



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

CLIMATOLOGIA DO NÍVEL DE CONDENSAÇÃO
POR LEVANTAMENTO NA AMÉRICA DO SUL

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Denis William Garcia

Itajubá, MG, Brasil

2022

CLIMATOLOGIA DO NÍVEL DE CONDENSAÇÃO POR LEVANTAMENTO NA AMÉRICA DO SUL

por

Denis William Garcia

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de
Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal
Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau
de

Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Michelle Simões Reboita

Coorientador: Enrique Vieira Mattos

Itajubá, MG, Brasil

2022

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

**CLIMATOLOGIA DO NÍVEL DE CONDENSAÇÃO POR
LEVANTAMENTO NA AMÉRICA DO SUL**

elaborada por

Denis William Garcia

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

Michelle S. Reboita

Michelle Simões Reboita, Dr. (UNIFEI)

Documento assinado digitalmente



ENRIQUE VIEIRA MATTOS

Data: 03/11/2022 10:13:10-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Enrique Vieira Mattos, Dr. (UNIFEI)

Documento assinado digitalmente



ROGER RODRIGUES TORRES

Data: 01/11/2022 13:48:22-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Roger Rodrigues Torres, Dr. (UNIFEI)

Wagner Flaubert Augusto Lima

Wagner Flaubert, Dr. (ATTO Technology)

Felipe Romão Sousa Correia

Felipe Romão Sousa Correia, Msc. (Marinha do Brasil)

Itajubá, 27 de outubro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me dado tudo que foi necessário para chegar até aqui. Agradeço aos meus pais Carlos e Márcia por todo o apoio durante esses longos anos de faculdade, de estudos e de luta. Além de serem minha fonte de inspiração, que nos momentos de tomadas de decisão sempre souberam como me aconselhar. Agradecido por todos os valores que me foram repassados através de deles como perseverança, caráter, humildade, respeito e comprometimento, afinal essa conquista também é de vocês, por todo tempo trabalhado e dedicado a mim.

Agradeço também aos meus avós José Francisco e Maria Isabel que sempre torceram por mim e pela minha formação acadêmica e que através de conversas e brincadeiras sempre me incentivaram a formar e também aos meus falecidos avós Sergio Garcia e Maria de Lourdes Garcia. Aos meus grandes amigos Danilo Silva e Lucas Chediak por inúmeras conversas, conselhos e puxões de orelhas, que me auxiliaram a me tornar na pessoa que sou hoje. E também as pessoas que eu amo e que de certa forma contribuíram para este momento incrível em minha vida.

Aos meus orientadores e amigos Prof^a. Dr^a. Michelle Simões Reboita e Prof. Dr. Enrique Vieira Mattos por seus ensinamentos repassados a mim, por toda atenção dedicada e tempo gastos para o meu entendimento e crescimento acadêmico. Agradeço também por terem me dado a oportunidade de trabalhar com ambos, Prof. Enrique que trabalhamos juntos em um projeto de Iniciação Científica e Prof^a Michelle aceitou ser a minha orientadora em um novo projeto como este.

Agradecer aos meus queridos amigos que fiz em Itajubá, da república em que morei por anos, obrigado por cada aprendizado, cada conversa e principalmente pelos momentos de descontração. Agradecer aos meus amigos de curso Alysson, Aline, Fabiana Bartolomei, Thales Heitor, Thales Victor, Juliano, Raquel, Fabiana Teixeira, Thaís. Obrigado pela companhia, pelas risadas e também pelos momentos que jamais serão esquecidos.

Ao Centro de Previsão de Tempo e estudo Climáticos (CPTEC) pela disponibilização das imagens de satélite do GOES-16, a Força Aérea Brasileira (FAB) pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho, principalmente ao Capitão Meteorologista Mário Paulo Alves Júnior e ao Coronel Aviador Plínio da Silva Becker e agradecer também ao Wagner Flauber Araújo de Lima pela disposição e ajuda na obtenção destes dados.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

CLIMATOLOGIA DO NÍVEL DE CONDENSAÇÃO POR LEVANTAMENTO NA AMÉRICA DO SUL.

AUTOR(A): DENIS WILLIAM GARCIA

ORIENTADOR: MICHELLE SIMÕES REBOITA

Local e Data da Defesa: Itajubá, 27 de outubro de 2022.

O Nível de Condensação por Levantamento (NCL) indica a altura da base das nuvens e serve como uma variável descritora do clima. Assim, esse estudo inicialmente busca validar o uso de duas equações empíricas para estimar o NCL através de comparação com dados observados para o período chuvoso do sudeste do Brasil entre 30 e 31 de dezembro de 2021 e, após, aplicar as equações para calcular a climatologia do NCL para a América do Sul (AS) no período de janeiro de 1991 a dezembro de 2021. Para validação das equações são utilizados dados de radiossondagens disponibilizadas pela Universidade de Wyoming (UWYO) e de tetômetro disponibilizados pela Força Aérea Brasileira (FAB). Já para a climatologia do NCL foram usados dados da reanálise do ERA5 do ECMWF. Entre os resultados têm-se que as equações empíricas conseguem representar o NCL e, para o estudo climatológico, as regiões como Nordeste do Brasil e Patagônia Argentina possuem valores mais altos (5000 m e 4500 m) em relação às outras regiões. Regiões com pouca disponibilidade de umidade (~ 3 g/kg) e temperatura (~ 27 °C) mais elevada tendem a ter a base das nuvens mais altas (~ 4000 m), diferentemente do que ocorre na Amazônia onde há altos valores de umidade específica (~ 11 g/kg) e temperaturas (~ 30 °C) elevadas, o que torna o NCL mais próximo à superfície (~ 1000 m). Para alguns locais específicos foi analisada a tendência do NCL, em que se é analisado se há aumento ou diminuição em sua altura, utilizando o nível de significância de 95%, bem como para outras variáveis atmosféricas. Em geral, enquanto há tendência positiva do NCL e há negativa de precipitação que são significativas, isto indica que pode haver alguma relação entre os dois eventos para os locais. Por fim, foram comparados os dados de NCL com a climatologia de precipitação através de dados obtidos do NOAA. Os resultados mostraram uma possível conexão entre o aumento do NCL com a diminuição de precipitação para algumas localidades.

Palavras-chave: Nível de Condensação por Levantamento. América do Sul. Precipitação. Análise de Tendência.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - TOPOGRAFIA DA AMÉRICA DO SUL (METROS). AS ÁREAS AZUIS EM DESTAQUE CORRESPONDEM A REGIÕES DE ESTUDO E QUE SERÃO APRESENTADAS NOS RESULTADOS. OS CÍRCULOS SÃO AS LOCALIDADES ESCOLHIDAS PARA OS ESTUDOS DE CASO. FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS QUE ATINGEM A AS SÃO REPRESENTADOS EM: LARANJA (ZCIT), VERDE (ZCAS), TRIÂNGULOS AZUIS (FRENTE FRIA), SEMICÍRCULOS VERMELHOS (FRENTE QUENTE), B (REGIÃO DE BAIXA PRESSÃO). 5
- FIGURA 2 - DIAGRAMA SKEWT – LOGP OBTIDO COM DADOS DE TEMPERATURA DO AR (LINHA VERMELHA CONTÍNUA) E TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (LINHA VERDE CONTÍNUA) DO DIA 30 DE DEZEMBRO DE 2021 ÀS 1200 Z PARA O AEROPORTO EDUARDO GOMES (MANAUS). 7
- FIGURA 3 - ESQUEMATIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM TETÔMETRO. (FONTE: MARINHA DO BRASIL, 2015). 8
- FIGURA 4 - ESQUEMATIZAÇÃO E APLICAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NA METODOLOGIA DO PRESENTE ESTUDO. 11
- FIGURA 5 - (A-B) CARTA SINÓTICA DE 250 hPa (PREENCHIDO: INTENSIDADE DO VENTO, LINHAS AZUIS: ESCOAMENTO DO VENTO); (C-D) CARTA SINÓTICA DE 850 hPa (LINHAS LARANJAS: ESCOAMENTO DO VENTO EM 850 hPa, BARBELAS AZUIS: DIREÇÃO E VELOCIDADE DO VENTO (NÓS), LINHA PRETA: ISOTERMA DE 0 °C); (E-F) CARTA SINÓTICA DE SUPERFÍCIE (LINHAS AMARELAS: ISÓBARAS, LINHAS AZUIS E VERMELHAS: FRENTE FRIA E FRENTE QUENTE, RESPECTIVAMENTE); (G-H) IMAGENS DO CANAL-13 (INFRAVERMELHO) DO SATÉLITE GOES-16 (PREENCHIDO: TEMPERATURA DE BRILHO DO TOPO DAS NUVENS). FONTE: CPTEC/INPE. 13
- FIGURA 6 - NCL EM NÍVEIS DE PRESSÃO (hPa), UTILIZANDO DIFERENTES FORMAS DE ESTIMATIVAS, PARA OS DIAS 30 E 31 DE DEZEMBRO DE 2021, ÀS 1200 Z, PARA AS CIDADES DE: BRASÍLIA/DF, MANAUS/AM, SÃO PAULO/SP, RIO DE JANEIRO/RJ, SANTA MARIA/RS E GUARULHOS/SP. 15
- FIGURA 7 - NCL EM METROS, UTILIZANDO DIFERENTES FORMAS DE ESTIMATIVAS, PARA OS DIAS 30 E 31 DE DEZEMBRO DE 2021, ÀS 1200 Z, PARA AS CIDADES DE: BRASÍLIA/DF, MANAUS/AM, SÃO PAULO/SP, RIO DE JANEIRO/RJ, SANTA MARIA/RS E GUARULHOS/SP. 16
- FIGURA 8 - CLIMATOLOGIAS ANUAIS POR HORÁRIO SINÓTICO (REPRESENTADO PELAS LINHAS COMEÇANDO ÀS 0000 Z) PARA A AS: DO (A-B-C-D) NCL EM NÍVEIS DE PRESSÃO(hPa), (E-F-G-H) NCL EM METROS (M), (I-J-K-L) TEMPERATURA (°C) E (M-N-O-P) UMIDADE ESPECÍFICA (G/KG). 19
- FIGURA 9 - CLIMATOLOGIA SAZONAL DO NCL EM NÍVEIS DE PRESSÃO PARA A AS EM MÉDIAS TRIMESTRAIS PARA O VERÃO (DJF - DEZEMBRO, JANEIRO E FEVEREIRO, A-B-C-D), O OUTONO

(MAM – MARÇO, ABRIL E MAIO, E-F-G-H), O INVERNO (JJA - JUNHO, JULHO E AGOSTO, I-J-K-L) E A PRIMAVERA (SON - SETEMBRO, OUTUBRO E NOVEMBRO, M-N-O-P), PARA OS HORÁRIOS SINÓTICOS: 0000 Z (A-E-I-M); 0600 Z (B-F-J-N); 1200 Z (C-G-K-O); E 1800 Z (D-H-L-P). 21

FIGURA 10 - CLIMATOLOGIA SAZONAL DO NCL EM METROS PARA A AS EM MÉDIAS TRIMESTRAIS PARA O VERÃO (DJF – DEZEMBRO, JANEIRO, FEVEREIRO, A-B-C-D), O OUTONO (MAM – MARÇO, ABRIL MAIO, E-F-G-H), O INVERNO (JJA - JUNHO, JULHO E AGOSTO, I-J-K-L) E A PRIMAVERA (SON - SETEMBRO, OUTUBRO E NOVEMBRO, M-N-O-P), PARA OS HORÁRIOS SINÓTICOS: 0000 Z (A-E-I-M); 0600 Z (B-F-J-N); 1200 Z (C-G-K-O); E 1800 Z (D-H-L-P). 22

FIGURA 11 - CLIMATOLOGIA ANUAL DO NCL EM METROS (DADOS PROVENIENTES DA EQUAÇÃO 2), UTILIZANDO DADOS DO ERA5) PARA OS QUATRO HORÁRIOS SINÓTICOS (0000 Z, 0600 Z, 1200 Z E 1800 Z), TEMPERATURA (°C, DADOS PROVENIENTES DO ERA5), UMIDADE ESPECÍFICA (G/KG, DADOS PROVENIENTES DO ERA5) E PRECIPITAÇÃO (MM, DADOS PROVENIENTES DO CPC PARA: BRASÍLIA, GUARULHOS, MANAUS, RIO DE JANEIRO, SANTA MARIA E SÃO PAULO). 24

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- EQUAÇÕES PARA ESTIMAR O NCL.	2
TABELA 2 - DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE O NCL EM NÍVEIS DE PRESSÃO, UTILIZANDO DIFERENTES FONTES DE ESTIMATIVAS, COMPARADAS COM O SKEWT-LOGP(REFERÊNCIA) PARA AS CIDADES DE BRASÍLIA/DF, MANAUS/AM, SÃO PAULO/SP, RIO DE JANEIRO/RJ, SANTA MARIA/RS E GUARULHOS/SP.	16
TABELA 3 - DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE O NCL EM METROS, UTILIZANDO DIFERENTES FONTES DE ESTIMATIVAS, COMPARADAS COM O SKEWT-LOGP (REFERÊNCIA) PARA AS CIDADES DE BRASÍLIA/DF, MANAUS/AM, SÃO PAULO/SP, RIO DE JANEIRO/RJ, SANTA MARIA/RS E GUARULHOS/SP.	17
TABELA 4 - VALORES DE INCLINAÇÃO DA RETA PARA O NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 95%. RESULTADOS EM NEGRITO CORRESPONDEM A UMA TENDÊNCIA SIGNIFICATIVA, DE ACORDO COM O TESTE DE MANN-KENDALL.	25

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AS – América do Sul

NCL – Nível de condensação por levantamento

T – Temperatura do ar

Td – Temperatura do ponto de orvalho

T2m – Temperatura do ar a 2 metros

Td2m – Temperatura do Ponto de orvalho a 2 metros

Ps – Pressão em superfície

m – Metros

hPa – Hectopascals

NEB – Nordeste do Brasil

FAB – Força Aérea Brasileira

ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

GOES – *Geostationary Operational Environmental Satellite*

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CAPE – *Convective Available Potential Energy*

CINE – *Convective Inhibition Energy*

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

VCAN – Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

UWYO – Universidade de Wyoming

K – Kelvin

SUMÁRIO

RESUMO	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	4
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
2.2 DADOS	5
2.2.1 REANÁLISE ERA5	6
2.2.2 DADOS DE RADIOSSONDAGEM	6
2.2.3 DADOS DE TETÔMETRO	8
2.2.4 DADOS DE PRECIPITAÇÃO DO <i>CLIMATE PREDICTION CENTER</i> (CPC)	9
2.3 ANÁLISES	9
2.3.1 DETERMINAÇÃO DO NCL	9
2.3.2 VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DO NCL	9
2.3.3 CLIMATOLOGIAS	11
3. RESULTADOS.....	12
3.1 PERÍODO CHUVOSO ENTRE 30 E 31 DE DEZEMBRO DE 2021	12
3.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE NCL	14
3.3 CLIMATOLOGIA ANUAL DO NCL	17
3.4 CLIMATOLOGIA SAZONAL DA AS	19
3.3 ANÁLISE POR LOCALIDADE	23
3.3.1 CLIMATOLOGIA	23
4. CONCLUSÃO	25
5. REFERÊNCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

As nuvens se formam porque há movimento ascendente do ar na atmosfera e vapor d'água. A água presente na superfície terrestre evapora e se eleva na atmosfera, durante este processo a temperatura decai até ocorrer a saturação do vapor de água, dando início à formação das nuvens (SMITHSON *et al.* 2013). O processo inicial da formação das nuvens envolve três “ingredientes” básicos: (a) um mecanismo inicial de levantamento do ar, que pode ser convecção, convergência de massa, presença de uma superfície frontal ou interação do escoamento com a topografia, (b) umidade atmosférica e (c) instabilidade (WALLACE; HOBBS, 1977). O ar é forçado a ascender por algum dos mecanismos mencionados em (a), se há umidade disponível (b) essa também será transportada, na sequência as parcelas de ar devem adquirir flutuação de forma espontânea devido terem menor densidade do que o ar das camadas para onde se deslocam, o que caracteriza a instabilidade atmosférica (c). Além desses ingredientes é necessário a presença de núcleos de condensação, que serão importantes para o produto da condensação se aglutinar e formar as gotículas de nuvem. Alguns desses núcleos são aerossóis (partículas suspensas na atmosfera que lançadas por meio de combustão, erosão eólica, partículas de sal (NaCl) e também de atividades antropogênicas) (WALLACE e HOBBS, 1977).

À medida que as parcelas de ar ascendem, encontram um ambiente com menor pressão atmosférica, permitindo a sua expansão e, conseqüentemente, o seu resfriamento. Assim, as parcelas de ar podem atingir a temperatura do ponto de orvalho, temperatura na qual a saturação da parcela de ar é atingida (isto é, a umidade relativa chega a 100%). O nível em que a saturação ocorre é denominado de nível de condensação por levantamento (NCL). Caso a parcela continue a se elevar na atmosfera irá ocorrer a condensação, propiciando o início da formação das gotículas de nuvens e, conseqüentemente das nuvens (AHRENS, 2003; FERREIRA e REBOITA, 2020; WALLACE e HOBBS, 2006). Portanto, o NCL é o nível que indica a base das nuvens.

O NCL é um parâmetro importante na previsão de cobertura de nuvens (WETZEL, 1990) bem como para a parametrização da convecção nos modelos numéricos (EMANUEL e ŽIVKOVIĆ-ROTHMAN, 1999). O NCL pode ser estimado através de diagramas termodinâmicos como o SkewT-LogP, bem como por expressões analíticas empíricas (ROMPS, 2017) tais como as apresentadas na Tabela 1. Espy (1836) foi o primeiro a desenvolver uma expressão empírica para a estimativa da altura do NCL (Tabela 1). Com a

equação desenvolvida, O autor verificou que o vapor sempre condensa a uma altura considerável da superfície terrestre. Mesmo depois de dois séculos, os trabalhos envolvendo as estimativas do NCL aplicadas a estudos climatológicos ainda são escassos. Alguns dos poucos estudos encontrados na literatura definindo a climatologia da base das nuvens são Zhang *et al.* (2012), Costa-Surós *et al.* (2013), Dirmeyer *et al.* (2013) e Zhang *et al.* (2018).

Tabela 1- Equações para estimar o NCL.

Autor	Equação	Descrição das variáveis
Espy (1836)	$z = Z_0 + 165 * (T - Td)$ (1)	T= temperatura do ar (K). Td= temperatura do ponto de orvalho (K). z = altura do NCL em (metros).
Dirmeyer <i>et al.</i> (2013)	$z = 125 * (T2m - Td2m)$ (2)	T2m = temperatura do ar a 2 metros (K). Td2m = temperatura do ponto de orvalho a 2 metros (K). z = altura do NCL em metros (m).
Dirmeyer <i>et al.</i> (2014)	$z = Ps \left(\left(\frac{T-Td}{223.15} + 1 \right)^{-3.5} \right)$ (3)	Ps = Pressão em superfície (hPa) T= temperatura do ar (K). Td = temperatura do ponto de orvalho (K).

Zhang *et al.* (2018) estimaram a altura da base das nuvens para toda a China por meio de radiossondagens. Foi verificado que há grande variabilidade sazonal no NCL, possuindo um maior distanciamento da superfície no verão (2990 m) e o menor (2380 m) no inverno. Resultado similar foi obtido por Costa-Surós *et al.* (2013) para Girona, na Espanha. Durante o verão aproximadamente 80% das nuvens apresentaram altura da base abaixo de 3000 m, e 25% desse total de 80% apresentaram altura da base abaixo de 1400 m. No inverno cerca de 80% das nuvens apresentam NCL inferior a 5000 m e 40% desses 80% ocorrem abaixo de 1000 m. O NCL também pode ser estimado através de observações via radiossondas e, via sensoriamento remoto nas faixas do infravermelho e micro-ondas. O NCL também pode ser obtido através de ceilômetros (instrumento baseado na utilização de laser, através do registro do tempo necessário para que o raio de luz emitido seja refletido pela base da nuvem e retorne para o equipamento). Zhang *et al.* (2012), através da utilização de radiossondas e de

ceilômetros, realizaram estudos climatológicos do NCL no Havaí. Os resultados mostraram que a altura do NCL em setores a barlavento é menor do que a sotavento com alturas de 850 e 1280 metros, respectivamente.

Outros estudos avaliaram a altura do NCL através de simulações numéricas. Por exemplo, Dirmeyer *et al.* (2013) determinaram a altura do NCL em projeções de 15 modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) para o futuro, considerando o cenário *Representative Concentration Pathway 8.5* (RCP8.5), que nos indica o pior cenário de emissões de gases do efeito estufa. As regiões mais quentes e secas são caracterizadas por um valor mais alto (valores até de 3000 m) do NCL, enquanto regiões com condições úmidas e/ou frias proporcionam um NCL menor (valores abaixo de 250 m). As projeções futuras também indicaram um aumento na altura da base das nuvens em todo o globo (~93 % do planeta) quando comparado ao clima presente, com algumas exceções como na região central da África. A América do Sul (AS) também apresenta aumento no NCL, principalmente na região Nordeste do Brasil (NEB) em que a previsão está presente em 13 dos 15 modelos utilizados. De maneira geral, uma das possíveis causas do aumento da altura da base das nuvens no clima futuro pode ser o aumento da temperatura do ar e diminuição da umidade específica. Nessa situação, para a parcela de ar saturar (isto é, para a umidade relativa chegar a 100%), deverá atingir maior altitude. Se apenas a temperatura do ar ou a umidade específica fosse alterada nos cenários de mudança climática, o NCL seria alcançado em menores altitudes, mas como mencionado, há o aumento de ambas as variáveis.

Costa (2008) utilizou de vários instrumentos em seu estudo para determinar climatologias de vento e nevoeiro sobre o Aeroporto Governador André Franco Montoro em Guarulhos (São Paulo). Por meio do tetômetro avaliou-se as horas em que o NCL proporciona a restrição de visibilidade. Os resultados mostraram que os meses de maio a junho obtiveram o maior número de horas em que o aeroporto apresentava algum tipo de restrição de visibilidade.

Estudos sobre o NCL tornam-se importantes devido à possibilidade de sua influência nos regimes de precipitação de diversas regiões da AS que, consequentemente, pode afetar a agricultura por meio de períodos de estiagem e de altos valores pluviométricos. Com isso, conhecer a climatologia do NCL obtida a partir de dados estado-da-arte, com a reanálise ERA5, pode aprofundar a compreensão sobre os aspectos do clima de diferentes regiões. Assim, os objetivos deste estudo são: (a) validar as Equações 2 e 3 através de comparações com o NCL

obtido a partir de sondagens da atmosfera e (b) utilizar as equações na determinação da climatologia do NCL na AS no período de janeiro de 1991 a dezembro de 2021.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

A AS é a área de estudo e se estende entre as latitudes de 55° S a 12° N. Na AS há uma diversidade de tipos de relevo (Figura 1), como a Cordilheira dos Andes, encontrada no oeste do continente; as serras do Mar e da Mantiqueira entre o sul e sudeste do Brasil; os pampas no sudeste do continente; a planície Amazônica e etc. Grande parte da AS é dominada por um clima de monção (FERREIRA; REBOITA, 2022; REBOITA *et al.* 2010; TEODORO *et al.* 2021), isto é, há um período seco (abril a setembro) e um chuvoso (outubro a março) bem definidos. Contudo este período não é distribuído regularmente entre todas as suas regiões: os valores máximos de precipitação para a região central do continente ocorrem no verão (até 700 mm/estação), na região sul do Brasil a precipitação é bem distribuída ao longo do ano e no Norte da Amazônia os máximos ocorrem no inverno (até 1000 mm/estação).

Na Figura 1, as localidades utilizadas na validação das equações 2 e 3 são mostradas em círculos coloridos (a escolha destas localidades é descrita na seção 2.3.2 deste estudo). Já os subdomínios (quadrados) são regiões (Amazônia, Centro, Nordeste e Patagônia) que serão abordadas na discussão dos resultados climatológicos. Estas regiões sofrem com diferentes influências meteorológicas como: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que atua sobre a região Norte do continente, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que tem influência sobre a região central da AS, Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) presente no NEB e frentes frias que atingem a Patagônia. Estes eventos transportam umidade para as regiões desta maneira proporcionando a formação de nuvens e precipitação.

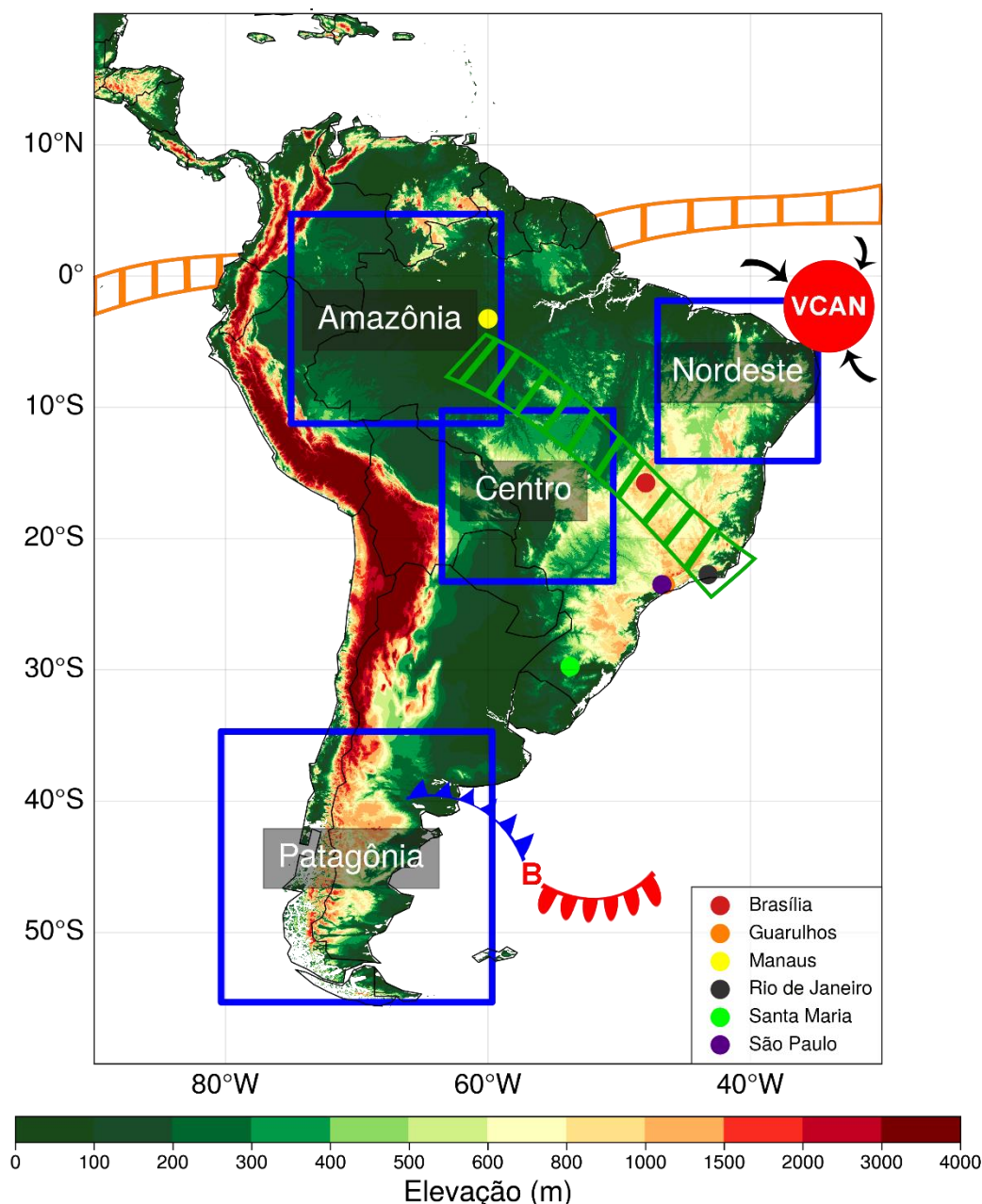


Figura 1 - Topografia da América do Sul (metros). As áreas azuis em destaque correspondem a regiões de estudo e que serão apresentadas nos resultados. Os círculos são as localidades escolhidas para os estudos de caso. Fenômenos atmosféricos que atingem a AS são representados em: laranja (ZCIT), verde (ZCAS), triângulos azuis (frente fria), semicírculos vermelhos (frente quente), B (região de baixa pressão).

2.2 Dados

Para este estudo foram utilizadas diferentes bases de dados: a) *Reanalysis 5th Generation (ERA5; HERSBACH, 2016)* do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)* obtida em *Climate Change Service* (<https://climate.copernicus.eu/>), b) radiossondagens disponibilizadas no *site* da Universidade de Wyoming (UWYO; <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), c) dados de tetômetro fornecidos pela Força

Aérea Brasileira (FAB) – através de comunicação pessoal - e d) precipitação do *Climate Prediction Center* (CPC, <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>).

2.2.1 Reanálise ERA5

A reanálise ERA5 do ECMWF (HERSBACH, 2016) possui resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e 137 níveis verticais. Para este estudo são utilizadas as seguintes variáveis: temperatura a 2 m (T), temperatura do ponto de orvalho a 2 m (Td), umidade específica (q) em 850 hPa e pressão de superfície (Ps) para os horários das 0000, 0600, 1200 e 1800 Z no período de janeiro de 1991 a dezembro de 2021. Embora a reanálise tenha resolução de $0,25^\circ$, nesse estudo foi utilizada a resolução de 1° por dois motivos: i) o estudo é para a escala sinótica, o que não necessita de dados em alta resolução espacial e ii) para facilitar o processamento de um grande volume de dados.

2.2.2 Dados de radiossondagem

Para validar as estimativas do NCL são utilizados dados de radiossondagens da plataforma da Universidade de Wyoming (UWYO) para os dias 30 e 31 de dezembro de 2021. As radiossondagens fornecem as variáveis de temperatura ($^\circ\text{C}$), temperatura do ponto de orvalho ($^\circ\text{C}$), razão de mistura (g/kg), umidade relativa do ar (%) direção e velocidade do vento (kts)(em níveis de pressão atmosférica (do nível de 1000 a 100 hPa). Com essas informações, são elaborados diagramas SkewT - LogP como exemplificado na Figura 2.

O diagrama SkewT - LogP é um gráfico que permite a obtenção de várias grandezas termodinâmicas a partir do conhecimento das variáveis de temperatura e temperatura do ponto de orvalho em níveis verticais de pressão. No diagrama mostrado na Figura 2, tem-se a temperatura (linha contínua vermelha), temperatura do ponto de orvalho (linha contínua verde), temperatura da parcela de ar em ascensão na atmosfera (linha contínua preta), razão de mistura (linha tracejada verde), adiabática úmida (linha tracejada azul) e adiabática seca (linha tracejada vermelha). Além disso, é possível identificar a direção e velocidade do vento através das barbelas pretas posicionadas do lado direito do diagrama e também no hodógrafo (curva criada a partir de variáveis independentes das componentes de velocidade, cuja análise auxilia na determinação da direção e velocidade do vento) no canto superior direito da Figura 2, onde as cores identificam a sua intensidade (verde representa menor intensidade e cores próximas ao vermelho, maior intensidade).

O diagrama SkewT- LogP pode ser utilizado para determinar o NCL da seguinte forma: uma parcela de ar é deslocada do nível da superfície, que no exemplo é 1000 hPa, para níveis mais altos (linha preta). Essa parcela segue a linha da adiábata seca até encontrar a linha de razão de mistura que é traçada a partir da temperatura do ponto de orvalho. Quando as duas linhas se interceptam, tem-se o NCL, o que indica que a parcela atingiu a saturação. A partir daí a parcela se eleva pela linha da adiábata úmida (FERREIRA; REBOITA, 2020). O NCL também é indicado no lado direito da figura juntamente com outros índices, chamados índices de instabilidade, que auxiliam na indicação das condições atmosféricas propícias ou não para a convecção e formação de nebulosidade. Entre os índices têm-se a Energia Potencial Convectiva Disponível (*Convective Available Potential Energy* – CAPE) que indica a quantidade de energia potencial disponível na atmosfera para que possa haver convecção e Energia de Inibição Convectiva (*Convective Inhibition Energy* - CINE) que mostra a quantidade de energia necessária para que a parcela de ar possa se elevar na atmosfera até atingir o NCL (FERREIRA; REBOITA, 2020).

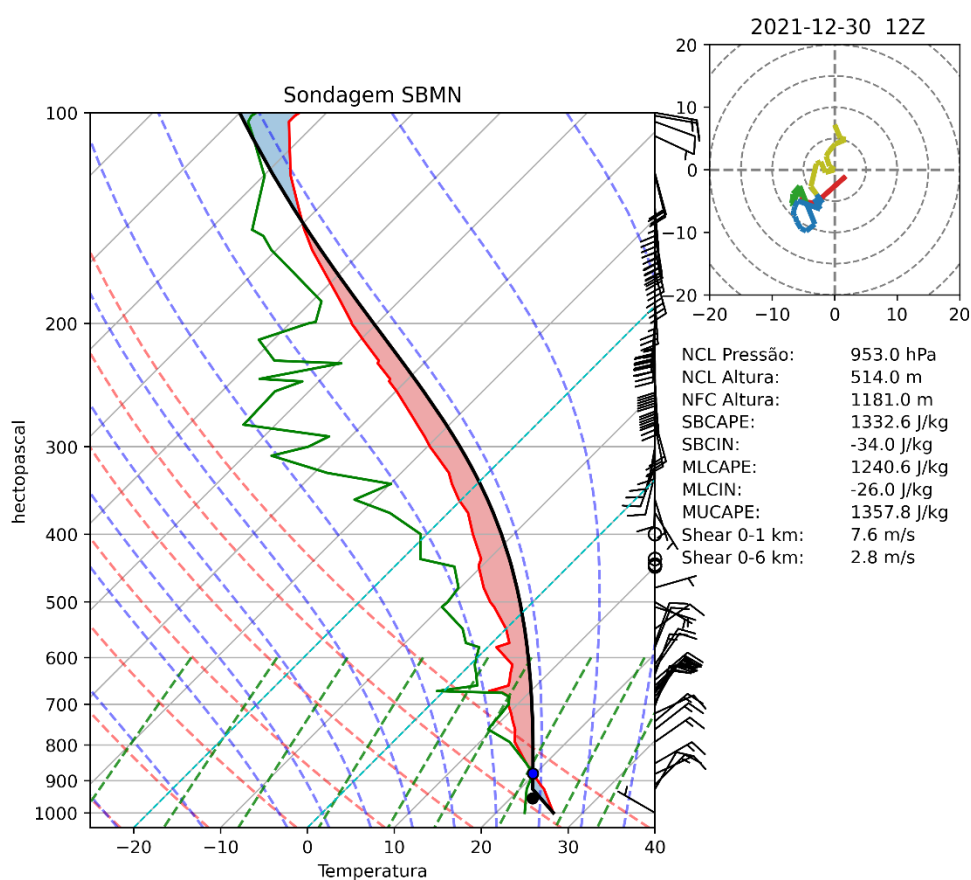


Figura 2 - Diagrama SkewT – LogP obtido com dados de temperatura do ar (linha vermelha contínua) e temperatura do ponto de orvalho (linha verde contínua) do dia 30 de dezembro de 2021 às 1200 Z para o aeroporto Eduardo Gomes (Manaus).

2.2.3 Dados de tetômetro

O tetômetro é um instrumento que indica a altura da base das nuvens. Esse instrumento é instalado em sua grande maioria nos aeroportos, próximo à cabeceira da pista, junto da estação meteorológica, fornecendo informações precisas sobre a altura da base das nuvens até 3000 m, após esta altitude a acurácia do aparelho tende a diminuir (MARINHA DO BRASIL, 2015). O funcionamento do tetômetro é baseado em uma forma geométrica que corresponde às posições do projetor, receptor e incidência do feixe luminoso na base da nuvem, o que forma um triângulo retângulo. Desta forma ao conhecer um ângulo agudo e um lado do triângulo, através de trigonometria, obtém-se o lado que corresponde ao NCL (Figura 3).

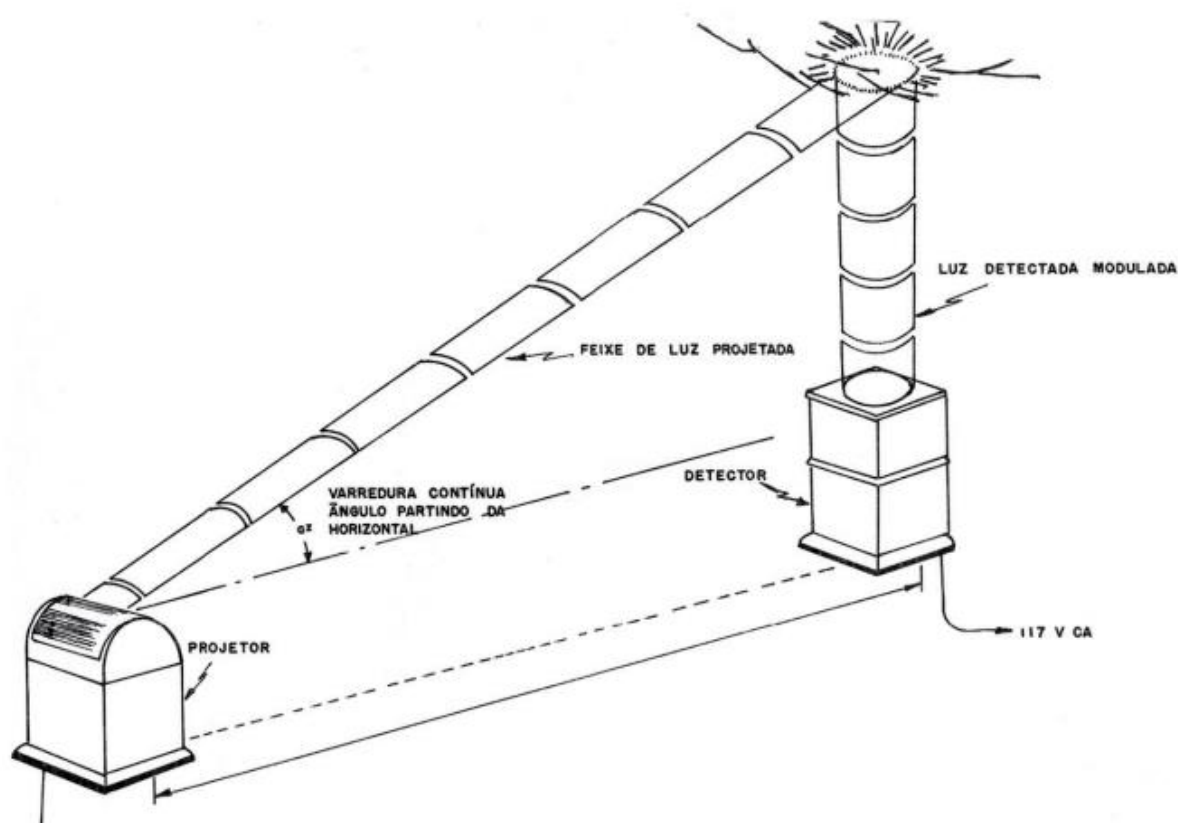


Figura 3 - Esquematisação do funcionamento de um tetômetro. (Fonte: Marinha do Brasil, 2015).

Foram obtidos dados de tetômetro para o aeroporto de Guarulhos referentes ao período de 30 e 31 de dezembro de 2021 às 1200 Z, para comparação com os dados da reanálise ERA5. Embora o tetômetro seja um instrumento de medida, como se tem dados apenas para Guarulhos e não se conhecem trabalhos avaliando a qualidade desse instrumento, o mesmo não será utilizado como referência.

2.2.4 Dados de Precipitação do *Climate Prediction Center* (CPC)

Com o intuito de avaliar a relação da precipitação com outras variáveis (temperatura e umidade específica) e com os valores de NCL, são utilizadas as análises diárias de precipitação do CPC que pertencem ao *National Center for Environmental Prediction*(NCEP) e são disponibilizados em: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>. As análises da precipitação são construídas a partir de observações de pluviômetros interpolados na grade com resolução horizontal de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ e possuem resolução temporal diária. Os dados foram obtidos entre 01 de janeiro de 1991 e 31 de dezembro de 2021 e foram acumulados em totais anuais.

2.3 Análises

2.3.1 Determinação do NCL

O NCL foi estimado a partir de duas equações empíricas (Tabela 1): Equação 2 que estima o NCL em metros, e a Equação 3 que fornece o NCL em hPa. O NCL é calculado para os quatro horários sinóticos padrão: 0000, 0600, 1200 e 1800 Z, que utiliza dados do ERA5 e também dados brutos da UWYO.

2.3.2 Validação das estimativas do NCL

Com o intuito de validar os valores calculados pelas Equações 2 e 3, selecionou-se os dias 30 e 31 de dezembro de 2021, pois registraram elevado volume de precipitação em grande parte do Brasil. Para uma breve contextualização desse período chuvoso são utilizadas cartas sinóticas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) para os níveis de 250 e 850 hPa e para a superfície, além de imagens do satélite do GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), do canal 13 (infravermelho), no horário das 1200 Z, para indicar a profundidade das nuvens. A profundidade é estimada por meio da temperatura de brilho do topo das nuvens, em que quanto menor é seu valor mais alto é o topo da nuvem. Nuvens cumuliformes de grande desenvolvimento vertical apresentam o topo frio e uma menor temperatura de brilho.

Para o período descrito, comparou-se as estimativas do NCL (com as equações 2 e 3) nas localidades de São Paulo (Aeroporto Campo de Marte), Rio de Janeiro (Aeroporto Internacional Tom Jobim), Manaus (Aeroporto Eduardo Gomes), Brasília (Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek) e Santa Maria (Aeroporto de Santa Maria) com os dados medidos por meio de radiossondagens. Estas cidades foram escolhidas pois além de obterem elevados valores diários de precipitação (~50mm), com exceção de Santa Maria que não

registrou precipitação, possuem dados de radiossondagens. A metodologia dessa etapa foi definida baseada nos seguintes passos resumidos na Figura 4:

- a) Aplicação das Equações 2 e 3 utilizando os dados de reanálise do ERA5;
- b) Aplicação das Equações 2 e 3 utilizando os dados brutos das radiossondagens disponibilizados no sítio da UWYO;
- c) Uso do diagrama Skewt – Log P para a obtenção do NCL a partir das informações de temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho das sondagens obtidas no sítio da UWYO. O NCL obtido aqui é considerado como o dado de referência para a validação das equações;
- d) Uso do valor do NCL calculado diretamente pela UWYO;
- e) Uso do valor do NCL obtido pelo tetômetro (nesse caso só para Guarulhos).

Após a obtenção dos resultados das equações (passos a e b), os valores obtidos da altura do NCL foram comparados com os do passo (c), considerado como referência. Para Guarulhos (Aeroporto Governador André Franco Montoro), utilizaram-se os dados de tetômetro para os horários das 1200 Z. Ainda para Guarulhos como não haviam dados da UWYO disponíveis, foram considerados como referência os dados da ERA5 no cálculo do NCL via SkewT - LogP.

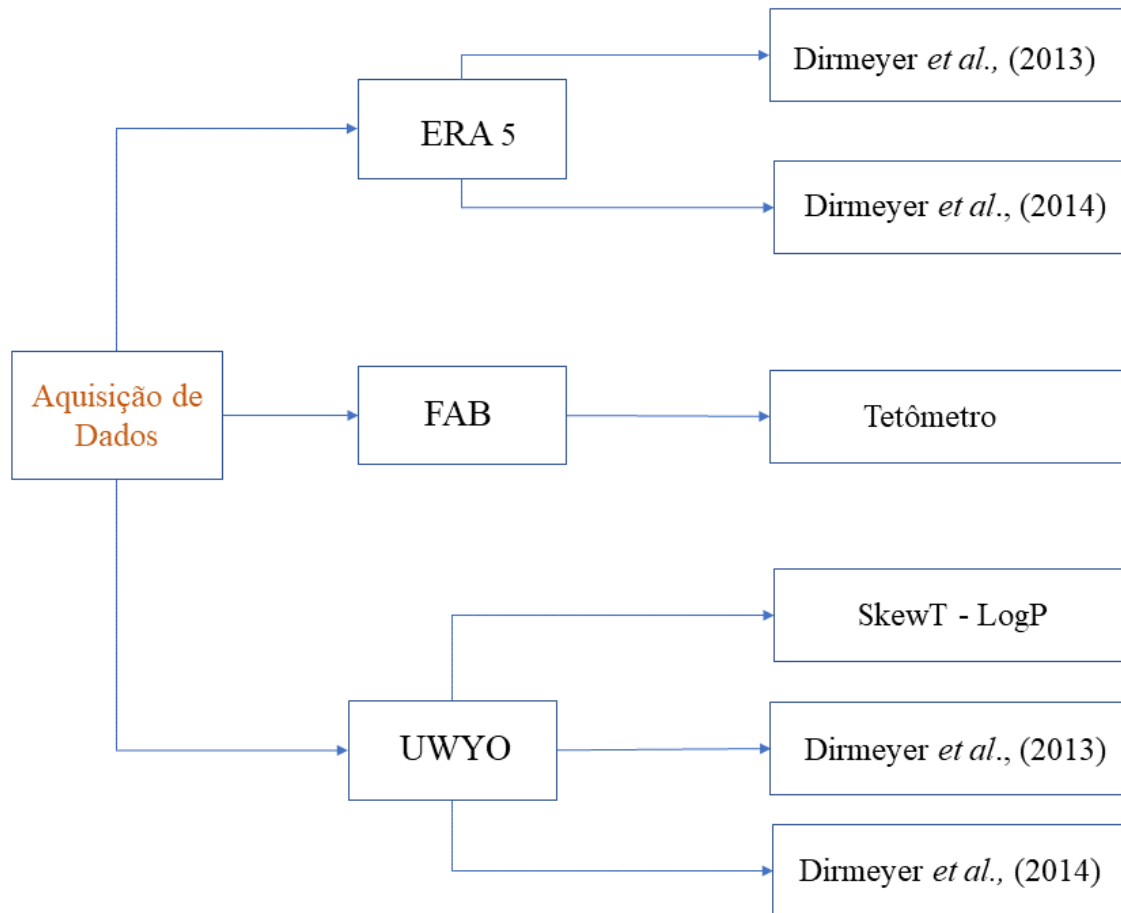


Figura 4 - Esquematização e aplicação dos dados utilizados na metodologia do presente estudo.

2.3.3 Climatologias

Após a validação das equações 2 e 3 foi determinada a climatologia sazonal e anual do NCL usando os dados da ERA5. Estes dados são apresentados em mapas espaciais e também em gráficos de linhas, o que facilita a observação da tendência de aumento ou diminuição do NCL. Para verificar se as tendências são estatisticamente significativas ao nível de 95% foi aplicado o teste de Mann Kendall (KENDALL,1975; MANN, 1945).

3. RESULTADOS

3.1 Período chuvoso entre 30 e 31 de dezembro de 2021

De acordo com as cartas sinóticas do período de 30 e 31 de dezembro de 2021, o ambiente em escala sinótica que favoreceu a precipitação foi a combinação de diferentes sistemas característicos do verão: nas cartas de altitude (Figura 5a e 5b) nota-se a presença de um cavado em 250 hPa, em 850 hPa há o escoamento de baixos níveis convergindo sobre a região do cavado níveis inferiores da atmosfera. Além disso a atuação de um cavado em superfície que se encontrou próximo a costa do Rio de Janeiro no dia 30 de dezembro (Figura 5e) e com o passar das horas evoluiu para um pequeno sistema de baixa pressão; o cavado em 250 hPa que pode ter contribuído para divergência sobre o sudeste do Brasil (a alta da Bolívia aparece deslocada para oeste sobre o oceano Pacífico). A combinação desses sistemas favorece o ambiente ideal para o desenvolvimento de nuvens e precipitação no sudeste do Brasil (Figura 5f).

As imagens do canal 13 (infravermelho, $10.30\mu\text{m}$) do satélite GOES-16 mostram no dia 30 de dezembro (Figura 5g) nuvens com grande desenvolvimento vertical, ou seja, possuindo topos frios (menores que $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), isso faz com que tenha uma temperatura de brilho menor. Entre a região Norte e Centro-Oeste do país e mais próximo ao Oceano Atlântico a banda de nuvens possui temperatura de brilho maiores ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) o que indica que possui um menor desenvolvimento vertical. Do dia 30 para o dia 31, sobre a região de São Paulo a nebulosidade diminui e se desloca para nordeste (Figura 5h), atuando sobre a região do centro-sul de Minas Gerais.

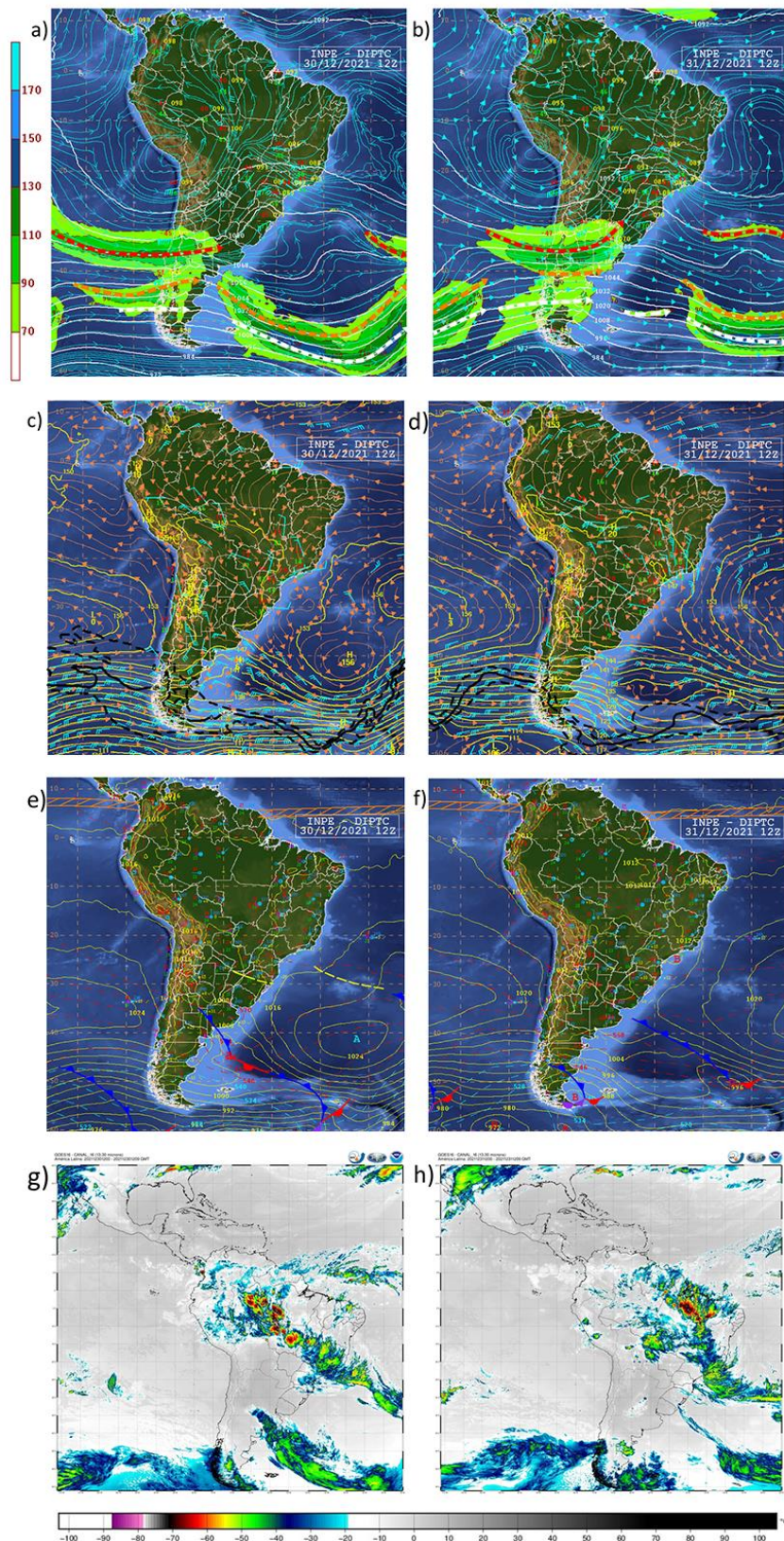


Figura 5 - (a-b) Carta sinótica de 250 hPa (preenchido: intensidade do vento, linhas azuis: escoamento do vento); (c-d) carta sinótica de 850 hPa (linhas laranjas: escoamento do vento em 850 hPa, barbelas azuis: direção e velocidade do vento (nós), linha preta: isoterma de 0 °C); (e-f) carta sinótica de superfície (linhas amarelas: isóbaras, linhas azuis e vermelhas: frente fria e frente quente, respectivamente); (g-h) imagens do canal-13 (infravermelho) do satélite GOES-16 (preenchido: temperatura de brilho do topo das nuvens). Fonte: CPTEC/INPE.

3.2 Comparação entre as estimativas de NCL

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os valores de NCL obtidos com diferentes procedimentos. Para efeitos de validação das equações, o NCL é calculado a partir de dados de sondagem fornecidos pela UWYO e também analisando-se o gráfico SkewT-LogP que é o conjunto considerado como referência (barras pretas nas Figuras 6 e 7).

Ao analisar os resultados obtidos de NCL em níveis de pressão (hPa, Figura 6) do SkewT-LogP com os mesmos dados de entrada, porém inseridas na Equação 3, percebe-se que há uma pequena superestimação da altura da base das nuvens, devido aos menores valores de pressão encontrados. Comparando-se o NCL obtido em metros (Figura 7) do SkewT-LogP com a mesma informação, mas baseado na Equação 2, nota-se que a equação possui um viés: quando o NCL é alto (acima de 500 m), a equação tende a superestimar o NCL, já quando é baixo tende a subestimar.

A boa performance da equação foi obtida ao usar dados medidos (sondagem), logo a comparação também deve ser em relação ao valor obtido por meio das equações que utilizam dados da ERA5 com o SkewT - LogP. Quando calculados utilizando a reanálise, o resultado obtido através da Equação 3 se faz idêntico ao encontrado utilizando os dados da UWYO, ou seja, a equação também superestimou o NCL, esta superestimação pode ser vista na Tabela 2. Em contrapartida, ao calcular o NCL em metros os resultados obtidos em sua grande maioria, são opostos àqueles usando dados observados (Tabela 3). Desta forma com o uso da ERA5 nuvens com base alta (baixa) têm o NCL subestimado (superestimado).

Inicialmente pensava-se que o NCL fornecido pela UWYO tivesse valor igual ao calculado com o SkewT-LogP (barras pretas nas Figuras 6 e 7). No entanto, os valores diferem e são subestimados (de aproximadamente até 200 m e 10 hPa).

Para Guarulhos, o NCL também foi estimado pelo tetômetro. Esse instrumento mostra uma tendência de superestimar o NCL, dado as magnitudes de diferença obtidas nos dias de análise, sendo de 57,1 % e 22,3 % para o primeiro e segundo dia, respectivamente. Contudo, um período maior de dados seria necessário para verificar melhor a performance deste instrumento.

Em suma, considerando o SkewT-LogP como referência para validar a equação de Dirmeyer, a Equação 3 possui um erro médio de 5,7%; ao utilizar a Equação 2 seu erro é de

aproximadamente 30%. Contudo as equações serão utilizadas para a obtenção das climatologias para a AS.

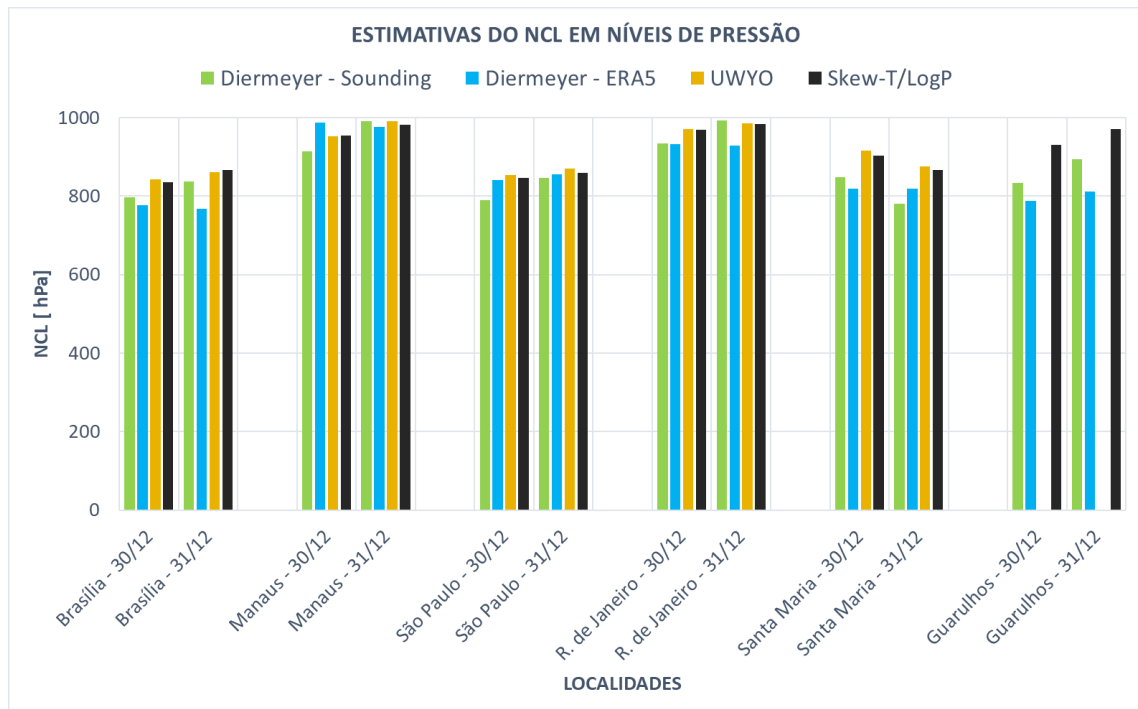


Figura 6 - NCL em níveis de pressão (hPa), utilizando diferentes formas de estimativas, para os dias 30 e 31 de dezembro de 2021, às 1200 Z, para as cidades de: Brasília/DF, Manaus/AM, São Paulo/SP, Rio de Janeiro/RJ, Santa Maria/RS e Guarulhos/SP.

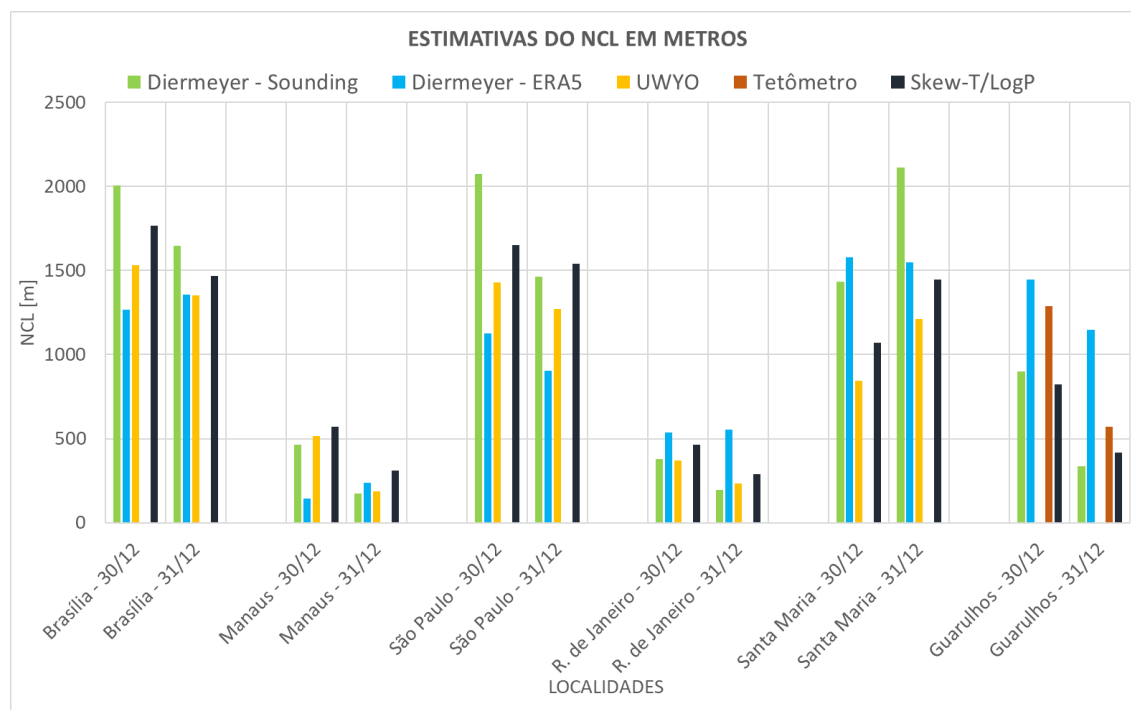


Figura 7 - NCL em metros, utilizando diferentes formas de estimativas, para os dias 30 e 31 de dezembro de 2021, às 1200 Z, para as cidades de: Brasília/DF, Manaus/AM, São Paulo/SP, Rio de Janeiro/RJ, Santa Maria/RS e Guarulhos/SP.

Tabela 2 - Diferença percentual entre o NCL em níveis de pressão, utilizando diferentes fontes de estimativas, comparadas com o SkewT-LogP (referência) para as cidades de Brasília/DF, Manaus/AM, São Paulo/SP, Rio de Janeiro/RJ, Santa Maria/RS e Guarulhos/SP.

Cidades	Data	Equação (3) – dados de sondagem	Equação (3) – dados ERA 5	Estimativa numérica - UWYO
Brasília	30/12	-4,6	-7,1	0,8
	31/12	-3,3	-11,4	-0,6
Manaus	30/12	-4,4	3,4	-0,2
	31/12	0,9	-0,5	1,0
São Paulo	30/12	-6,8	-0,8	0,7
	31/12	-1,5	-0,3	1,3
Rio de Janeiro	30/12	-3,5	-3,6	0,2
	31/12	0,9	-5,6	0,2
Santa Maria	30/12	-6,1	-9,4	1,3
	31/12	-9,9	-5,5	1,0
Guarulhos	30/12	-4,0	-15,4	N/A
	31/12	-14,1	-8,2	N/A

Tabela 3 - Diferença percentual entre o NCL em metros, utilizando diferentes fontes de estimativas, comparadas com o SkewT-LogP (referência) para as cidades de Brasília/DF, Manaus/AM, São Paulo/SP, Rio de Janeiro/RJ, Santa Maria/RS e Guarulhos/SP.

Cidades	Data	Equação (2) – dados de sondagem	Equação (2) – dados de sondagem	Estimativa numérica - UWYO	Tetômetro
Brasília	30/12	12,3	-29,1	16,6	N/A
	31/12	12,0	-7,7	8,8	N/A
Manaus	30/12	-19,1	-75,0	11,1	N/A
	31/12	-44,2	-24,4	68,6	N/A
São Paulo	30/12	25,5	-31,7	15,7	N/A
	31/12	-4,9	-41,2	21,4	N/A
Rio de Janeiro	30/12	-18,5	15,3	26,0	N/A
	31/12	-32,3	90,0	24,4	N/A
Santa Maria	30/12	34,2	47,6	26,4	N/A
	31/12	46,0	7,3	19,3	N/A
Guarulhos	30/12	9,6	12,2	N/A	57,1
	31/12	-19,2	7,2	N/A	22,3

3.3 Climatologia Anual do NCL

Por possuir uma ampla gama de dados que abrange toda AS utilizou-se os dados do ERA5 para o cálculo da climatologia. Desta maneira a Figura 8 mostra a climatologia anual do NCL em coordenadas de pressão (hPa, Equação 3) e em metros (Equação 2), no período de 1991 a 2021 para os horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800 Z. O padrão espacial em ambos os casos é similar. Entretanto, na região da cordilheira dos Andes, há pouca variação da altura do NCL em níveis de pressão (variação entre 500 e 700 hPa), já quanto ao cálculo em metros (variação entre 2000 e 6000 m) há variabilidade entre os horários sinóticos. Na região da Amazônia, o NCL possui grande variabilidade diurna, pois no horário das 0600 Z (Figura 8e) a altura da base das nuvens é de aproximadamente 1000 hPa (abaixo de 500 m de altitude), enquanto às 1800 Z (Figura 8g) se encontra mais elevada, isto é, em 850 hPa, o que indica o distanciamento da base das nuvens em relação à superfície. Na região central do continente (~20°S), o NCL possui valores entre 950 e 800 hPa às 0000, 0600 e 1200 Z, mas torna-se mais

alto às 1800 Z, aproximando-se de 700 hPa (2500 m). No nordeste do Brasil (NEB), principalmente no sertão nordestino, os quatro horários sinóticos não apresentam NCL menor do que 800 hPa (abaixo de 1000 m). Na região da Patagônia, o NCL possui valores menores em níveis de pressão, o que indica que seu NCL é mais elevado na região.

Para um entendimento dos processos físicos associados à variabilidade espacial do NCL sobre a AS, são mostradas também as variáveis de temperatura do ar a 2 metros do solo (Figuras 8i, 8j, 8k e 8l) e umidade específica em 850 hPa (Figuras 8m, 8n, 8o e 8p), que informa a massa de vapor de água em uma massa unitária de ar (ar seco mais vapor de água) (WALLACE e HOBBS, 2006). Em suma, as regiões mais quentes e úmidas são a Amazônia e a parte central do continente e as mais frias e secas localizam-se próximo à Patagônia Argentina e ao Uruguai.

Regiões mais frias podem conter menos vapor d'água na atmosfera do que regiões mais quentes segundo a termodinâmica da atmosfera (WALLACE e HOBBS, 2006). Assim, se num local a massa de ar é fria e não saturada, um pequeno deslocamento para maiores alturas poderá fazê-la atingir a saturação e, portanto, atingir o NCL. Em contrapartida, em regiões quentes, mas com pouca umidade no ar, as parcelas terão que se deslocar para maiores altitudes até o ar atingir a saturação. Por outro lado, em regiões quentes e com muita umidade, as parcelas de ar atingem a saturação em menores alturas (BETTS *et al.* 2014). Dessa forma a Figura 8 mostrou que em algumas regiões o NCL possui valores mais elevados (Patagônia e Nordeste do Brasil) do que em outras (Amazônia e Centro da AS), fato que pode estar associado à temperatura do ar e também à umidade específica.

No caso do Nordeste do Brasil, há menor disponibilidade de umidade na atmosfera, mas a temperatura é elevada devido ao intenso aquecimento radiativo da superfície (Figuras 8l e 8p). Logo, as parcelas de ar devem apresentar maior deslocamento vertical (atingir maiores alturas) até atingirem a temperatura de ponto de orvalho e, conseqüentemente, o NCL. Já em latitudes mais altas (centro-sul da Argentina, o que inclui a Patagônia), a temperatura do ar é menor, bem como a concentração de vapor d'água, isso faz com que apenas em níveis elevados da atmosfera haja umidade disponível suficientemente para que possa ter a formação de nebulosidade.

A Amazônia, embora seja uma região muito quente, possui muita disponibilidade de umidade na atmosfera, assim um pequeno deslocamento para maiores alturas faz com que a parcela sature atingindo o NCL, o qual será mais baixo do que em outras áreas da AS. Quanto à Cordilheira dos Andes sua principal influência é a topografia, em que atinge cerca de 7000 m

de altitude (Monte Aconcágua, na Argentina) deixando desta maneira deixando o NCL mais elevado.

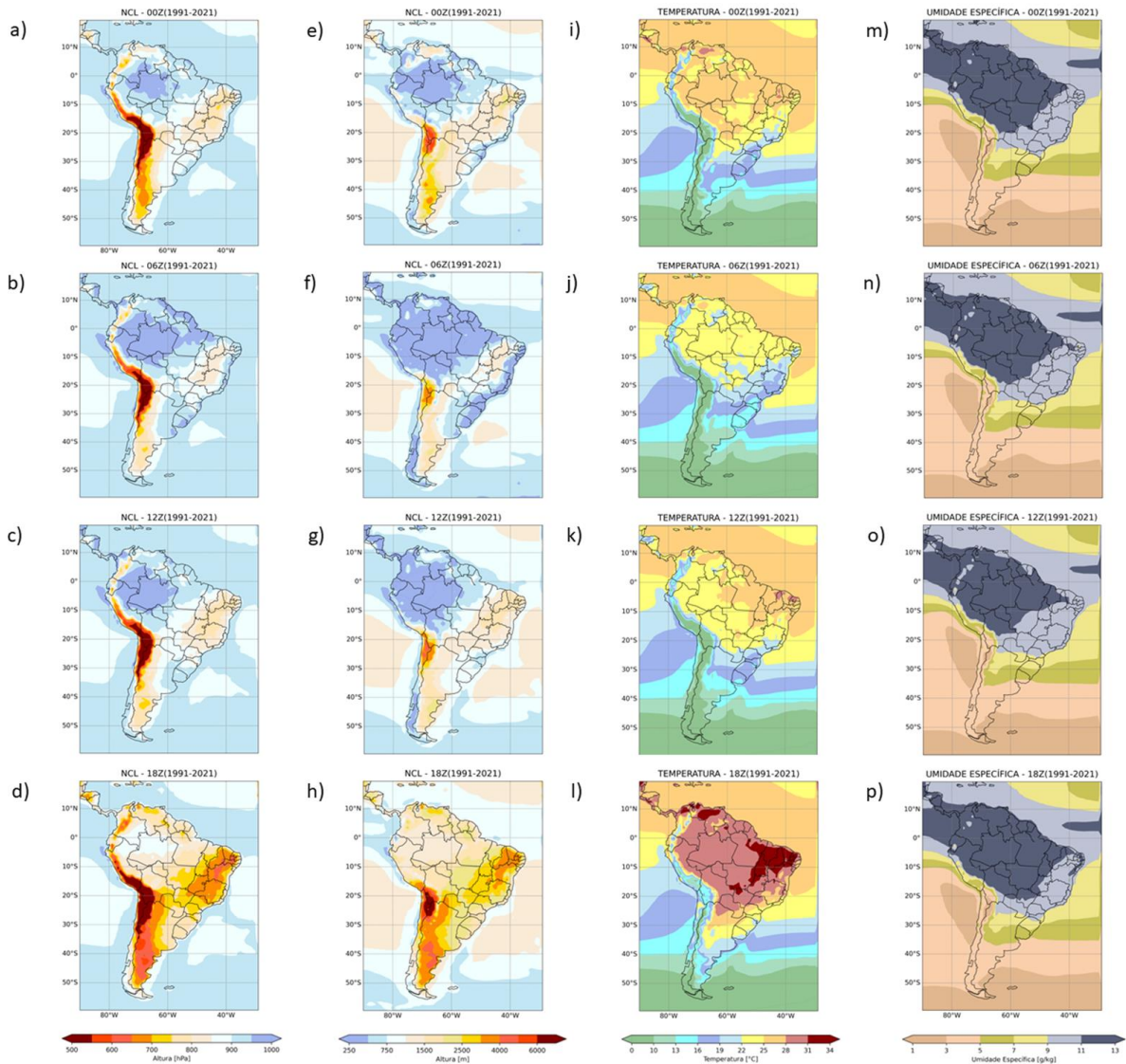


Figura 8 - Climatologias anuais por horário sinótico (representado pelas linhas começando às 0000 Z) para a AS: do (a-b-c-d) NCL em níveis de pressão(hPa), (e-f-g-h) NCL em metros (m), (i-j-k-l) temperatura (°C) e (m-n-o-p) umidade específica (g/kg).

3.4 Climatologia Sazonal da AS

As Figuras 9 e 10 apresentam a sazonalidade do NCL em níveis de pressão e em metros para os quatro horários sinóticos, respectivamente. Ao longo das quatro estações do ano e durante os horários analisados, a região norte do Brasil, onde está localizada a Floresta Amazônica, é a que mostra o NCL com os menores valores (mínimos valores de aproximadamente 500 m e 1000 hPa). Durante o verão, a ZCAS atua em grande parte da área

em estudo (da Amazônia, cruzando o centro-oeste e chegando ao sudeste) e devido às condições quentes e úmidas dessa época, a altura da base das nuvens é mais próxima da superfície comparada às demais estações do ano. Porém, para o mesmo período o sul da Argentina apresenta valores altos de NCL próximos a 500 hPa (5000 m). Isso pode ter associação com a baixa disponibilidade de umidade na atmosfera, que persiste durante todo o ano nesta região. A Patagônia se encontra na região onde ocorre o escoamento sotavento dos Andes, em que o ar se torna mais seco, desta forma tornando-se um dos possíveis fatores causantes desta falta de disponibilidade de umidade na região.

No sul do Brasil, a altura da base das nuvens diminui com a proximidade do inverno e atingem seu menor valor (abaixo de 500 m e 950 hPa) nessa estação do ano. Sugere-se, que isso esteja relacionado com o grande número de frentes frias que atingem o local durante o inverno (período de maior baroclinia na região, como discutido por Andrelina e Reboita, 2021). Nas demais partes do continente é durante o inverno que os valores de NCL atingem valores mais altos (Figuras 9l e 10l) e, provavelmente, devido a atuação de sistemas de alta pressão, como a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Nesse contexto, como o ar é predominante seco, a saturação, quando ocorre, é em níveis mais afastados da superfície. O padrão do NCL é um pouco diferente entre as estações de transição (outono e primavera). No outono, o NCL tende a ficar mais distante da superfície, com exceção da Amazônia, isso ocorre, pois, grande parte da AS está adquirindo condições mais secas nessa época do ano, enquanto na primavera ocorre a transição para o período mais úmido.

Para todas as regiões (Amazônia, Centro da AS, Nordeste e Patagônia) o horário das 1800 Z obtiveram a maior altura do NCL. No entanto se encontra em épocas distintas, o verão é o período em que se encontram os maiores valores na Patagônia (entre 2500 e 5000 m), enquanto que para a Amazônia e a região central do continente isto ocorre durante o inverno (junho, julho e agosto), onde os valores obtidos estão entre 1500 e 4000 m. Quanto ao Nordeste, o pico de altura do NCL ocorre na primavera (setembro, outubro e novembro) onde o NCL pode atingir 4500 m.

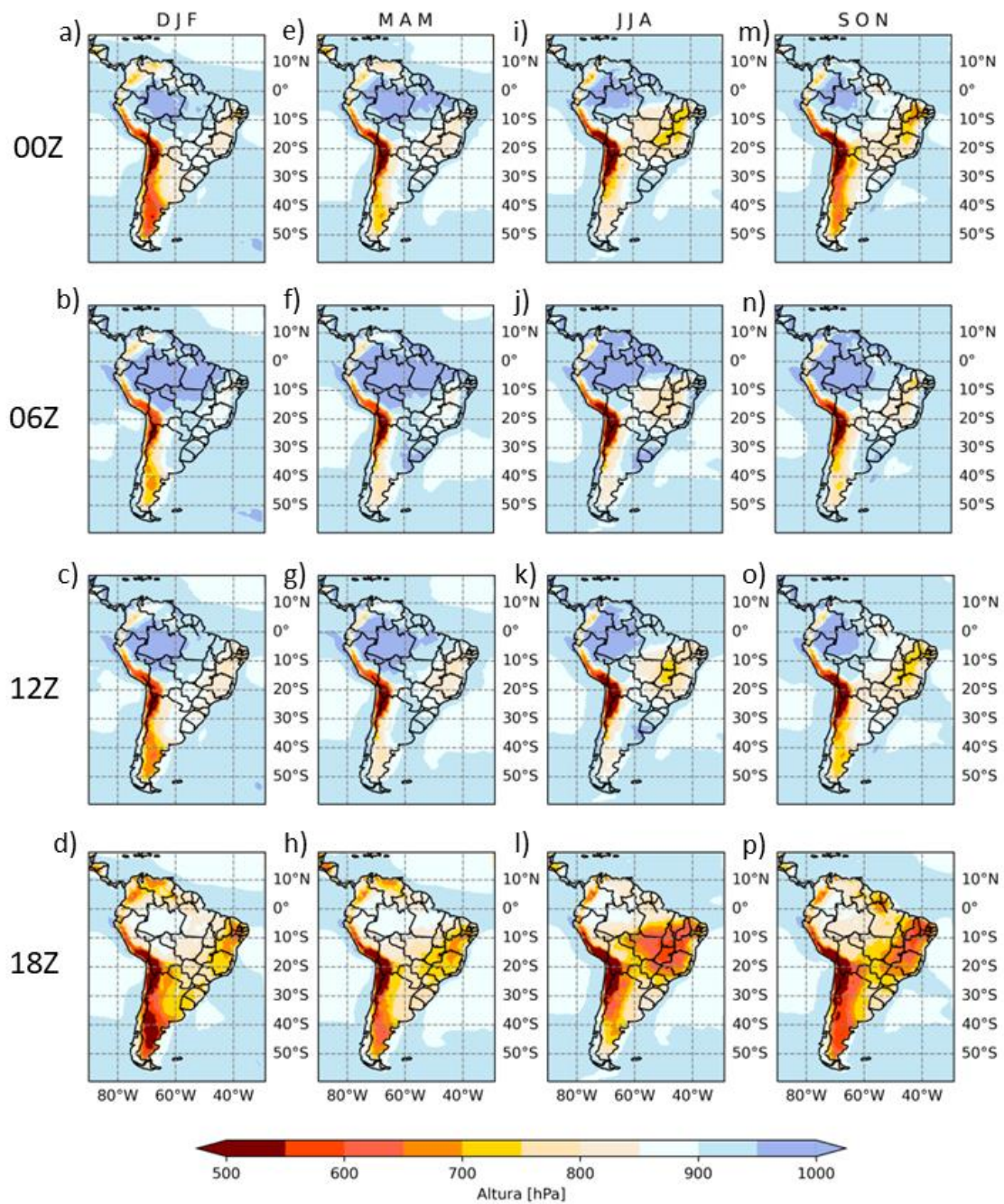


Figura 9 - Climatologia sazonal do NCL em níveis de pressão para a AS em médias trimestrais para o verão (DJF - Dezembro, Janeiro e Fevereiro, a-b-c-d), o outono (MAM - Março, Abril e Maio, e-f-g-h), o inverno (JJA - Junho, Julho e Agosto, i-j-k-l) e a primavera (SON - Setembro, Outubro e Novembro, m-n-o-p), para os horários sinóticos: 0000 Z (a-e-i-m); 0600 Z (b-f-j-n); 1200 Z (c-g-k-o); e 1800 Z (d-h-l-p).

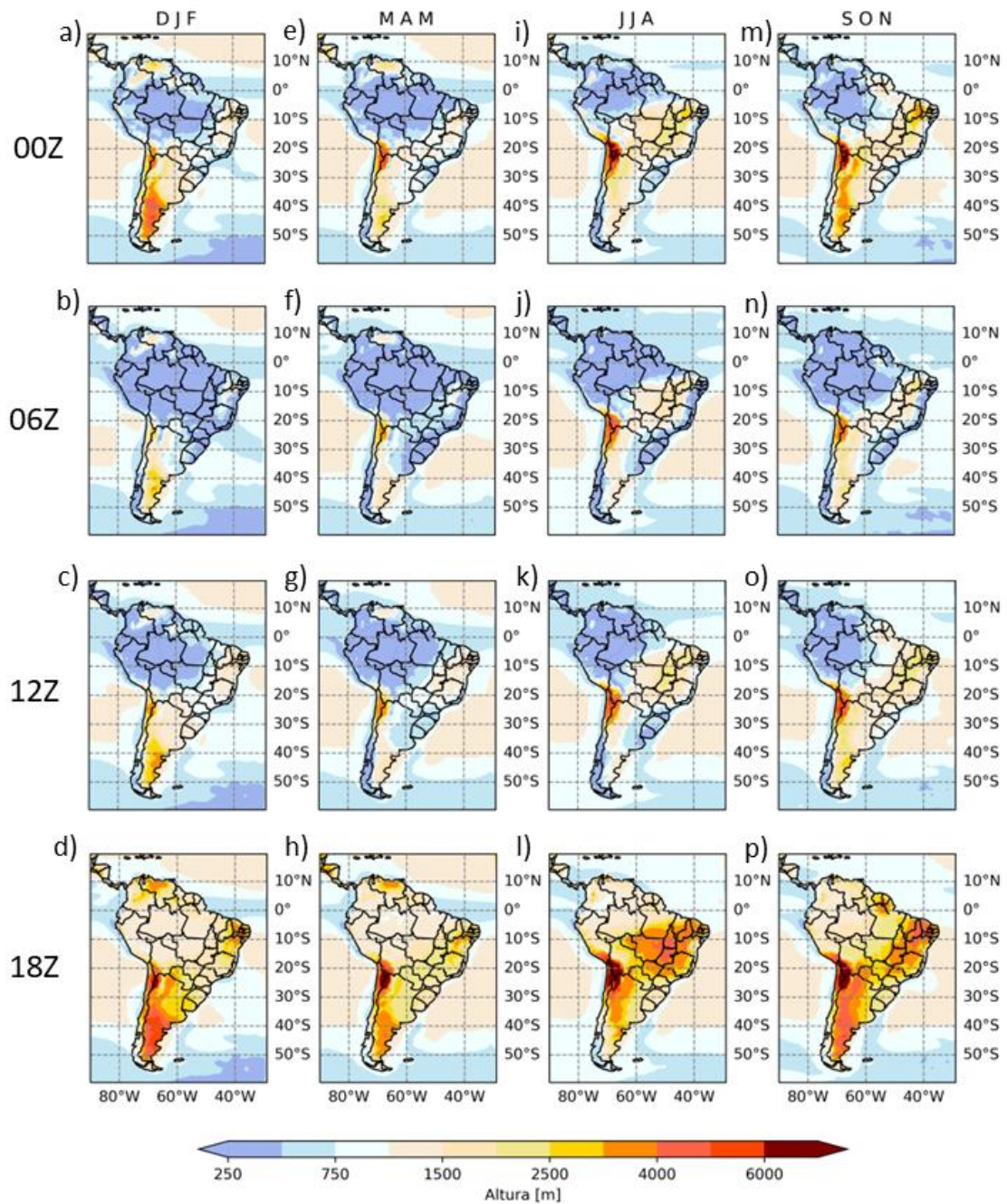


Figura 10 - Climatologia sazonal do NCL em metros para a AS em médias trimestrais para o verão (DJF – Dezembro, Janeiro, Fevereiro, a-b-c-d), o outono (MAM – Março, Abril Maio, e-f-g-h), o inverno (JJA - Junho, Julho e Agosto, i-j-k-l) e a primavera (SON - Setembro, Outubro e Novembro, m-n-o-p), para os horários sinóticos: 0000 Z (a-e-i-m); 0600 Z (b-f-j-n); 1200 Z (c-g-k-o); e 1800 Z (d-h-l-p).

Com o objetivo de subsidiar a análise prévia, nos anexos 1 e 2 são apresentadas as climatologias sazonais da temperatura do ar 2 metros do solo e da umidade específica para o nível de 850 hPa. Em geral, a temperatura é mais elevada (atingindo valores de 33 °C na região central e Norte da AS) no verão e menor (atingindo valores menores que 12 °C na região Sul) no inverno.

Para os horários das 0600 Z e 1200 Z as temperaturas (Anexo 1) estão amenas, visto que durante o período noturno a superfície terrestre emite radiação de onda longa o que faz com que ela se resfrie. Nestes horários, as temperaturas mais baixas predominam por grande faixa da AS e atingem, inclusive a Venezuela e Colômbia. Apenas no sertão nordestino as temperaturas se encontram acima de 24 °C. Com relação à umidade específica durante o verão, o Anexo 2 mostra que grande parte da América do Sul possui valores acima de 11 g/kg, o que indica que a altura da base das nuvens pode ser atingida mais próxima à superfície. No inverno ocorre uma diminuição desta umidade disponível na atmosfera, isso indica que para atingir o NCL a parcela de ar deve se deslocar a uma altura mais elevada, a fim de atingir a saturação. Estes padrões podem ser vistos na região central do continente, onde durante o verão os valores são elevados e para o inverno caem drasticamente.

3.3 Análise por Localidade

3.3.1 Climatologia

A Figura 11 apresenta as séries temporais anuais para as 0000, 0600, 1200 e 1800 Z do NCL em metros, temperatura, umidade específica e precipitação. Em adição a Tabela 4 mostra a tendência dessas séries indicando em negrito os casos com significância estatística ao nível de 95% de confiança de acordo com o teste de Mann – Kendall. A principal informação na Figura 11 é que independente da localidade, o NCL é mais elevado às 1800 Z, possivelmente pelo fato de que o máximo de temperatura é o momento em que a umidade específica é mais baixa (BETTS *et al.* 2014). Além disso, há tendência de aumento do NCL com o passar dos anos e, em geral, é significativa também às 1800 UTC com exceção de Santa Maria (Figura 12e).

Associada à tendência positiva do NCL nota-se tendência negativa na precipitação anual, provavelmente indicando que valores menores de umidade específica associada a altas temperaturas propiciam a existência de um NCL mais elevado.

Em Brasília, a tendência positiva do NCL é acompanhada por tendência positiva da temperatura e negativa de umidade e de precipitação (Tabela 4), porém apenas os valores de NCL e precipitação possuem significância estatística. Santa Maria não possui tendência significativa, apenas em seus valores de temperatura. No entanto, Guarulhos e São Paulo possuem valores significativos em todas as variáveis. Desta forma, é possível que exista alguma relação entre o aumento da altura do NCL e temperatura, diminuição da umidade específica com a diminuição de precipitação nestas duas localidades. Rio de Janeiro e Manaus não

mostraram tendências significativas de precipitação, apesar de serem vistas nos gráficos, isso significa que os valores encontrados na climatologia anual não possuem uma tendência clara de diminuição da taxa de precipitação e ao analisar os valores de NCL apenas para o Rio de Janeiro às 0000 Z o valor não possui significância estatisticamente.



Figura 11 - Climatologia anual do NCL em metros (dados provenientes da Equação 2), utilizando dados do ERA5) para os quatro horários sinóticos (0000 Z, 0600 Z, 1200 Z e 1800 Z), temperatura (°C, dados provenientes do ERA5), umidade específica (g/kg, dados provenientes do ERA5) e precipitação (mm, dados provenientes do CPC para: Brasília, Guarulhos, Manaus, Rio de Janeiro, Santa Maria e São Paulo).

Tabela 4 - Valores de inclinação da reta para o nível de significância de 95%. Resultados em negrito correspondem a uma tendência significativa, de acordo com o teste de Mann-Kendall.

Cidades	NCL[m] - 00Z	NCL[m] - 06Z	NCL[m] - 12Z	NCL[m] - 18Z	Temperatura - 18Z	Umidade - 18Z	Precipitação
Brasília	9,330	8,680	10,994	17,461	0,020	-0,012	-12,61
Guarulhos	5,670	3,425	5,056	17,243	0,045	-0,012	-15,06
Manaus	4,794	4,384	4,021	11,578	0,014	0,006	-5,35
Rio de Janeiro	1,447	3,706	5,124	6,810	0,021	-0,006	-7,65
Santa Maria	2,159	1,887	1,125	3,444	0,024	-0,007	-1,44
São Paulo	9,367	4,466	8,439	27,903	0,070	-0,026	-12,55

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivos: (a) validar as Equações 2 e 3 através de comparações com o NCL obtido a partir de sondagens da atmosfera e (b) utilizar as equações na determinação da climatologia do NCL na América do Sul (AS) no período de janeiro de 1991 a dezembro de 2021. No entanto, há duas fontes de incertezas: a primeira é a utilização de uma equação para estimar o NCL e a segunda é a utilização das reanálises ao invés de sondagens (devido a escassa distribuição espacial de radiossondagens globalmente). Contudo, no geral, ao gerar os resultados das Equações 2 e 3 verificou-se que a Equação 3 reflete razoavelmente bem a realidade do NCL, enquanto a Equação 2 reflete de maneira razoável a realidade. Desta maneira foram utilizadas para a realização da climatologia da AS.

A partir disso, conclui-se que o NCL possui variações de acordo com sua região da AS. Em regiões que possuem maiores valores de temperatura e também grande disponibilidade de vapor d'água na atmosfera (umidade) o NCL tende a ser mais próximo da superfície. O contrário ocorre em áreas em que há grandes temperaturas, porém, baixos valores de umidade, a parcela de ar se desloca verticalmente até que atinja a saturação e consequentemente o NCL. Para baixos valores de temperatura é necessário que tenha grandes valores de umidade específica, desta forma a parcela não precisa se elevar muito na atmosfera para que alcance o NCL, caso não tenha alta disponibilidade de vapor d'água na atmosfera o NCL deverá ser alcançado em altos níveis.

Sabe-se que durante o período de um ano há variações de temperatura, precipitação e a ocorrência de eventos meteorológicos. Desta forma notou-se que para a Amazônia e para a região central da AS durante os meses de junho, julho e agosto às 1800 Z foram registrados os maiores valores nas alturas do NCL, próximos a 2000 m (750 hPa) na Amazônia e ultrapassando 4000 m (600 hPa) em alguns pontos da região central da AS. Apenas março, abril e maio para

às 0600 Z o NEB registrou NCL abaixo de 950 hPa (500 m), para os outros meses do ano e horários sinóticos os valores foram acima deste índice sendo que para setembro, outubro e novembro o seu pico, aproximadamente de 600 hPa (4000 m) às 1800 Z para grande parte da região. Em contrapartida, a Patagônia, localizada no Sul da AS, tem seus maiores valores de NCL registrados durante o verão austral em que ficaram acima de 4500 m (~500 hPa). Em resumo, para todas as localidades os maiores valores de NCL foram registrados às 1800 Z.

Quanto analisados em pontos de grade, o NCL mostra tendência de aumento em cinco das seis localidades selecionadas. Em destaque estão as cidades de São Paulo e Guarulhos que para todos os horários sinóticos seus valores tiveram significância estatística. Além disso, as variáveis temperatura, umidade específica e precipitação também apresentaram tendência: positiva (temperatura) e negativa (umidade específica e precipitação). Desta maneira fica evidente que há relação entre a elevação do NCL com a diminuição de precipitação.

É importante que seja incentivada a ampliação da base de dados de radiossondagem, de modo a obterem-se valores in loco de NCL para estudos futuros. Além disso, dada a representatividade do NCL para análises de tempestade de mesoescala e escala sinótica, sugere-se que sejam feitas correlações entre os valores da altura da base de nuvens obtidos em diferentes eventos, com ênfase nos sistemas que produzem elevado acumulado de precipitação e, eventualmente, desastres naturais.

5. REFERÊNCIAS

AHRENS, C. D. An introduction to weather, climate, and the environment. **Meteorology Today (7th ed.)** Thomson/Brooks/Cole, 624p, 2003.

AN, N. Evaluation of cloud base height in the North American Regional Reanalysis using ceilometer observations. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 6, p. 3161-3178, 2020.

ALBRECHT, R. I.; MORALES, C. A. Microfísica das Nuvens. **Documento eletrônico. Disponível em:** < <http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/curso/rachel/MicrofisicaDasNuvens.pdf> >. Acesso em 23 out 2022, v. 7, 2021.

BETTS, A. K. Climate coupling between temperature, humidity, precipitation, and cloud cover over the Canadian Prairies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 23, p. 13,305-13,326, 2014.

COSTA, M.M.G. A Meteorologia aeronáutica no Aeroporto de Guarulhos. **Anais do VII Simpósio de Transporte Aéreo**, p. 539-550, 2008.

COSTA-SURÓS, M. Behavior of cloud base height from ceilometer measurements. **Atmospheric research**, v. 127, p. 64-76, 2013.

DIRMEYER, P. A. Trends in land-atmosphere interactions from CMIP5 simulations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 3, p. 829-849, 2013.

DIRMEYER, P. A. Intensified land surface control on boundary layer growth in a changing climate. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 4, p. 1290-1294, 2014.

EMANUEL, K. A.; ZIVKOVIC-ROTHMAN, M. 1999: Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. **J. Atmos. Sci.**, 56, 1766–1782, doi:10.1175/1520-0469(1999)056<1766:DAEOAC.2.0.CO;2.

ESPY, J. P. Essays on meteorology. **Journal of the Franklin Institute, of the State of Pennsylvania, for the Promotion of the Mechanic Arts; Devoted to Mechanical and Physical Science, Civil Engineering, the Arts and Manufactures, and the Recording of American and Other Patent Inventions (1828-1851)**, v. 17, n. 5, p. 309, 1836.

FERREIRA, C.; REBOITA, M. S. Índices de Instabilidade: O que são e para que servem? 1. ed. **Clube de Autores**, 2020. 80p.

FERREIRA, G.W.S.; REBOITA, M.S. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, p. 873, 2022.

GEORGAKAKOS, K. P., and R. L. Bras (1984), A hydrologically useful station precipitation model. 1. **Formulation**, **Water Resour. Res.**, 20, 1585–1596.

HERSBACH, Hans. The ERA5 Atmospheric Reanalysis. In: **AGU fall meeting abstracts**. 2016. p. NG33D-01.

KENDALL, M. G. Rank correlation measures. **Charles Griffin: London, U.K**, p.220, 1975.

MANN, H. B. Econometrica. **The econometric society**, v.13, n.3, p.245-259, 1945.

MARINHA DO BRASIL, D.H.N Diretoria de Hidrografia e Navegação, Manual do Observador Meteorológico. **Marinha do Brasil**, 3.ed. 180p. Niterói: 2015.

REBOITA, M. S. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.

ROMPS, D. M. Exact Expression for the Lifting Condensation Level, **Journal of the Atmospheric Sciences**, 74(12), 3891-3900. Retrieved Sep 15, 2017.

SMITHSON, P; ADDISON, K; ATKINSON, K. **Fundamentals of the physical environment**. Routledge, 2013.

TEODORO, T. A. Climate Change Impacts on the South American Monsoon System and Its Surface–Atmosphere Processes Through RegCM4 CORDEX-CORE Projections. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 4, p. 825-847, 2021.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric science: an introductory survey. **Academic Press**, New York, Inc. 1 Edição, 467 p., 1977.

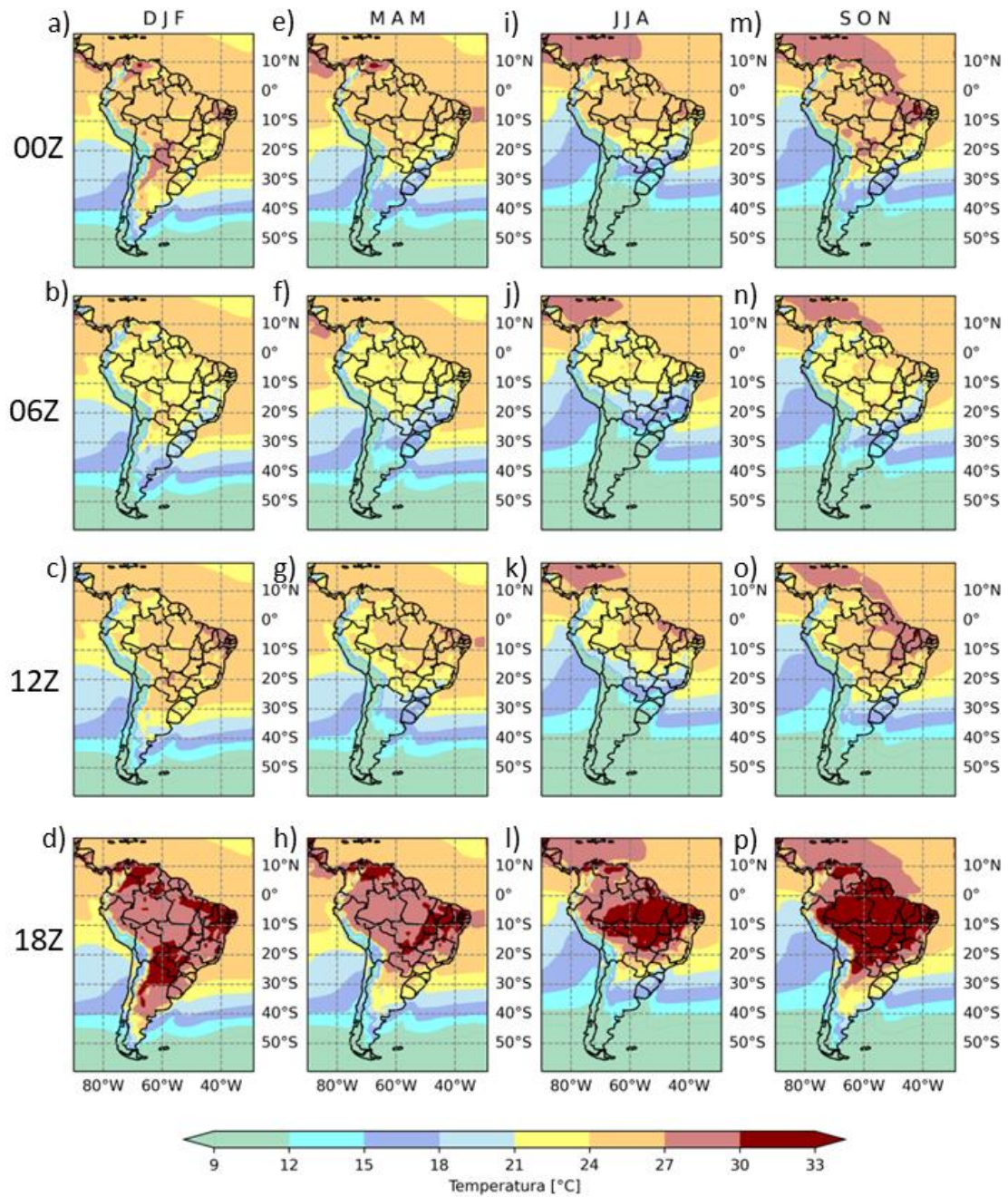
WALLACE, M. J; HOBBS, V. P. Atmospheric science: an introductory survey. **Academic Press**, New York, Inc. 2 Edição, 467 p., 2006.

WETZEL, P. J., 1990: A simple parcel method for prediction of cumulus onset and area-averaged cloud amount over heterogeneous land surfaces. **J. Appl. Meteor.**, 29, 516–523.

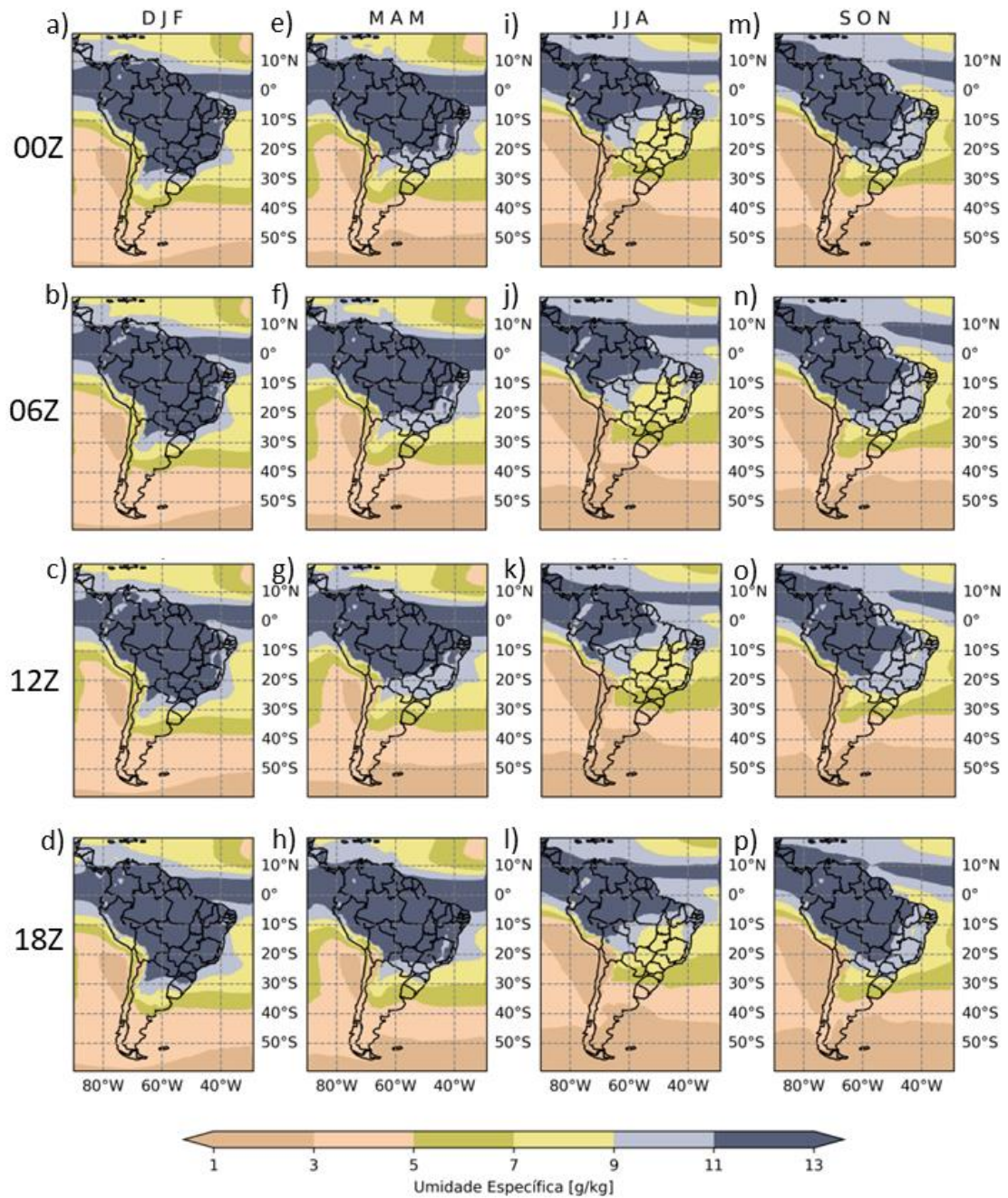
ZHANG, C. Cloud base and top heights in the Hawaiian region determined with satellite and ground-based measurements. **Geophysical research letters**, v. 39, n. 15, 2012.

ZHANG, Y. Climatology of cloud-base height from long-term radiosonde measurements in China. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 35, n. 2, p. 158-168, 2018.

ANEXOS



Anexo 1 - Climatologia sazonal da temperatura (°C) para a AS em médias trimestrais para o verão (DJF – Dezembro, Janeiro, Fevereiro, a-b-c-d), o outono (MAM – Março, Abril Maio, e-f-g-h), o inverno (JJA - Junho, Julho e Agosto, i-j-k-l) e a primavera (SON - Setembro, Outubro e Novembro, m-n-o-p) para os horários sinóticos: 0000 Z (a-e-i-m); 0600 Z (b-f-j-n); 1200 Z (c-g-k-o); e 1800 Z (d-h-l-p).



Anexo 2 - Climatologia sazonal da umidade específica (g/kg) para a AS em médias trimestrais para o verão (DJF – Dezembro, Janeiro, Fevereiro, a-b-c-d), o outono (MAM – Março, Abril Maio, e-f-g-h), o inverno (JJA - Junho, Julho e Agosto, i-j-k-l) e a primavera (SON - Setembro, Outubro e Novembro, m-n-o-p) para os horários sinóticos: 0000 Z (a-e-i-m); 0600 Z (b-f-j-n); 1200 Z (c-g-k-o); e 1800 Z (d-h-l-p).