.J. 2012. Análise de Desempenho de Índices de Instabilidade Atmosférica na Previsão de Fenômenos Convectivos de Mesoescala na Região Metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 4 de fevereiro de 2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(2), 173-206.
- Henry, W. 1987. *The Skew-T, Log P Diagram*. Kansas, National Weather Service Training Center, EUA, 68 p.
- Houze, R.A. 1993. *Cloud Dynamics*. San Diego, Academic Press, 573 p.
- Kanamitsu, M.; Ebisuzaki, W.; Woollen, J.; Yang, S.; Hnilo, J.J.; Fiorino, M. & Potter, G.L. 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1631-1643.
- Machado, J.P.; Cardoso, C.S.; Quadro, M.F.L.; Almeida, T.D.; Costa, N.M.; Rodrigues, G.L.; Rodrigues, T.S. & Paula, L.A. 2017. Análise Preliminar dos Índices de Instabilidade a Partir de Simulações Realizadas com o Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o Sul do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 40(2), 153-162.
- Mapes, B.; Tulich, S.; Lin, J. & Zuidema, P. 2006. The mesoscale convection life cycle: Building block or prototype for large-scale tropical waves? *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 42(1–4), 3–29.
- Menezes, W.F. 1998. Tempestades Severas: um modelo para latitudes subtropicais. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, 174 p.
- Miller, R.C. 1972. *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central*. Washington, Tech. Report 200, Air Weather Service, United States Air Force, 190 p.
- Nascimento, E.L. 2005. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: Uma estratégia operacional adotável no Brasil? *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(1), 121-140.
- Nascimento, E.L.; Foss, M.; Ferreira, V. & Brooks, H.E. 2016. An updated and expanded climatology of severe weather parameters for subtropical South America as derived from upper air observations and CFSR-CFSv2 data. In: *Conference on Severe Local Storms*, 28, Portland, USA, 2016. <https://ams.confex.com/ams/28SLS/webprogram/28SLS.html>.
- Showalter, A.K. 1947. A stability index for forecasting thunderstorms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34, 250-252.
- Silva Dias, M.A.F. Índices de Instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas, Notas de Aula, Departamento de Ciências Atmosféricas/IAG-USP, 2000.
- Vasconcellos, F.C. & Cavalcanti, I.F.A. 2010. Uma avaliação das previsões do modelo regional Eta em alta resolução para dois casos de chuva intensa ocorridos na região da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(4), 501 - 512,
- Weisman, M.L. & Klemp, J.B. 1982. The dependence of numerically-simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Monthly Weather Review*, 110, 504-520.
- World Meteorological Organization. 1983. *Guide to Climatological Practices*, Second edition, WMO-182.